

ceramictranslation

Teil II - Variation und Ausformung

Ein modulares, keramisches Bausystem
zur Herstellung doppelt gekrümmter Tragstrukturen



Bernhard Harrer, BSc

Ceramic Translation - Teil II - Variation und Ausformung
Ein modulares, keramisches Bausystem
zur Herstellung doppelt gekrümmter Tragstrukturen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Architektur

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Assoc. Prof, Andreas Trummer

Institut für Tragwerksentwurf

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

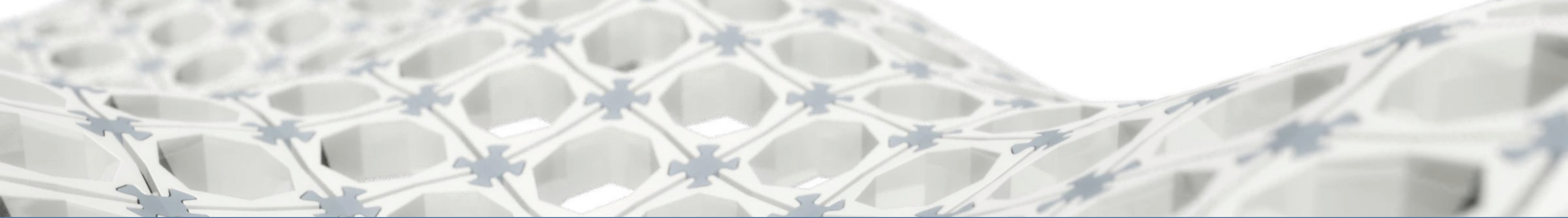
Datum

Unterschrift

Danksagung

Wir bedanken uns bei Prof. Stefan Peters und Assoc. Prof. Andreas Trummer für die Unterstützung und die Möglichkeit das Projekt bis zu dieser Reife zu führen. Für die Unterstützung schon im Rahmen der Projektübung gebührt Prof. Martin Bechthold, DI Felix Amtsborg, sowie unserem Studienkollegen Stanislaus Haidacher, Bsc unser Dank.

Für die Unterstützung bei der Produktion des Prototypen möchten wir uns besonders bei Hrn. Ingolf Christian und allen anderen beteiligten Personen der Ortweinschule (Meisterschule für Kunst und Gestaltung / Keramische Formgebung), sowie DI Bernd Grabner (TU - Modellbauwerkstätte) bedanken. Ein weiterer Dank gilt der Firma Tondach Gleinstätten für die finanzielle Unterstützung.



Einleitung	10	Fischgräte, Girlande und Gürtel	41	3 Ausformungsvarianten von „Ceramic Translation“ - Tragstrukturen	Eindecken von „Ceramic Translation“ - Tragstrukturen mit Plattenwerkstoffen	128
Übersicht	12	Brunelleschi und die Kuppel von Santa Maria del Fiore				
1 Konstruktionen und Techniken im Wölbungsbau unter Verwendung keramischer Werkstoffe		Schicht für Schicht und ohne Schalung	49	Formgebende Parameter für Tragwerksgeometrien	5 Architektonischer Entwurf	
		Die Guastavinos und das katalanische Gewölbe		Variationsmöglichkeiten des Modulrasters	Aufgabenstellung	135
Der Menschheit erster Werkstoff	15	Als das Mauerwerk zur Schale wurde	60	Variationsmöglichkeiten der Schnittgeometrie	Bauplatz	136
Die frühen Hochkulturen und die Entdeckung der Keramik als Baumaterial		Eladio Dieste und die Einheit von Struktur und Form			Entwurf	140
Auf Grundlage des Bogens	20	2 Das „Ceramic Translation“ - Bausystem		4 Ausformungsvarianten von „Ceramic Translation“ - Modulsteinen	Konstruktion	158
Die Römer und ihre Wölbungstechniken		Geometrisches Prinzip von „Ceramic Translation“	68	Formgebende Parameter für Modulsteine	Fazit und Ausblick	166
Das keramische Himmelszelt	26	Die Grundparameter des Systems	70	Varianten der Stein- und Knotengeometrie	6 Verwendete Quellen	
Byzanz und die Kuppel über dem Quadrat					Selbstständige Publikationen	169
Tragend oder nicht tragend	34				Unselbstständige Publikationen	170
Das gotische Gewölbe und die Aufgabe der Rippe					Abbildungsverzeichnis	172



Einleitung

Im Rahmen des vom ITE angebotenen Masterstudios „Ceramic Re:Visions“, haben wir uns der Aufgabe gestellt, eines der ältesten und bewährtesten Baumaterialien der Welt - Keramik - neu zu denken. Abseits von klassischen Bögen und Gewölben wurde ein innovatives System entwickelt, das Ansätze von Mass Customization, industriellen Fertigungsmethoden und Modulbauweise verbindet. Das entwickelte Bausystem „Ceramic Translation“ integriert dabei die immanenten Eigenschaften des Ausgangsmaterials Ton sowie effiziente und bewährte Herstellungsverfahren in das Konzept. Formal bietet es die Möglichkeit, zweifach gekrümmte keramische Tragstrukturen zu erzeugen.

Die Masterarbeit „Ceramic Translation“ setzt sich mit dem Entwurf und den Eigenschaften des entwickelten keramischen Tragsystems auseinander und wurde in zwei Teilen behandelt.

Der erste Teil „Tragwerksentwurf und Konstruktion“ beschäftigt sich unter anderem mit den technologischen Aspekten des Bausystems und dessen Ausgangsmaterial Ton. Weiters wird die Planung und Herstellung des Prototypen zur Überprüfung des Konstruktionsprinzips behandelt. Das entwickelte System, der Prototyp sowie der architektonische Entwurf aus Teil II werden statisch betrachtet und bewertet.

Der vorliegende Teil II der Masterarbeit wirft einen Blick auf verschiedenste keramische Konstruktionsweisen im Wölbungsbau und behandelt die möglichen Variationen und Ausformungen von „Ceramic Translation“. Um dies zu veranschaulichen wurde ein architektonischer Entwurf entwickelt, der ein praktisches Anwendungsbeispiel des Bausystems zeigt.

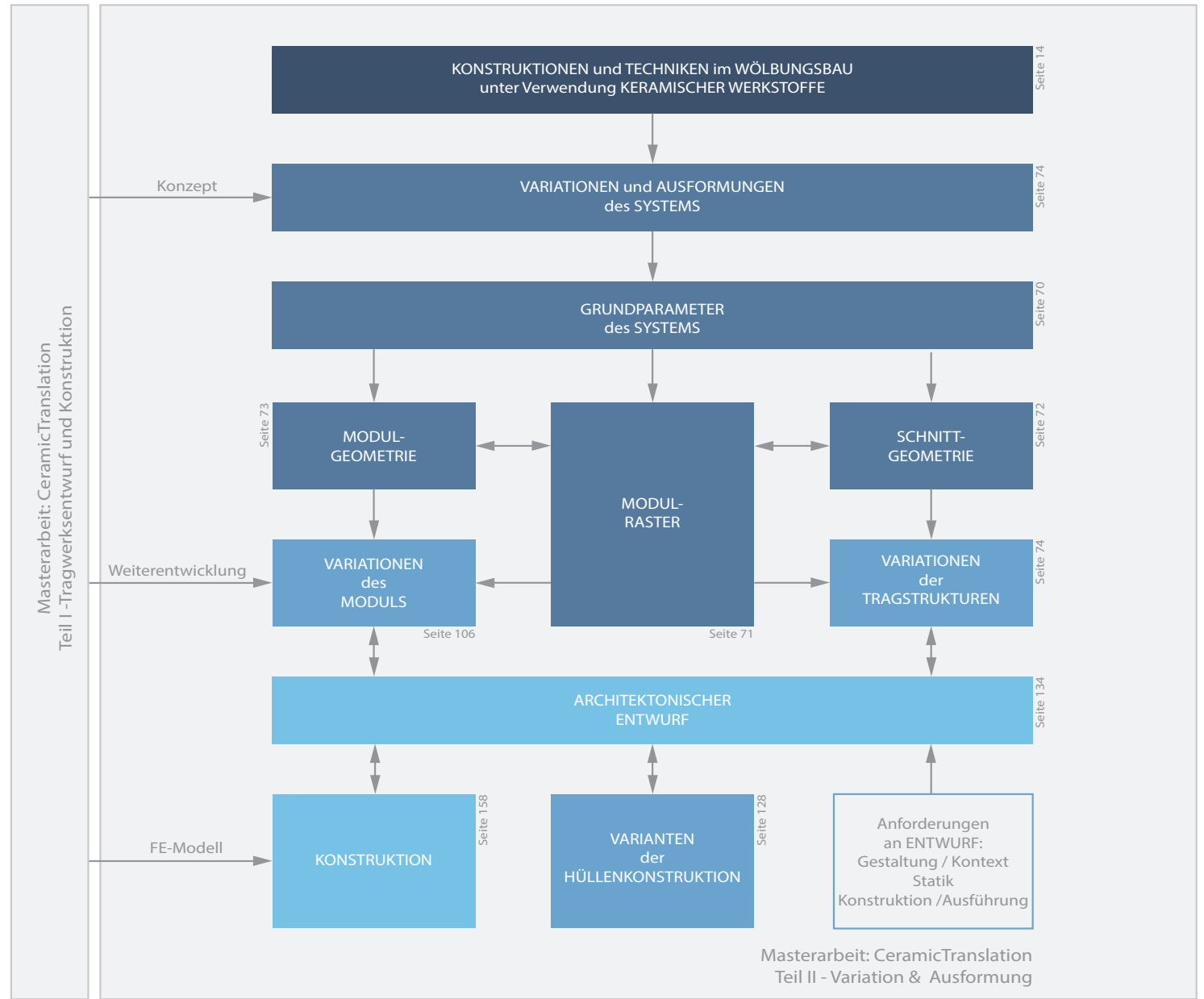
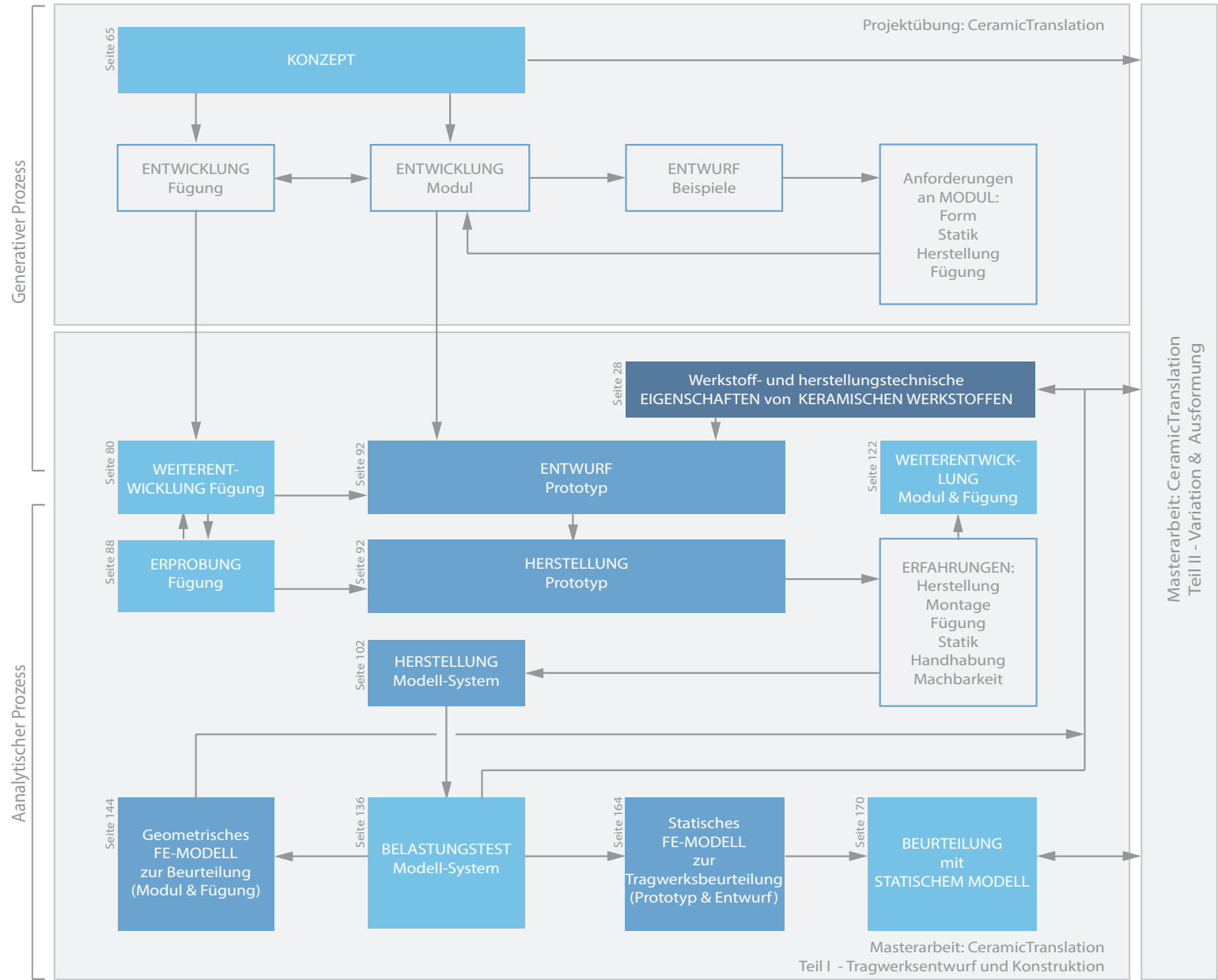
„Ceramic Translation“ Teil II: Variation und Ausformung

Mit „Ceramic Translation“ wird einer der ältesten Baustoffe mit Hilfe einer modernen Konstruktionsweise neu interpretiert. Doch welche Bauweisen wurden von den frühen Hochkulturen bis ins 20. Jhd unter Verwendung keramischer Baustoffe entwickelt? In Bezug auf das „Ceramic Translation“ - Bausystem sind dabei vor allem die Konstruktionsprinzipien raumüberspannender Strukturen von Bedeutung.

Die vorliegende Masterarbeit behandelt die formalen Möglichkeiten des entwickelten Systems. Um dieses Thema bearbeiten zu können, ist es notwendig das geometrische Prinzip hinter „Ceramic Translation“ näher zu betrachten. Welche sind die formgebenden Parameter des Systems und wie kann man mit deren Hilfe die Gestalt einer keramischen Tragstruktur steuern?

Mit dem Bau eines Prototypen, welcher in Teil I - Tragwerksentwurf und Statik näher behandelt wird, konnten wir das entwickelte Konstruktionsprinzip überprüfen. Doch welche formalen Freiheiten bietet das System? Welche Tragwerksgeometrien können unter Verwendung von „Ceramic Translation“ entstehen, und welche Steinformen kann ein Tragwerk beinhalten?

„Ceramic Translation“ ist ein modulares, keramisches Bausystem und ermöglicht die Herstellung doppelt gekrümmter Tragstrukturen. Die Entwicklung verschiedener Variationen und Ausformungen zeigt die formalen Möglichkeiten des Systems. Aber in welcher Form könnten keramische Tragstrukturen praktische Anwendung finden und wie würden anfallende Detailpunkte der Konstruktion in der Ausführung aussehen?



Die Keramik ist schon seit Jahrtausenden eng mit der Baukunst verbunden. So wie die Menschheit, ist auch das Bauwesen einem ständigen Wandel unterzogen. So entstanden von den frühen Hochkulturen bis in die Gegenwart verschiedenste Techniken in der Verarbeitung von Baukeramik. Die Eigenschaften dieses Werkstoffes werden vor allem in den unterschiedlichen Wölbungstechniken sichtbar.

1

Konstruktionen und Techniken im Wölbungsbau unter Verwendung keramischer Werkstoffe

Der Menschheit erster Werkstoff Die frühen Hochkulturen und die Entdeckung der Keramik als Baumaterial

Keramik und Tragwerk

Die Keramik stellt in der Geschichte der Baukonstruktion und Bautechnik einen wichtigen Werkstoff dar, der gerade in jüngster Zeit wieder starke Verwendung findet. „Die vergangenen Jahrzehnte waren durch eine Wiederentdeckung der Architekturkeramik gekennzeichnet[...]“¹, und haben der Keramik als Baustoff wieder neues Leben eingehaucht. Besonders als vielfältiges Gestaltungsmittel an Fassaden-, Boden-, und Deckenflächen sowohl im Landschafts- als auch im Städtebau wird die Ästhetik keramischer Oberflächen wieder geschätzt. Durch die vielfältigen Bearbeitungsmöglichkeiten und die modernen Fertigungstechniken von Ton können keramische Baustoffe ein breites Feld an Einsatzgebieten abdecken. Die Tonmischungen können präzise auf gewünschte Materialeigenschaften abgestimmt werden, wobei mit Zuschlagstoffen die Qualität erhöht werden kann. Vor allem Eigenschaften wie Abnutzungs-, Hitze- und Witterungsbeständigkeit machen Keramik zu einem beliebten Oberflächenmaterial, sowohl im Innen- als auch im Außenbereich. Die Architekturkeramik als gestalterisches Element hat sich von der glasierten Fliese über doppelt gekrümmte Fassadenpaneele und Sonnenschutzelemente, bis zur klimaregulierenden Säule in alle Richtungen weiterentwickelt. Im Gegensatz dazu funktioniert die Keramik in

Tragwerksplanung und -entwurf größtenteils noch immer nach denselben Prinzipien wie vor tausenden Jahren. Als tragendes keramisches Bauteil wird in fast allen Fällen der gebrannte Ziegel eingesetzt. Das Ziegelbausystem hat sich in der langen Zeit seit seiner Erfindung im Gegensatz zu anderen Bausystemen nur wenig weiterentwickelt und funktioniert noch immer nach derselben Methodik. Während sich das Ziegelmauerwerk in vertikalen Elementen, wie Wände, weiterhin behaupten kann, werden horizontale Elemente, wie Decken, nur mehr selten als Ziegelgewölbe gemauert. Bei Tragwerken mit großen Spannweiten findet der Ziegel nur mehr in den seltensten Fällen Anwendung. Die imposante keramische Kuppel wurde von Stahl- und Holztragwerken abgelöst. Doch der gebrannte Ziegel hat eine lange Tradition als tragendes Bauteil, auch im Überbrücken großer Spannweiten. Vielleicht sollte diese Tradition wieder aufgegriffen und an neuen keramischen Tragstrukturen geforscht werden, sodass die breit gefächerten Qualitäten der Architekturkeramik auch im Tragwerksentwurf zu neuen Alternativen führen.

¹ Bechthold/Kane/King 2015, 8.

Frühe Hochkulturen

Die Bauform eines Gebäudes wird durch Anforderungen, wie Standfestigkeit, vorhandene Materialien und Ressourcen sowie Bauzeit beeinflusst.² Diese und ähnliche Abhängigkeiten führten wahrscheinlich zur Erfindung des Ziegels. Als die Menschen sesshaft wurden, begannen sie an verschiedenen Orten mit den vorhandenen Rohstoffen und angeeigneten Techniken zu bauen. Schon in den frühen Hochkulturen Mesopotamiens, Ägyptens und im Indus war der Ziegel ein weitverbreiteter Baustoff. „Handgeformte [ungebrannte] Lehmziegel findet man in unteren Schichten des Nilschlammes in Ägypten aus der Zeit um 14 000 v. Chr.“³ Die Menschheit erkannte also schon früh die Vorteile von Lehm als Baustoff und es dauerte nicht lange, bis sie ihn in Formen zu Ziegeln pressten.

„Im Gegensatz zu Materialien, die im Wesentlichen unverändert aus der Natur entnommen und für bestimmte Zwecke bearbeitet wurden (zum Beispiel Holz oder Stein), wird Keramik als erster vom Menschen erdachter und hergestellter Werkstoff betrachtet.“⁴

2 Vgl. Mainstone 1975, 20.

3 Pfeifer u.a. 2001, 10.

4 Bechthold/Kane/King 2015, 12.



Abb. 2: Altägyptisches Lehmziegelgebäude, Amarna

„Den Mesopotamiern wie der Kultur des Indus als wird die Erfindung des gebrannten Ziegelsteins zugeschrieben.“⁵ Die ersten gebrannten Ziegel und Brennöfen stammten aus der Zeit um 4000 v. Chr. „Das rohstoffarme Süd - Mesopotamien besaß vor allem Lehm und Schilf, kaum Holz und Bausteine,“⁶ weshalb die meisten Wohnhäuser aus Lehm oder gebrannten Ziegeln errichtet wurden. Schon damals wurden dem Lehm Zuschlagstoffe, wie Heu, beigemischt, um die Schwindung besser kontrollieren zu können. Der Zikkurat von Ur (Abb. 3), errichtet um 2300 v. Chr., ist ein monumentales Beispiel für die hohe Qualität der

5 Plumridge/Meulenkaamp 1996, 10.

6 Mislin 1997, 40.

damaligen Ziegelherstellung und -verarbeitung. „Aus den Überresten des Zikkurat ist ersichtlich, daß [!] sowohl luftgetrocknete wie gebrannte Ziegel bei seinem Bau verwendet worden sind[...].“⁷ Auch in den frühen Indus - Kulturen wurde vorwiegend mit Lehm in Form von Ziegeln gebaut. „Die Städte Mahendscho Daro und Harappa besaßen [...] ausgedehnte und außerordentlich feine Wohnhäuser, die meist aus gebrannten Ziegeln gebaut waren.“⁸ Keramische Werkstoffe fanden also häufig Anwendung als tragende Bauteile in verschiedensten vertikalen Mauerwerken. Decken und Dächer wurden größtenteils aus einer Holz - Schilfkonstruktion errichtet, die mit einer Lehmschicht überdeckt waren. Man könnte dies als eine frühe Form des Verbundwerkstoffs bezeichnen, der in heutiger Form zum Beispiel als Ziegel - Beton Verbunddecke Verwendung findet.

„Die Wendung der frühsumerischen Kultur zum gebrannten, dauerhaften Ziegel, zum Gewölbekonstruktion und zur Erfindung der Keilschrift ist eine geistige Befreiung von einmaligem Rang in der Geschichte der Menschen.“⁹

Das bauliche Überbrücken von Spannweiten ist seit

7 Plumridge/Meulenkaamp 1996, 11.

8 Plumridge/Meulenkaamp 1996, 10.

9 Pfeifer u.a. 2001, 13.



Abb. 3: Zikkurat von Ur, Rekonstruktion, Irak

Anbeginn der Baugeschichte eine konstruktive Herausforderung. Je nach vorhandenem Material und Anforderungen an das Bauwerk entwickelten sich verschiedene Techniken zur Errichtung von Decken, Dächern, Öffnungen oder Brücken. Die erste Form keramischer Konstruktionen zum Überbrücken von Spannweiten stellte das Kraggewölbe (Abb. 4) dar, welches durch das versetzte Stapeln von Lehmziegeln entstand. Der Ursprung des Bogens verliert sich in den alten Kulturen entlang des Nils, Tigris und Euphrat.¹⁰ Die frühen Hochkulturen Mesopotamiens und Ägyptens erkannten, dass der Bogen eine statisch günstige Form darstellt, um im Ziegelbau anfallende Lasten abzutragen. Allen

10 Sandaker/Eggen/Cruvellier 2011, 320.

Abb. 4: Kragbogen in der Maya - Ruinenstadt Tonina, Mexiko



Mauerwerksbögen, wie Rundbogen, Parabelbogen und Spitzbogen ist gemein, dass das Eigengewicht und die Auflast zu einem Großteil in Form von Druckkräften abgetragen werden kann. „Zu Beginn des zweiten Jahrtausends scheinen Tonnengewölbe aus Lehmziegeln schon häufig in Privathäusern verwendet worden zu sein.“¹¹ In Mesopotamien fanden Gewölbe im Monumentalbau vor Christi Geburt jedoch selten Verwendung. „Es war eine billige volkstümliche Konstruktion, die Häuser der Vornehmen blieben zunächst mit den kostspieligeren Holzbalkendecken ausgestattet.“¹² Gewölbesysteme wurden schon früh für den Bau unterirdischer Kanalsysteme genutzt, wie in der mesopotami-

11 Hart 1965, 24.
12 Hart 1965, 25.

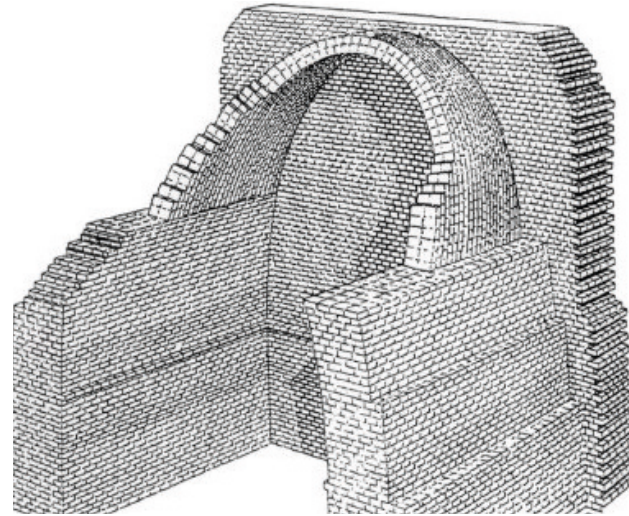


Abb. 5: Schema einer nubischen Gewölbekonstruktion

schen Stadt Ninive im heutigen Irak. Die Kanäle weisen die Form eines spitzbogigen Tonnengewölbes auf und wurden in Ringschichten aus großformatigen Ziegeln zusammengefügt. „[...] durch die Neigung der Ringschichten wird die Haftung der Ziegel in der Mörtelfuge soweit verbessert, daß [!] es keiner tragenden Gleitlehre mehr bedarf.“¹³ Eine ähnliche frühe Gewölbeform, die dem Bogen zugrunde liegt, ist das nubische Gewölbe (Abb. 5). „Bei Verwendung von rasch abbindendem Mörtel und flachen, großformatigen Ziegelformstücken war durch die Neigung der Ringschichten kein Lehrgerüst erforderlich.“¹⁴ Bei Ausgrabungen in Tell Rimah im heutigen Irak, wurden Tempelüberreste freigelegt,

13 Hart 1965, 24.
14 Mislin 1997, 40.

Abb. 6: Taq-e Kisra, Irak



die komplexe nubische Gewölbeformen enthalten. „Die Technik der freihändigen Wölbung geht [...] bis in das zweite Jahrtausend v. Chr. zurück.“¹⁵ Ein weiteres bewundernswertes Beispiel früher sassanidischer Wölbungskunst stellt der Taq-e Kisra (Abb. 6) dar, ein riesiges annähernd parabelförmiges Tonnengewölbe mit einer Höhe von 40 m. „Die eiförmige Querschnittsform ergab sich nicht aus statischen, sondern aus wölbungstechnischen Gründen als Relikt der einheimischen, freihändigen Kragwölbungstechnik.“¹⁶ Dieses Bauwerk aus gebrannten Ziegeln ist eines der wenigen Überbleibsel der Stadt Ktesiphon im Norden von Bagdad und wurde ca. 300 n. Chr. erbaut.

15 Mislin 1997, 40.
16 Mislin 1997, 151.

Abb. 7: Getreidespeicher Ramesseum, Ägypten



„Das Gewölbe ist mit 25m Spannweite die größte Tonne mit Ringschichten, die freihändig gebaut wurde.“¹⁷ Auch im alten Ägypten wurden schon früh Ziegeldecken mit Hilfe von Gewölbekonstruktionen errichtet. Jedoch verwendeten die Ägypter meist ungebrannte Steine, obwohl ihnen die Technik des Brennens bereits bekannt war. „Lehmziegel für Bogenkonstruktionen sind seit der ersten Dynastie [2965 - 2860 v. Chr.] im Grabbau nachweisbar.“¹⁸ Die Ägypter verwendeten Gewölbekonstruktionen nur in Untergeschoßen, wie zum Beispiel in den Getreidespeichern des Ramesseums (Abb. 7, ca. 1400 v. Chr.) in Form von Tonnengewölben.

17 Mislin 1997, 151.
18 Mislin 1997, 26.

Die Entstehung römischer Wölbungskunst

Durch das natürliche Vorkommen von Stein und Marmor konnten sich keramische Baustoffe in Griechenland weniger durchsetzen, als in anderen Gebieten. Ziegel wurden im Bauwesen zwar verwendet, spielten aber vor allem beim Bau von öffentlichen Gebäuden und Tempeln nur eine nebensächliche Rolle. Diese repräsentativen Bauten wurden fast ausschließlich aus Gestein errichtet. Auch keramische Gewölbekonstruktionen fanden nur wenig Verwendung. „Man nimmt an, daß [!] die Technik des Ziegelbrennens von den Griechen in das Italien der Etrusker eingeführt wurde, auch wenn die Griechen selbst wenig Verwendung für dieses Material fanden.“¹

Aufschwung und Weiterentwicklung erfahren keramische Baustoffe in Form gebrannter Ziegel in der römischen Baukunst. „In der Zeit der römischen Republik [509 - 31 v. Chr.] bestanden die meisten Bauten, besonders Privathäuser, aus luftgetrockneten Ziegeln, die außen verputzt waren.“² Durch die Eroberung der Etrusker gelangt auch Wissen über das Brennen von Ziegeln in römische Hände. Die Römer, bekannt als brillante Ingenieure und Techniker, erkannten das Potential dieses hoch druckfesten Materials. „Das Mauerwerk



Abb. 8: Pont du Gard, Frankreich

aus gebrannten Ziegeln und Mörtel begann im römischen Weltreich seit dem 1. Jh. v. Chr. den luftgetrockneten Ziegel und Werkstein im Bauwesen abzulösen.“³ Mit Hilfe des Bogens entwickelten sie effiziente Tragwerke aus Stein, gebranntem Ziegel, Gußmauerwerk oder Mischformen dieser Baustoffe. „Schon ein flüchtiger Überblick über den Denkmälerbestand läßt [!] erkennen, daß [!] keine andere Bauepoche Gewölbe in einer solchen Vielfalt von Anwendungen errichtet hat.“⁴

Die römische Baukunst brachte technische Meisterwerke, wie weitläufige Straßen- und Wasserversorgungs-

¹ Plumridge/Meulenkamp 1996, 13.

² Plumridge/Meulenkamp 1996, 14.

³ Mislin 1997, 115

⁴ Hart 1965, 32.

netze, hervor. Um auf topografische Begebenheiten eingehen zu können, beschäftigten sich die Römer intensiv mit dem Bau von Brücken und Aquädukten. Um diese riesigen Infrastrukturbauten ökonomisch zu gestalten, wurden deren Mauerwerke mit Öffnungen versehen, um den Materialverbrauch gering zu halten. Diese Öffnungen wurden mit Mauerwerksbögen überspannt. Aus der Anforderung an die Effizienz, wurden die Römer zu Meistern in der Verwendung des Bogens als statisches System und verwendeten intelligente Wölbungstechniken.

Das römische Mauerwerk

„Die Römer haben das Gewölbe zur weitgespannten Tragkonstruktion entwickelt [...]“⁵ In diesen neuen Wölbungs- und Tragwerkskonstruktionen wurden auch gebrannte Ziegel eingesetzt, wodurch sich die Anwendung keramischer Baustoffe in Tragstrukturen maßgeblich weiterentwickeln konnte.

Römische Bauwerke bestehen oft aus einer tragenden, nicht sichtbaren Mauerwerksschicht und einer sichtbaren Außenhaut. Das hatte produktionstechnische Vorteile, wie zum Beispiel die Vorfertigung von Fassadenelementen, wie Marmorplatten. „Es entwickelte sich eine systematische Trennung zwischen Konstruktions-

⁵ Hart 1965, 32.

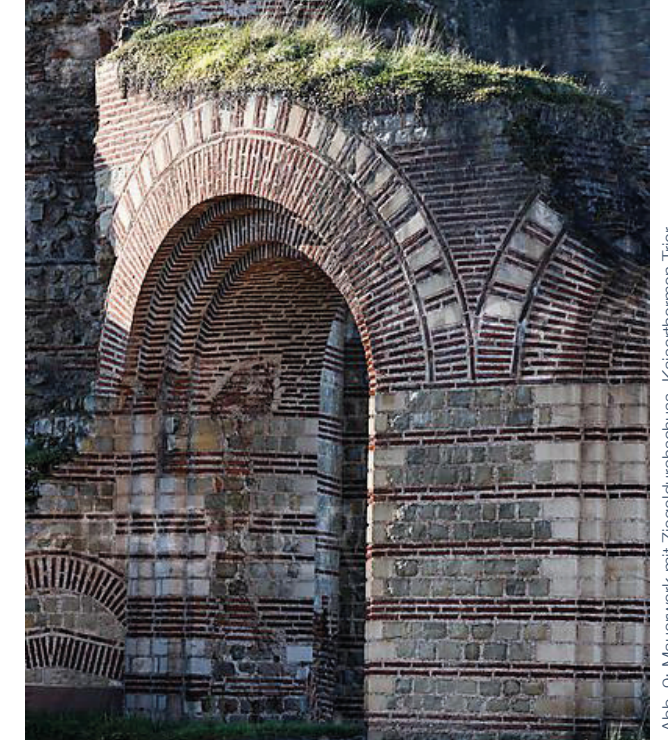


Abb. 9: Mauerwerk mit Ziegeldurchschuss, Kaiserthermen Trier

material und Verkleidungsmaterial.“⁶ Dadurch kamen die anspruchsvollen Tragwerkskonstruktionen in Form von Mauerwerken erst beim Verfall von Gebäuden zum Vorschein. Der gebrannte Ziegel kam je nach Anwendung in verschiedenen Formaten vor. Die rechteckigen, quadratischen, dreieckigen oder auch konischen Steine wurden in privaten und staatlichen Ziegeleien industriell hergestellt. Für Großprojekte wurden direkt an der Baustelle Ziegel gefertigt. Zur Überdeckung von Öffnungen wurden oft mehrere Bögen aus flachen Ziegelplatten gemauert. „Wölbungen waren aus diesem Ziegelmaterial leicht herzustellen, da durch die dünnen Ziegelplatten die keiligen Fugen nie zu weit auseinander

⁶ Pfeifer u.a. 2001, 15.



Abb. 10: Scheitrechte Bögen, Entlastungsbögen, Rom

klafften.⁴⁷ Den scheinbaren Bogen (Abb. 10) könnte man als die Weiterentwicklung des griechischen Steinbalkens bezeichnen. Um diesen horizontalen Mauerwerkssturz statisch zu unterstützen, konstruierten die Römer oft Entlastungsbögen (Abb. 10) über scheinbaren Bögen. Der gebrannte Ziegel wurde auch in Verbindung mit Naturstein in Mauerverbänden eingearbeitet. Dabei wurden meist abwechselnd Läuferschichten aus Ziegel und Stein übereinander gemauert (Abb. 9). Verbundwerkstoffe wurden bei der Herstellung von Mauerwerken gerne verwendet und stellten eine klassisch römische Bauweise dar. Auch heute werden keramische Werkstoffe gerne in Verbindung mit anderen Materialien angewendet.

7 Pfeifer u.a. 2001, 15.

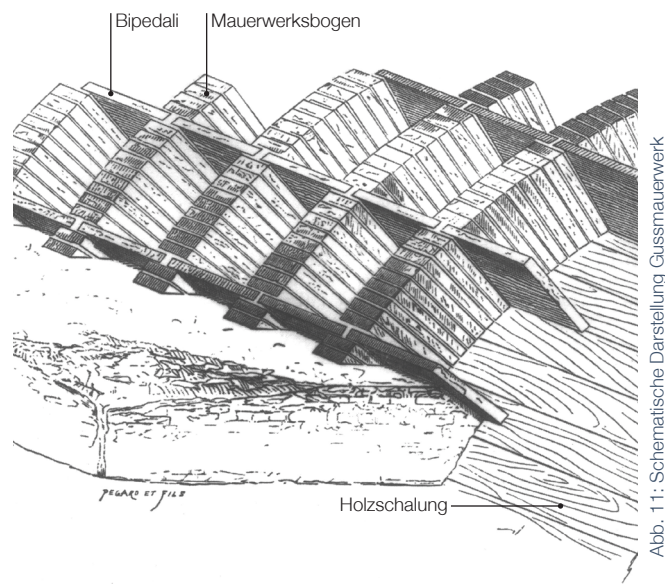


Abb. 11: Schematische Darstellung Gussmauerwerk

Egal, ob als Ziegel- oder Steinmauerwerk, die Römer waren Meister des Gewölbebaus. Sie entwickelten stets neue Wölbungstechniken und Steinformate, um immer größere Spannweiten überbrücken zu können.

Gussmauerwerk und Bipedalis

Beschäftigt man sich mit keramischen Tragstrukturen im römischen Ingenieurbau, ist eine Ausführungstechnik der Überwölbung besonders interessant. Diese Methode hängt mit der Entwicklung des römischen Gussmauerwerks (Abb. 11, 12) zusammen, und stellt eine völlig neue Form der Tragwerkskonstruktion im Wölbungsbau dar. Durch Verwendung von gebrannten Ziegeln in Verbindung mit einem Mörtelgemisch konnten größere Spannweiten denn je überbrückt werden.

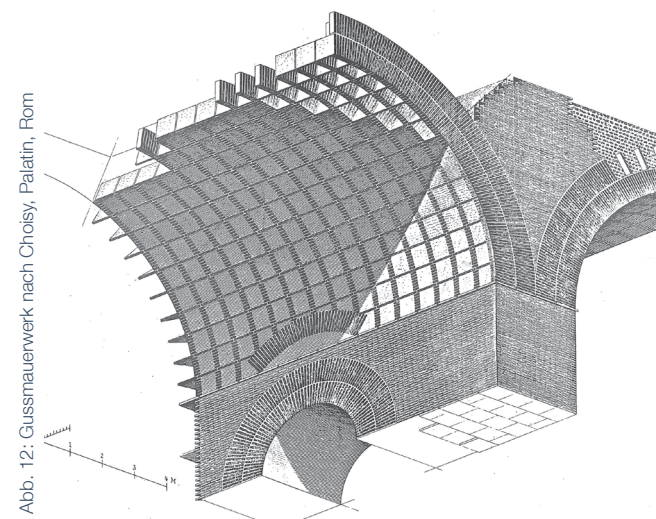


Abb. 12: Gussmauerwerk nach Choisy, Palatin, Rom

„Ein Beispiel solcher Ziegelkonstruktionen mit Verfüllung aus opus caementitum ist die Ringmauerkonstruktion des Pantheon (120 - 125 n. Chr.).“⁸ Die damals verwendete Gussmasse namens opus caementitum ist dem heutigen Beton ähnlich. Mit einer Spannweite von 43 m gilt das Pantheon als größtes, je erbautes römisches Bauwerk.⁹ Bei dieser Wölbungstechnik aus Mauerwerk und Beton wurden Ziegelrippen verwendet, die je nach Gewölbeform in dementsprechenden Bögen gemauert wurden (Abb. 11, 12).

8 Pfeifer u.a. 2001, 16.

9 Vgl. Plumridge/Meulenkamp 1996, 16.

„Sie verlaufen beim Tonnengewölbe in Ringen quer zur Gewölbeachse, beim Kreuzgewölbe entlang den Graten, bei den Kuppeln in Meridianen und bestehen aus halbierten oder gedrehten [...] Flachziegeln, hochkant auf die Schalung gestellt und in Abständen durch ganze >>Bipedali<< verbunden.“¹⁰

Bipedali sind flache Ziegelplatten, die in größeren Formaten hergestellt wurden. Das Netz aus Ziegelrippen wurde mit Hilfe einer Schalung gemauert. Danach wurden die Zwischenräume mit opus caementitum ausgefüllt. Dieses Mauerwerksskelett aus gebrannten Ziegelsteinen scheint eine Art keramische Gitterschale darzustellen, jedoch sind sich Experten über die Tragfähigkeit der Ziegelrippen nicht einig.

Auguste Choisy und Guisepe Cozzo beschäftigten sich intensiv mit der Konstruktion historischer Bauwerke und hatten unterschiedliche Auffassungen zur Rolle des Ziegels im römischen Gussmauerwerksgeölbe. „Nach Choisy wird dieses Rippennetz zunächst vollständig auf der Schalung hochgeführt und bildet nach dem Abbinden des Fugenmörtels ein tragfähiges Skelett [...]“¹¹ Cozzo beschreibt eine etwas differenzierte Vorgehensweise bei dieser Wölbungstechnik und

10 Hart 1965, 33-34.

11 Hart 1965, 34.

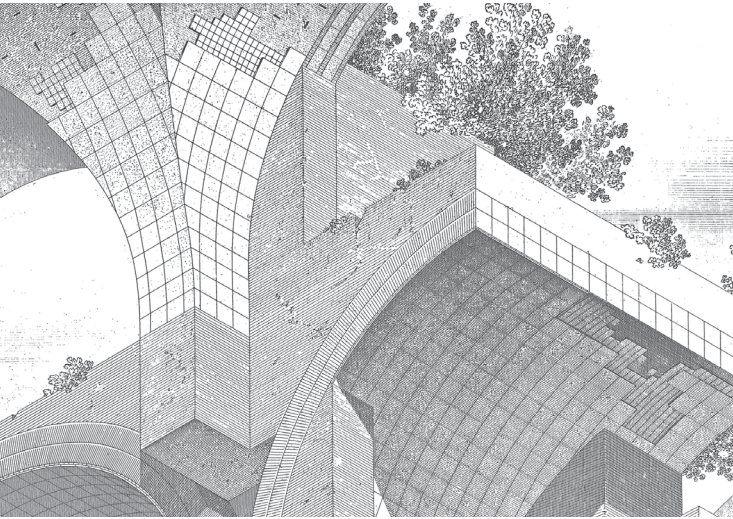


Abb. 13: Gussmauerwerk mit Flachziegelgeh nach Choisy

spricht den Ziegelrippen eine andere Aufgabe zu. „[...] nach seiner Auffassung hat das Rippensystem, gleichzeitig mit der Gußmasse [!] hochgeführt, die Aufgabe, die gleichmäßige Einbringung des Betons zu ermöglichen und [...] einen Verband herzustellen.“¹²

Weiters entwickelten die Römer eine zweite Wölbungstechnik, bei der Ziegelsteine und opus caementitium als Verbundwerkstoff zum Einsatz kamen. Auch hier wurden Bipedali verwendet, die flach in zwei Schichten, gegeneinander versetzt, auf ein Lehrgerüst verlegt wurden. Darauf kam noch eine Schicht flacher Ziegelplatten kleinerer Formate (Abb. 13). Diese Art des Mauerwerks

¹² Hart 1965, 34.



Abb. 14: Maxentiusbasilika, Rom

erinnert stark an das katalanische Flachziegelgewölbe. Auf diesen Aufbau aus dünnen Ziegelschichten wurde, wie beim Gussmauerwerk mit Rippen, Betonmasse gegossen. Wie man am Beispiel der Maxentiusbasilika (Abb. 14) und Caracalla - Thermen erkennen kann, waren die Römer mit diesen Wölbungstechniken im Stande, komplexe und weit gespannte Gewölbestructuren zu bauen. Doch auch die hohen räumlichen Ansprüche, die sie an ihre Bauwerke stellten, führten immer wieder zur Weiterentwicklung ihrer Techniken und Konstruktionen. Durch den Wunsch nach natürlicher Belichtung begannen die Römer ihre Überwölbungen, an statisch günstigen Stellen, mit Öffnungen zu versehen. Die römischen Thermen, die hohe räumliche Qualitäten

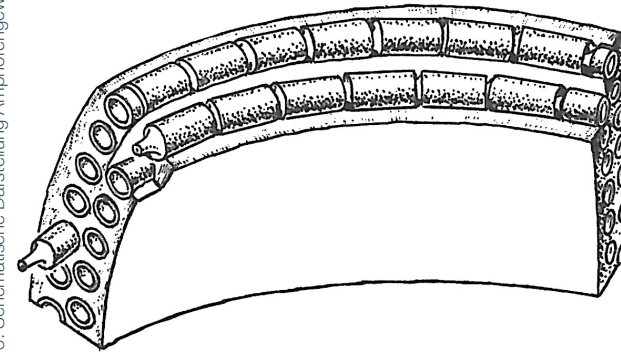


Abb. 15: Schematische Darstellung Amphorengewölbe

besitzen, waren an diesen technischen Entwicklungen im Wölbungsbau maßgeblich beteiligt. „Vom 4. Jh. ab wird das Gußgewölbe [!] verdrängt durch das leichtere Ziegelgewölbe - ein frühes bekanntes Beispiel ist das Mausoleum im Diokletianspalast in Split.“¹³

¹³ Hart 1965, 39.



Abb. 16: San Vitale, Ravenna

Amphorengewölbe

Eine Ableitung des Ziegelgewölbes ist das Amphorengewölbe (Abb. 15). Diese Konstruktion besteht aus konisch zulaufenden gebrannten Tonröhren oder Tontöpfen. „Sie wurden ineinander geschoben und in doppelter Reihung in immer enger werdenden horizontalen Ringen übereinander eingebracht und eingegossen.“¹⁴ Durch die Verwendung solcher Hohlkörper wird das Eigengewicht der Konstruktion verringert, wodurch die Auflager weniger stark belastet werden. In Ravenna wurden die Kuppeln von San Vitale (Abb. 16) und das Baptisterium anhand dieser Technik errichtet.

¹⁴ Bender 1991, 75

Das römische Erbe

Auch im byzantinischen Reich spielten keramische Werkstoffe eine wichtige Rolle und sind unzertrennlich mit der Baugeschichte dieser Kultur verbunden. Durch die Verlagerung des römischen Reiches nach Osten erbt Byzanz viele der technischen, römischen Errungenschaften im Wölbungsbaue. „Am 11. Mai 330 n. Chr. fand die Einweihungsfeier Konstantinopels als neue Hauptstadt des Römischen Reiches statt.“¹ Vor allem in Konstantinopel entwickelte sich eine reichhaltige Ziegelarchitektur, die mit ihren Kuppelbauten eine Grundform des byzantinischen Architekturstils darstellt.

Beim Errichten einer Mauer wurde eine Konstruktion aus Bruchstein in Verbindung mit Ziegeln gewählt (Abb. 17). Es handelte sich um ein zweischaliges Mauerwerk, dessen Kern mit Schutt und Mörtel ausgefüllt wurde. Die Außenmauern bestanden aus Bruchsteinmauerwerk, das in regelmäßigen Abständen durch mehrere Reihen Ziegelverband unterbrochen war.² Diese Art des Verbundmauerwerks weist starke Ähnlichkeiten zur römischen Mauerwerkskonstruktion auf. Konstruktive horizontale Elemente, wie Decken, bestanden in den meisten Fällen aus Gewölbekonstruktionen. „Bogen, Gewölbe und Kuppel wurden, [...] wie z. B. bei der Sophienkirche, ausschließlich aus Ziegeln errichtet.“³

1 Mislin 1997, 135
2 Vgl. Mango 1975, 11
3 Mislin 1997, 139



Abb. 17: Verbundmauerwerk, Hagia Sophia, Iznik, Türkei

Auch hier gibt es Parallelen zum römischen Gewölbekonstruktion. Bei Gewölbekonstruktionen mit großen Spannweiten wurde die Ziegelgröße gegenüber dem Standardmaß verdoppelt, was an die Verwendung von Bipedales im römischen Gussmauerwerk erinnert. In der byzantinischen Baugeschichte kommen auch Gebäude vor, die ausnahmslos aus Ziegeln gebaut wurden, wie zum Beispiel die Basilika Maria Chalkoprateia.⁴

4 Vgl. Mango 1975, 11

Die Pendentifkuppel

Die Kuppel als raumüberspannendes Tragwerk war ein häufig verwendetes Motiv in der byzantinischen Architektur. Auch die Römer bauten Kuppeln im großen Stil, wie zum Beispiel das Pantheon. Diese Kuppelbauten hatten im Grundriss eine runde Form, die sich aus konstruktiven Gründen dem Kreis des Kuppelfußes anpassten. In Byzanz wurde die Kuppel über quadratischem Grundriss zu einem weit verbreiteten Motiv, auf welches sich auch die byzantinische Kuppelkirche bezog. Das bekannteste Beispiel solcher Sakralbauten stellt die Hagia Sophia in Konstantinopel dar. Diese Form der Kuppel über einem quadratischen Raum trägt auch einen symbolischen Wert in sich. „Die geometrischen Formen von Kubus und Kugel gewinnen hier [Hagia Sophia - Anm. d. Verf.] die symbolische Bedeutung von Himmelszelt und Weltherrschaft.“⁵ Um konstruktiv eine Kuppel auf ein Quadrat setzen zu können, beschäftigten sich die Byzantiner intensiv mit dem Übergang von eckigem Grundriss zu rundem Kuppelfuß. Die konstruktive Herausforderung war, ein tragfähiges Auflager und einen geometrisch stimmigen Anschluss für die Kuppel zu schaffen. Dieses Problem wurde auf mehrere Arten konstruktiv und geometrisch gelöst. Die wohl statisch günstigste und formal ästhetischste Form ist das Pendentif. Dabei handelt es sich

5 Hart 1965, 40.

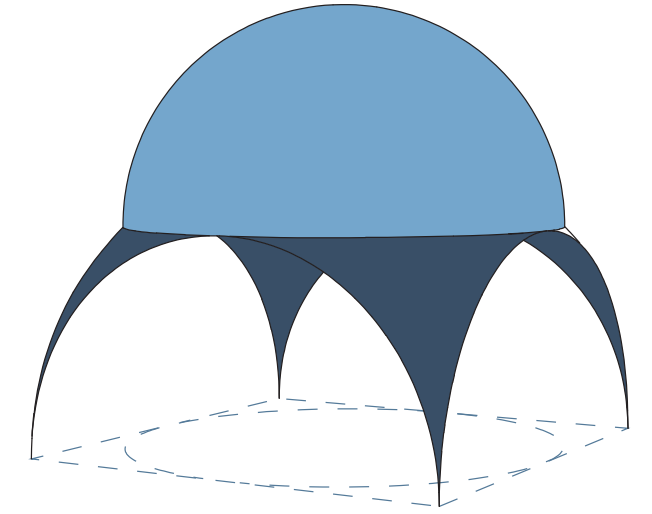
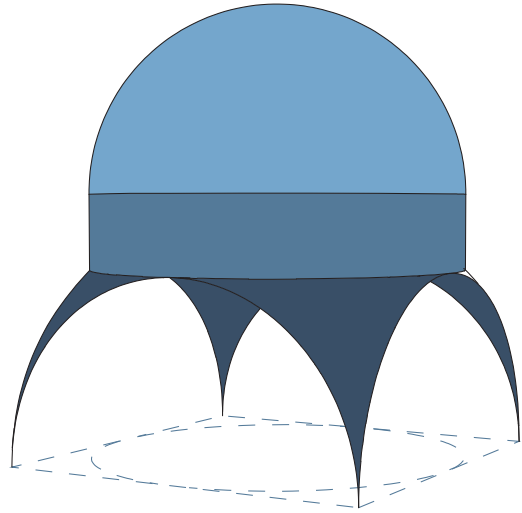


Abb. 18: Geometrie einer Pendentifkuppel

um ein sphärisches Dreieck, das den Zwickel zwischen Ecke und darüber liegenden Kreis darstellt. Dies ist eine konstruktive Errungenschaft, die „den Baumeistern ermöglichte, eine gleichwie geformte Grundfläche zu überkuppeln.“⁶ Die daraus entstandene Pendentifkuppel (Abb. 18) wurde von den Byzantinern vor allem im Sakralbau angewendet und zum weitspannenden Tragwerk entwickelt.

In den byzantinischen Kuppelkirchen spielte die Lichtführung, vor allem Oberlicht, eine wichtige Rolle. Das führte zu den ersten Kuppelkonstruktionen, die großzügige natürliche Belichtung schaffen konnten. Dafür

6 Plumridge/Meulenkamp 1996, 18.



wurde die Pendentivkuppel oft in Verbindung mit einem Tambour (Abb. 19) errichtet. Bei dieser Konstruktion wird ein zylindrischer Ring zwischen Pendentif und Kuppel eingeschoben. Dieser Ring wurde meist rundherum mit Öffnungen versehen. So wurde mit dem Tambour auf intelligente Weise Oberlicht erzeugt, da es statisch und konstruktiv einfacher ist, ein vertikales Mauerwerk mit Öffnungen zu versehen als in einem Kuppelmauerwerk. In Byzanz bekam der Kuppelbau einen nie zuvor erreichten Stellenwert, wodurch auch der Ziegel als keramischer Baustoff in der Tragwerkskonstruktion einen Höhepunkt erreichte.

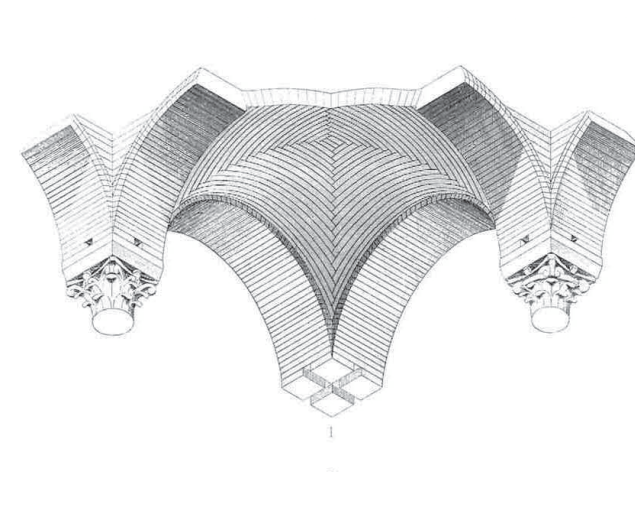


Abb. 20: Byzantinische Gewölbekonstruktion nach Choisy

Byzantinische Wölbungstechniken

„Das byzantinische Gewölbe hat im Wesentlichen drei Formen: Das Tonnengewölbe, das Domikalgewölbe und das Kreuzgewölbe.“⁷ Durch geschickte Wölbungstechniken konnte in den meisten Fällen auf ein Lehrgerüst verzichtet werden. Beim Tonnengewölbe wurden mit Hilfe von rasch abbindendem Gipsmörtel schräge Ringschichten von beiden Seiten übereinander gemauert bis sich die beiden Enden der Konstruktion in der Mitte trafen. Durch den schnell trocknenden Mörtel war es möglich, sofort eine neue Lage auf die fertige Ringschicht zu kleben, jedoch mussten die Maurer rasch

7 Mango 1975, 12



Abb. 21: Mauerwerk, Pendentivkuppel, Istanbul

arbeiten.⁸ Die Byzantiner entwickelten auch neue Gewölbeformen, vor allem durch neue Interpretationen des Kreuzgewölbes. Das römische Kreuzgewölbe entstand durch die Durchdringung zweier Tonnen, wobei das byzantinische Kreuzgewölbe (Abb. 20) aus einer Zusammensetzung einzelner Segmente gebildet wurde. Die Römer hatten das Problem, dass die horizontalen Scheitel in ihren Kreuzgewölben durch Setzung oft zu Rissbildungen neigten. Bei der byzantinischen Bauweise wird dieses Problem durch steigende Scheitel der Kappen vermieden. So entsteht ein Kreuzgewölbe mit Busung.⁹

8 Vgl. Mango 1975, 13-14

9 Vgl. Mislin 1997, 142

Eine besondere Form der Kuppelkonstruktion stellt die Rippenkuppel dar, welche beim Bau der zweiten Kuppel der Hagia Sophia verwendet wurde (Abb. 22). Eine Rippenkuppel besteht aus einer Mauerwerksschale, in die Bogenrippen eingemauert werden. Diese Rippen weisen einen größeren Querschnitt als die übrige Schale auf. Durch diese Konstruktion war es erstmals möglich, eine größere Anzahl von Öffnungen in einer Kuppel zu platzieren. Die Fenster wurden zwischen den Rippen direkt über den Kuppelfuß gesetzt und trugen zur Verringerung der Kuppelmasse bei. Die Mauerbögen über den Fenstern konnten den Druck der darüber liegenden Mauermaße in die Rippen ableiten. Die dünnwandige Kuppelschale ist nur tragfähig durch die vorstehenden Mauerrippen, die ihr die notwendige Festigkeit geben.¹⁰

10 Vgl. Mislin 1997, 147.



Abb. 22: Rippenkuppel, Hagia Sophia, Istanbul



Abb. 23: Hagia Sophia, Istanbul

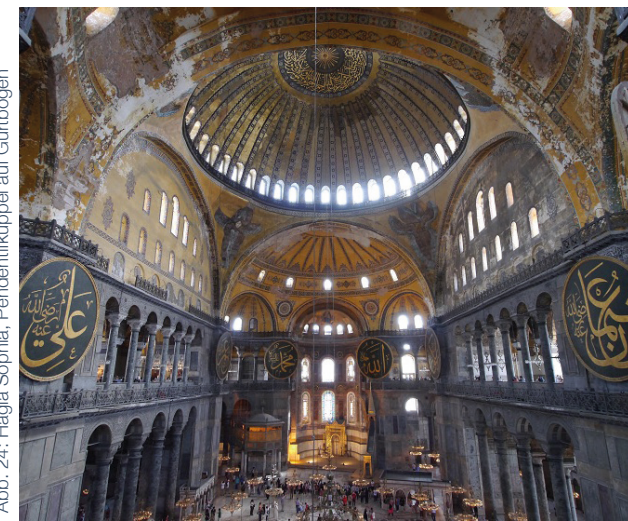


Abb. 24: Hagia Sophia, Pendentivkuppel auf Gurtbögen

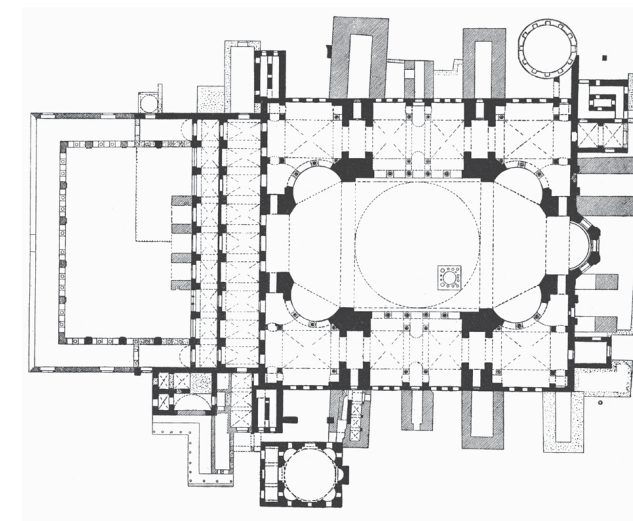


Abb. 25: Hagia Sophia, Grundriss

Die Hagia Sophia

Die Hagia Sophia ist wohl das bekannteste und bedeutendste Beispiel byzantinischer Architektur. „Beim Hagia-Sophia-Bau in Konstantinopel kommt eine neue, alles Vorausgehende hinter sich lassende Wölbungstechnik und Konstruktion zur Ausführung, die eine eigene Bautradition begründet.“¹¹ Das Ziegelmauerwerk der riesigen Pendentivkuppel ist ein herausragendes Beispiel keramischer Tragwerkskonstruktion.

Die Herausforderung beim Bau der Hagia Sophia lag vor allem in den riesigen Dimensionen des Gebäudes. Die zentrale Kuppel mit einer Spannweite von 30 m sollte

¹¹ Mislin 1997, 135.

nicht auf massiven Mauern liegen, sondern in der Luft hängen.¹² Um diese Wirkung zu erzielen, setzten die Baumeister die riesige Kuppel mit Hilfe von Pendentifs auf vier Tragbögen. „Weil die Kuppel von vier Gurtbögen getragen wurde, mußten [!] dieselben in Richtung des jeweiligen Bogenschubes und quer zum Bogen in Richtung des Kuppelschubes möglichst steif sein und die auftretenden Horizontalkräfte abtragen können.“¹³ In Längsrichtung wird die Schubkraft der Kuppel in die anschließenden Halbkuppeln weitergegeben, von wo aus sie in den Pfeilern seitlich der Apsis und den Pfei-

¹² Vgl. Mango 1975, 110.

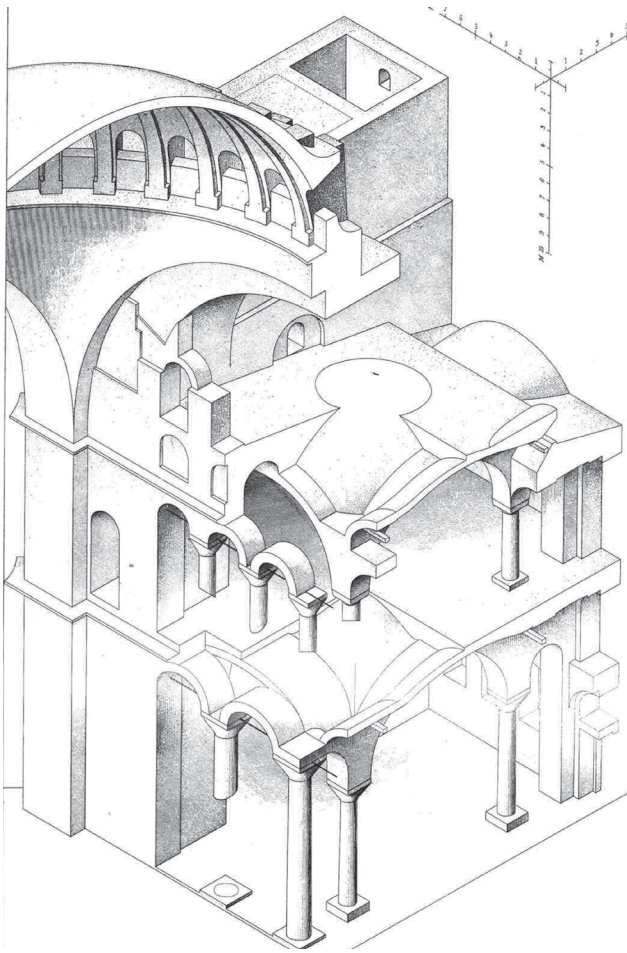
¹³ Jesberg 1996, 32.

lern am Haupteingang abgetragen wird. In Querrichtung fehlt eine solche Absteifung, wodurch die Längs- und Schildbögen stark verbreitert ausgeführt sind. Zum Abtragen des Bogenschubes in Querrichtung sind die Bogenpfeiler über jeweils zwei Wandscheiben mit den außenliegenden Strebpfeilern verbunden. In Längsrichtung sind solche Mauerwerke nicht vorhanden, stattdessen wurden hier die Bogenpfeiler ungefähr doppelt so stark dimensioniert.

Nach wenigen Jahren wurde die zentrale Kuppel durch ein Erdbeben schwer beschädigt und stürzte ein. Die zweite Kuppelkonstruktion weist eine stärkere Wölbung auf und ist um 6 m höher als die erste, wodurch

sie auch einen geringeren Schub ausübt. Zusätzlich wurden nach dem Einsturz die Schildbögen verstärkt.¹⁴ Leider gibt es nicht viele Informationen über die Primärform der Hagia Sophia, doch vom ursprünglichen Charakter des Gebäudes scheint heute nicht mehr viel übrig zu sein. In alten Überlieferungen wird der zentrale überkuppelte Raum oft als lichtdurchflutet beschrieben, wogegen heute eine geheimnisvolle halbdunkle Lichtstimmung herrscht. Es wird vermutet, dass diese Änderung durch das Vermauern von Fenstern entstanden ist.

¹⁴ Vgl. Hart 1965, 42.

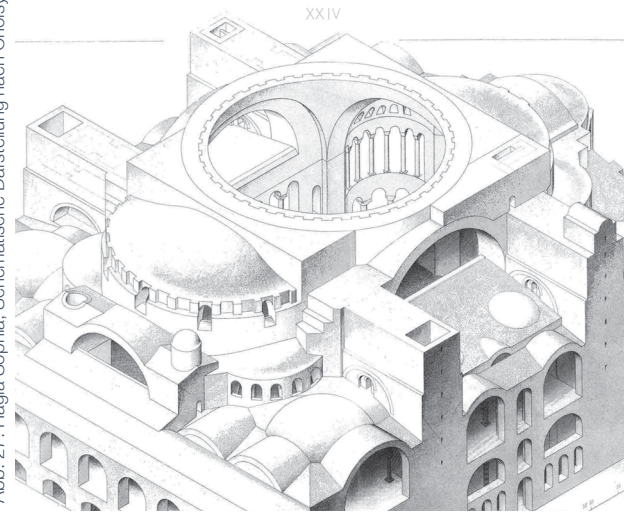


Um immer wieder auftretenden Bauschäden entgegenzuwirken, verstärkte man das Mauerwerk, indem man schwächende Elemente, wie Öffnungen und Lünetten ausmauerte. Es gibt Vermutungen, dass die Bogenfeldmauern ursprünglich mit riesigen Fenstern versehen waren, und das eintretende Licht in den reichhaltigen Mosaiken gespiegelt wurde.¹⁵

Die zweite Kuppel der Hagia Sophia wurde als Rippenkuppel errichtet. Sie besteht aus 40 Mauerrippen in Form von Bögen, die am Kuppelfuß deutlich hervorragen und in Richtung des Scheitels allmählich in der Kuppelschale verschwinden. Direkt über dem Kuppelfuß wurden die Bereiche zwischen den Rippen mit Öffnungen versehen. „Die Anordnung von meridianen Rippen in der Kuppelkalotte läßt [!] den Baumeister mit einem geringeren Kuppelgewicht auskommen und ermöglicht einen Fensterkranz über dem Fuß der Kuppel.“¹⁶ Eine weitere Herausforderung beim Bau der Kuppel war die Schalungskonstruktion, denn Holz war zu dieser Zeit aufgrund des Kahlschlags in der Region sehr teuer. So musste man mit einem Minimum an Holz auskommen, das bei dem riesigen Ausmaß der Kuppel ein Problem darstellte. Beim Kuppelbau benötigte man nur für die Bogenrippen eine Schalungskonstruktion. Es wurde nur ein Gerüst mit Schalung verwendet,

¹⁵ Vgl. Mango 1975, 110.

¹⁶ Jesberg 1996, 32.



auf dem die Rippen einzeln nacheinander aufgemauert wurden. Nach Fertigstellung eines Bogens wurde das Schalungsgerüst auf der Ebene des Kreisbogens unter dem Kuppelfuß einfach in die Position der nächsten Rippe weitergedreht.¹⁷

Die Hagia Sophia zeigt jedoch auch, dass den Baumeistern zu dieser Zeit noch nicht die technischen Mittel und Fähigkeiten zu Verfügung standen, um ein solch komplexes Gebäude in dieser Größe ohne konstruktive Mängel zu errichten. Auch die ursprünglich kurze Bauzeit kann ein Grund für die immer wieder auftretenden Bauschäden gewesen sein. Durch die resultierenden

¹⁷ Vgl. Jesberg 1996, 33-34.



Umbau- und Ausbesserungsarbeiten musste sich die Hagia Sophia in ihrer Gestalt einem ständigen Wandel unterziehen. Mit ihren vielen technischen Meisterleistungen ist die Hagia Sophia jedoch ein Paradebeispiel keramischer Tragwerkskonstruktion. Vor allem die Kuppel beweist, dass es möglich ist, ein weit spannendes Ziegelgewölbe zu errichten, dessen Ästhetik in der Leichtigkeit der Konstruktion liegt. Sie ist noch immer die weltweit größte Mauerwerkskuppel, die als reine Ziegelkonstruktion erbaut wurde.

1.4 Tragend oder nicht tragend

Das gotische Gewölbe und die Aufgabe der Rippe

Entstehung des Kreuzrippengewölbes

„Nach den konstruktiven Leistungen in der Antike erreichte die Bautechnik im Mittelalter beim Bau der gotischen Kathedralen einen neuen Höhepunkt.“¹ Zu dieser Zeit nahm auch ein wachsendes Verständnis für Mathematik und Geometrie Einzug in Europa, wodurch eine Synthese aus Trag- und Raumstruktur entstehen konnte. Der Wölbungsbaue während der Gotik war bestimmt durch die Entstehung und Fortentwicklung des Kreuzrippengewölbes. Das gotische Kreuzrippengewölbe stellte eine Weiterentwicklung des römischen Kreuzgewölbes dar, das durch die Durchdringung zweier Tonnen entstand. Wo oder von wem dieser Gewölbestil erfunden wurde, kann in dieser Form nicht beantwortet werden. Er entstand wahrscheinlich durch Austausch architektonischen Wissens über einen langen Zeitraum in Mittel- und Westeuropa. Eine einheitliche Gestalt des Kreuzrippengewölbes ist erst im 13. Jhd. festzustellen.²

¹ Mislin 1997, 224.

² Vgl. Nußbaum/Lepsky 1999, 23-24.

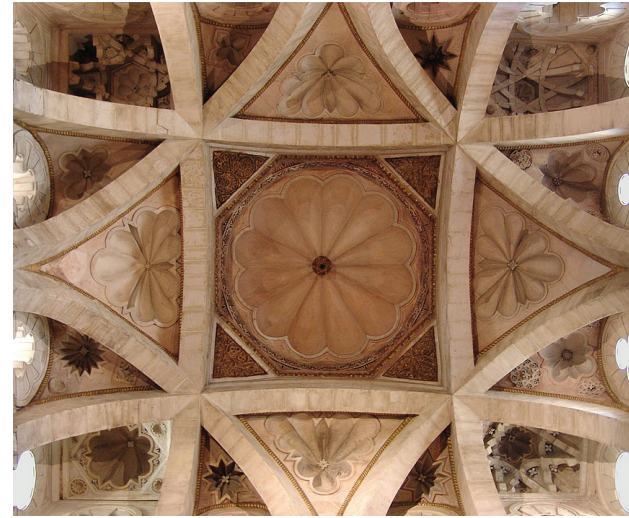


Abb. 29: Kuppel der Capilla de Villaviciosa, Córdoba, Spanien

Frühe Formen des Kreuzrippengewölbes

Die ersten europäischen Rippengewölbe wurden in der Lombardei ab dem späten 11. Jhd. aus Backstein gebaut. Diese Bauwerke wurden wahrscheinlich durch römische und byzantinische Gewölbebauten beeinflusst, deren Kuppeln oft als Rippenkonstruktionen ausgeführt waren. Auch im maurischen Spanien entstanden bereits im 10. Jhd. Kuppeln mit teilweise komplexen Rippenformationen, wie zum Beispiel im Erweiterungsbau der Hauptmoschee von Córdoba (Abb. 29). Schließlich waren es lombardische Architekten, die solche Mauerrippen unter die Grate von Kreuzgewölben spannten, wie es bei den Kirchen San Nazaro und San Ambrogio (Abb. 30) der Fall ist.



Abb. 30: Basilika San Ambrogio, Mailand

Bei diesem vorgotischen Wölbungsstil kommen zum ersten Mal Bögen und Kreuzrippen in Form von Spitzbögen vor.³ „Für die in der Gotik wachsende Einheit der als Wandgerüst fungierenden Dienste mit den Gurt- und Schildbögen des Gewölbes war der Spitzbogen [...] ein ideales Bauelement, das überdies erhebliche statische Vorteile gegenüber dem Rundbogen bietet.“⁴ Beim Spitzbogen liegt der Scheitel bei gleicher Spannweite höher als beim Rundbogen, wodurch er sich besser an den Verlauf der Drucklinie anpasst. Die Form des Spitzbogens liegt außerdem näher an der Krümmung der umgekehrten Kettenlinie. Besonders am normannischen Festland, unter ande-

³ Vgl. Nußbaum/Lepsky 1999, 24-26.

⁴ Nußbaum/Lepsky 1999, 35.



Abb. 31: Sechsteiliges Gewölbe, Kathedrale von St. Étienne

Das gotische Kreuzrippengewölbe

rem in der Normandie, entstanden im frühen 12. Jhd. Kirchenbauten mit Kreuzrippengewölben. In dieser Region entwickelte sich ein fließender Übergang von Rippe und Dienst, der sich immer weiter verbreitete, und das romanische Verständnis von Stützwand und lastender Decke ersetzte. Weitgespannte Überwölbungen wurden im frühgotischen Frankreich, in den meisten Fällen mit Hilfe von sechsteiligen Rippengewölben, gebaut. Auch diese Bauform entstammt der Normandie und war prägend für den Kirchenbau der Frühgotik wie zum Beispiel St. - Trinité und St. - Étienne (Abb. 31).



Abb. 32: Abteikirche St. Denis, Frankreich

Bei einigen dieser frühen Rippengewölbe werden den Rippen auch konstruktive Eigenschaften zugesprochen. Bei diesen Gewölbekonstruktionen binden die Rippensteine vollständig durch das Kappenmauerwerk hindurch und verjüngen sich zum Rippenrücken in Form einer gestuften Rippenschulter. Auf dieser liegt das Mauerwerk der Kappen und es entsteht ein kraftschlüssiger Verband.⁵

Diese baulichen Errungenschaften gelangten in südlichere Gebiete Frankreichs, wo das gotische Rippengewölbe aus einem Bauboom heraus perfektioniert wurde und sich in ganz Europa durchsetzte. In vielen Teilen Frankreichs war jedoch noch die Holzdecke eine weit

⁵ Vgl. Nußbaum/Lepsky 1999, 35-42.



Abb. 33: Querhauskonche, Kathedrale Nyon, Frankreich

verbreitete Konstruktionstechnik, die vor allem dünne Wandstärken und große Öffnungen ermöglichte. Diese Eigenschaften versuchte man auf die Gewölbekonstruktion zu übertragen, woraus sich die dünnschalige Wandstruktur der Gotik entwickelte. Man erkennt in den Bauten dieser Zeit den Willen, alle konstruktiv verzichtbaren Flächen in Fenster zu verwandeln, um weg zu kommen vom schweren romanischen Stil hin zum leichten Steinskelett der Gotik. Ein Beispiel für diesen Prozess stellt die Abteikirche von St-Denis (Abb. 32) dar. Durch das Bestreben nach mehr Licht, dehnten sich die Fensterflächen immer weiter nach oben in die Gewölbezone aus (Abb. 33).⁶

⁶ Vgl. Nußbaum/Lepsky 1999, 43-52.

Gewölbekonstruktion

In der Gotik entstand ein wachsendes ökonomisches Bewusstsein, das sich auch in den bautechnischen Aspekten widerspiegelt. „Vor diesem Hintergrund wurde der gotische Bogen zu einem sehr zweckmäßigen Bausystem entwickelt, das alle Eigenschaften einer modernen Typenbauweise enthielt.“⁷ Vorfertigung, Stapelbarkeit, Rasterstruktur, Minimierung von Gerüstbau, Bauzeit, Preis, Erweiterbarkeit, Veränderbarkeit und Variationsmöglichkeit spielten schon in der Planung eine große Rolle. Durch diese Bauweise konnte dasselbe Tragsystem für unterschiedlich komplexe Bauaufgaben verwendet werden. Es wurde nur in seinen Grundzügen geringfügig verändert. Die Querschnitte von Säulen und Rippen waren meist einheitlich, wodurch eine Vorfertigung oder gar eine Serienfertigung möglich war. Diese Fertigteile wurden oft im Winter in den Dombauhütten gefertigt, wenn es auf den Baustellen für Arbeiten zu kalt war.⁸

Beim Bau einer Kathedrale wurden die Seitenschiffgewölbe mittels Zuganker in den Gurten gesichert. Diese wurden erst nach Fertigstellung der Kathedrale entfernt. Die Hochschiffwände, welche mit ihren Strebepfeilern ein in sich stabiles System bildeten, wurden mit

⁷ Jesberg 1996, 38.

⁸ Vgl. Jesberg 1996, 38.

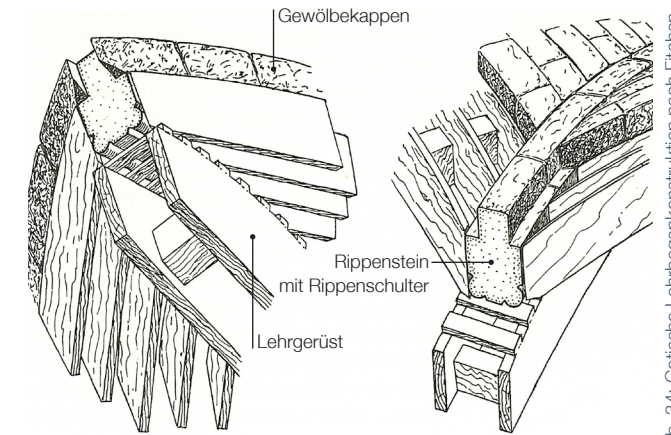


Abb. 34: Gotische Lehrbogenkonstruktion nach Fitchen

den Binderbalken zu einer Art Rahmen verbunden.⁹ Häufig wurden vor Beginn des Gewölbebaus die Widerlager der Bögen mit Zugankern gesichert. In vielen Fällen dienten sie als temporäre Hilfskonstruktion, die während des Baus Horizontalkräfte in den Bogenstellungen neutralisierten. War das statische System fertiggestellt, und eine ausreichende Auflast verhinderte das Ausweichen der Widerlager, wurden die Zuganker wieder entfernt.

Nachdem die Widerlager fixiert wurden, montierte man die Lehrgerüste (Abb. 34) für die Gewölbebögen. Nun wurden die, meist vorgefertigten, Rippensteine auf dem Rücken des Lehrgerüsts verlegt, wobei zuerst der Schlussstein gesetzt und fixiert wurde. Auf diese Weise konnte man verhindern, dass der Bogen später durch

⁹ Vgl. Hart 1965, 55-56.

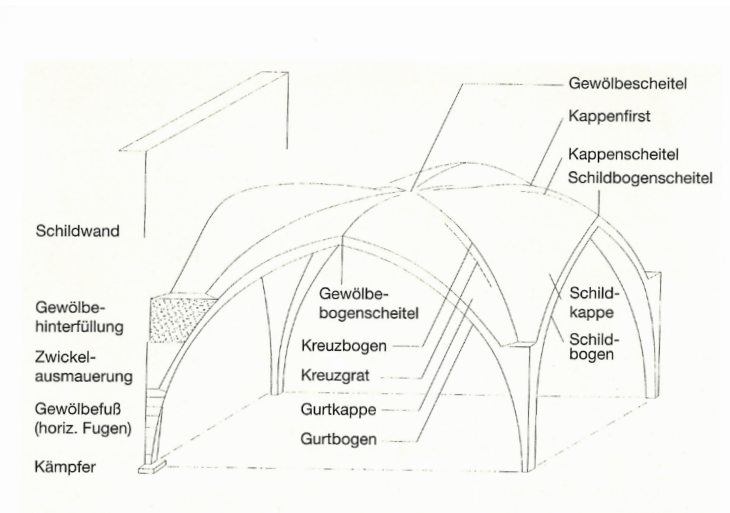


Abb. 35: Gestalt und Funktion des Kreuzgewölbes

Bei der Auseinandersetzung mit den bautechnischen Aspekten der Gotik war die Funktion der Gewölberippe schon immer eines der wichtigsten Themen. Über die Frage, ob die Rippen die alleinige statische Struktur darstellen, ob sie das Tragwerk lediglich unterstützen oder ob sie eine reine Form der Dekoration sind, wurde über Jahrhunderte diskutiert. „So bildet die Frage nach der statischen Aufgabe der Rippe den Kern der Diskussion um die Stilmittel und Formmittel der Gotik schlechthin.“¹¹

Bis zum Ende des 19. Jhdt.s wurde den Rippen in der Forschung eine tragende Wirkung zugeschrieben. Doch ab dem 20. Jhdt erscheinen immer wieder Thesen, welche dieser vorherrschenden Meinung widersprachen. Durch technische Weiterentwicklung und moderne Forschungsmethoden wurde die Tragfähigkeit der Rippen immer wieder neu bewertet. Schlussendlich besagt die bis heute gültige Theorie, dass Kreuzrippen standfeste Bögen darstellen, zur Lastabtragung der Kappen aber nur wenig beitragen. Das Tragverhalten des Kreuzrippengewölbes wird somit durch die Rippendstruktur nicht wesentlich verbessert.¹²

¹¹ Nußbaum/Lepsky 1999, 60.
¹² Vgl. Nußbaum/Lepsky 1999, 60-62.

den Druck der Rippen im Scheitel angehoben oder gar gesprengt wurde. Danach wurden die restlichen Steine zwischen Schlussstein und Bogenschenkel eingeschoben. In manchen Fällen waren die Keilsteine sogar über Eisen- oder Holzstifte miteinander verdübelt. Um eine Verformung der frisch versetzten Bögen beim Mauern der Kappen zu verhindern, blieben die Lehrgerüste stehen, bis das Gewölbe vollständig geschlossen war. In der Neugotik wurden die Lehrgerüste unter den Gewölbebögen nach Fertigstellung des Mauerwerks gesenkt. So wollte man in dem, noch nicht ausgehärteten, Fugenmörtel eine Druckspannung erzeugen. In diesem Zustand ließ man den Mörtel vollständig aushärten.¹⁰

¹⁰ Vgl. Nußbaum/Lepsky 1999, 58-60.

Die Backsteingotik

Doch welche Rolle spielten keramische Baustoffe in den Tragwerken gotischer Gewölbebauten? Grundsätzlich war das mittelalterliche Bauwesen geprägt vom Naturstein. Aber im Norden Europas, vor allem in Deutschland, konnte sich der gebrannte Ziegel im Bauwesen durchsetzen. „Die erste zusammenhängende Gruppe von Bauten, mit der Deutschland hervortritt, sind die Kirchen der norddeutschen Backsteingotik.“¹³ Ihre Anfänge fand diese Bauweise im 12. Jhdt. dort wo das Vorkommen an Naturstein stark begrenzt und das teure Einführen solcher Steine nicht leistbar war. „Im Falle der Ordensgotik handelte es sich um den Beschluß [!] der Deutschordensritter, das Land im Osten zu erobern und mit Bauwerken zu überziehen - angesichts des Mangels an Haustein stand vor allem der Backstein zur Verfügung.“¹⁴

Die Technik des Ziegelbrennens wurde über mehrere Phasen aus Italien übernommen. Die Methode des Ziegelstreichens war dabei die am meisten verbreitete Methode. Außerdem war bei der Herstellung von Ziegeln eine breite Variation in der Farbgebung möglich. Es wurden sowohl farbige als auch glasierte Steine gebrannt. Diese Möglichkeit der Farbgebung bot ei-

¹³ Hart 1965, 67.
¹⁴ Pfefferkorn 1984, 15.



Abb. 36: Ziegelformstein

nen wesentlichen Vorteil gegenüber dem Haustein. Formsteine traten bereits in der romanischen Zeit auf, jedoch nur in Zylinderform. Mit der Zeit vermehrte sich die Profilformen und auch Formsteine (Abb. 36, 38) für Rosetten oder Friese wurden hergestellt.¹⁵

Eines der bekanntesten und einflussreichsten Beispiele der Backsteingotik ist die Marienkirche in Lübeck (Abb. 37). Der Bau der Kirche geht bis auf das Jahr 1163 zurück. Der Halle wurden ein Cathedralchor und fünf Umgebungskapellen angefügt, wodurch das Mittelschiff nicht mehr angemessen groß proportioniert erschien. Daraufhin wurde 1310 ein neues Langhaus mit den rie-

¹⁵ Vgl. Pfefferkorn 1984, 20-21.



sigen Ausmaßen von 80 m Länge, 32 m Breite und 38 m Höhe errichtet. Dieser Bau stellte ein gewagtes Unternehmen dar, wurden bis zu dieser Zeit Bauten dieser Ausmaße stets aus Werkstein realisiert. Das Bauen mit Backstein ließ keine Verzahnung der Steine durch verschiedene Steinschnitte zu. Bögen und Pfeiler sind ohne jeglichen Dekor ausgeführt. Sie stellen rein funktionale Elemente dar.¹⁶

In der Lübecker Marienkirche ist jedoch auch zu sehen, dass die Backsteinkonstruktion noch nicht vollständig ausgereift war. Der zuvor meist in Stein errichtete Gerippebau war mit dem Ziegel schwer zu realisieren. Das spiegelt sich auch in den Zugankern der Marienkirche

¹⁶ Vgl. Kamphausen 1978, 33-35.

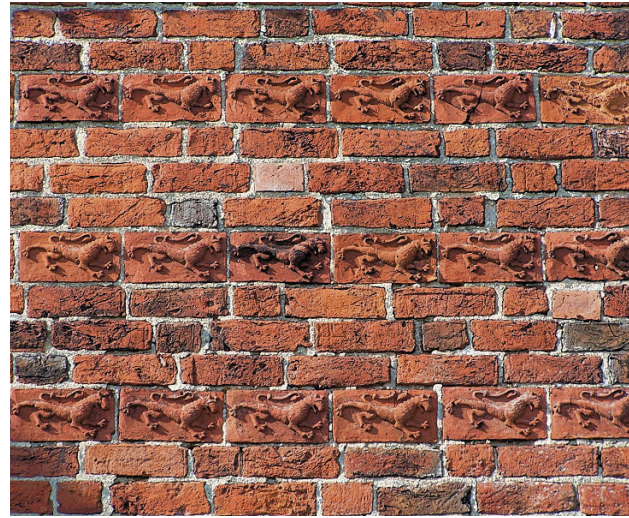


Abb. 38: Backsteinfriese, Kathedrale Steffenshagen

wider, die Haupt- und Seitenschiffe durchschneiden.¹⁷

Auch wenn die Rippen nach heutigem Stand der Forschung das Tragverhalten nicht wesentlich verbessern, stellen sie einen möglicherweise intuitiven Schritt zur Auflösung eines flächigen Systems in eine Stab- oder Skelettstruktur dar. In der Gotik erlangte auch die Wirtschaftlichkeit im Bauwesen einen höheren Stellenwert als je zuvor. Die Backsteingotik sorgte dafür, dass der Ziegel auch in Nordeuropa zu einem weit verbreiteten Baustoff wurde. Die häufig verwendeten Profilsteine zeigen, dass keramische Baustoffe vielseitig in Formgebung und Verwendung sind. Der Ziegel stellte nicht länger nur den einheitlichen, eckigen Stein dar.

¹⁷ Vgl. Hart 1965, 67.

Der Entwurf der Domkuppel

In Italien erfuhr das gotische Architektursystem durch Abbau von Streben, Rippen und Vertikalität eine Abwandlung zur Vierungskuppel. Mit gewaltigen Dombauprojekten versuchten die Baumeister großer italienischer Städte, die Kathedralen des Nordens in den Schatten zu stellen.

Zu dieser Zeit entstand auch die Domkuppel von Florenz. Der Konzeption nach ist sie mittelalterlich, doch in entscheidenden Punkten entspricht das Bauwerk nicht dem gotischen Stil. „Es gibt sein Traggefüge von außen nicht zu erkennen, vor allem fehlt dem Innenraum die strukturelle Gliederung.“¹

Der ursprüngliche Entwurf stammt von Arnolfo di Cambio, der die Idee hatte, Längs- und Zentralbau zu einer Einheit zu verbinden. Bis zu seinem Tode wurden jedoch nur die Sockelmauern erbaut. Danach wurde dem Bau nur mehr wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Erst 1337 wurden die Arbeiten unter dem Dombaumeister Francesco Talenti fortgeführt. 1367 wurden von der Dombaubebehörde acht Baumeister aufgefordert, den Endzustand des Doms in einem Modell zu erarbeiten. Dieses Modell zeigte einen mittelalterlichen Dombau, dessen Vierung zum Zentralraum wurde. Dieser wies

¹ Hart 1965, 71.

Abb. 39: Santa Maria del Fiore, Florenz



die Form eines Oktogons auf, mit einem Durchmesser von 72 Ellen. Die Gesamthöhe des Zentralraums betrug 144 Ellen. Aus diesen beiden Grundmaßen leiten sich die weiteren Abmessungen ab. Die Kuppel besitzt eine Höhe von 55 Ellen und das Tambour eine Höhe von 17 Ellen. $55+17=72$. Mit einem Kuppeldurchmesser von 42 m nähert sich der Dom dem bisher größten Kuppelbau, dem Pantheon (43 m), an. Alle zukünftigen Dombaumeister mussten sich durch Schwur verpflichten, das ausgearbeitete Maßsystem (Abb. 40) einzuhalten.² „Diesen Beschlüssen folgten nun fünfzig Jahre intensiver Bautätigkeit ohne weitere Diskussionen über grundsätzliche Fragen.“³

² Vgl. Jesberg 1996, 46.

³ Krämer 2001, 32.

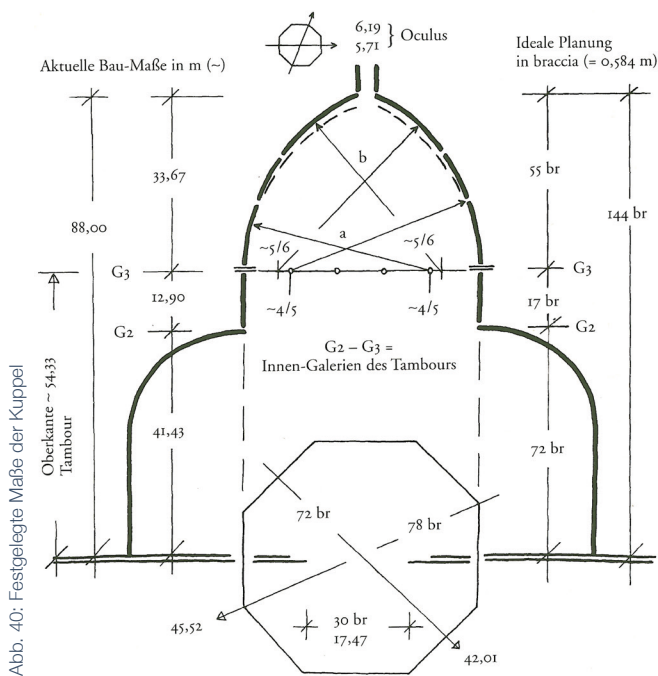


Abb. 40: Festgelegte Maße der Kuppel

Brunelleschis Kuppelmodell

Zu diesem Zeitpunkt war jedoch noch nicht klar, ob sich eine Kuppel dieser Größe überhaupt realisieren ließe. 1418 wurde von der Dombaubebehörde ein Wettbewerb zur Lösung des Kuppelproblems in Form von Zeichnungen, Modellen und Ideen ausgeschrieben. Von Beginn an war Brunelleschis Modell für die Baubehörde von vorrangiger Bedeutung. Es handelte sich dabei um ein Modell der gesamten Kuppel aus Ziegeln und Holz im Maßstab von ca. 1:8. Mit einer Höhe von

4 m und einem Durchmesser von 6 - 7 m war es selbst ein begehbares Gebäude. In diesem Modell zeigte Brunelleschi die praktische Durchführbarkeit seines erstaunlichen Gedankens. Er wollte eine solch enorme Kuppel ohne Lehrgerüst herstellen und zeigte, wie man das Mauerwerk anordnen müsse, um eine ausreichende Stabilität zu erreichen. Dieses Wettbewerbsmodell diente schließlich als praktischen Konstruktionsvorlage beim Kuppelbau der Santa Maria del Fiore.⁴

Referenzen

Brunelleschi studierte antike Bauwerke in Form und Konstruktion und konnte aus diesem Wissen eigenständige bautechnische Lösungen entwickeln, die dem mittelalterlichen Bauwesen weit voraus waren. Es wird vermutet, dass beim Kuppelbau in Florenz vor allem das benachbarte Baptisterium und das Pantheon in Rom eine konstruktive Vorbildwirkung hatten. Die Kuppel der Santa Maria del Fiore besteht grundsätzlich aus fünf Konstruktionselementen: Tambour, Innen- und Außenschale, Rippen und Ankern. Brunelleschi war es bewusst, dass es sehr wichtig war, die einzelnen konstruktiven Elemente kraftschlüssig miteinander zu verbinden.

⁴ Vgl. Krämer 2001, 34-36.

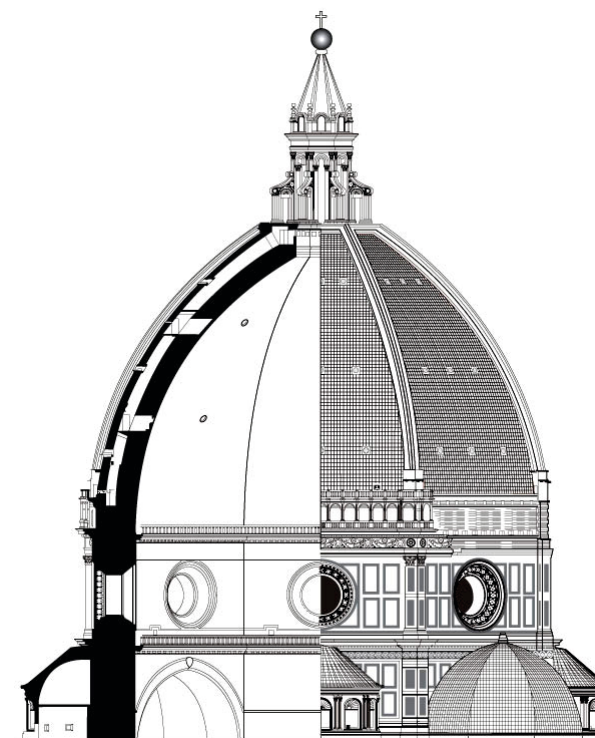


Abb. 41: Schnitt durch die Kuppel

Die Kuppelkonstruktion

Die innere Schale weist am Fuß eine Stärke von 2,22 m auf und verjüngt sich nach oben in zwei Absätzen von je 10 cm auf 2,00 m. Die Dicke der äußeren Schale beträgt am Fuß 0,96 m und ist in ihrem Kurvenverlauf konzentrisch zur inneren Schale gebildet. Sie verjüngt sich bis zu einer Stärke von 0,40 m wodurch sich der Raum zwischen den Schalen nach oben hin erweitert. Auch die acht Eckpfeiler werden zum Scheitel hin schmaler.

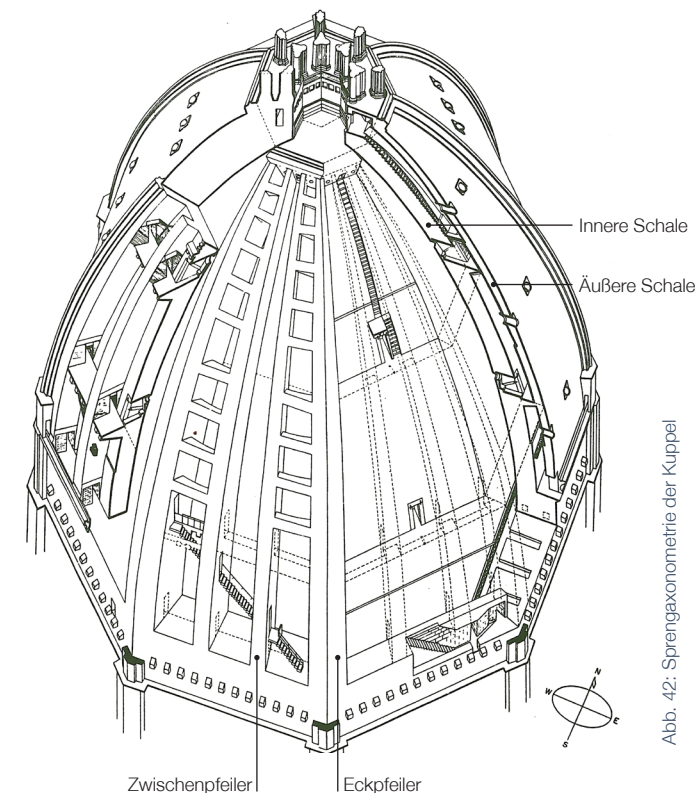
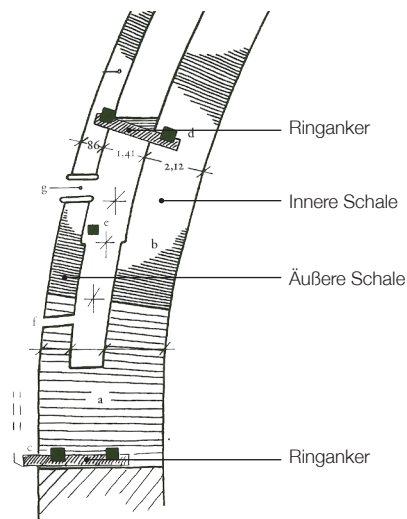
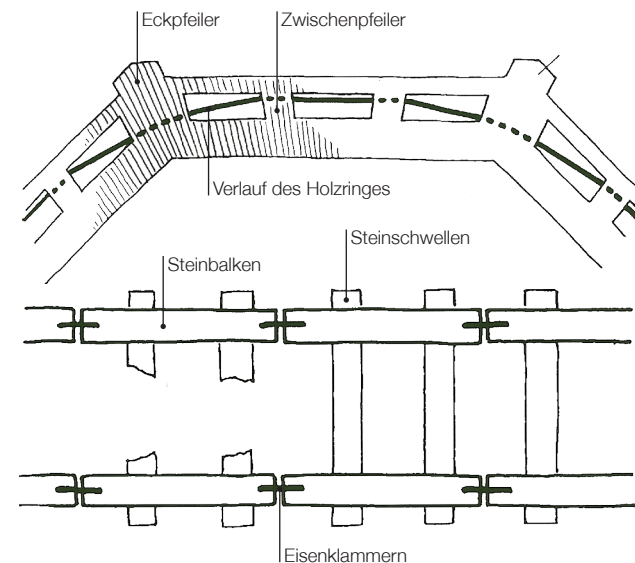


Abb. 42: Sprengaxonomie der Kuppel

Am Kuppelfuß weisen sie eine Stärke von 3,60 m auf. In jedem Gewölbefeld zwischen den Pfeilern stehen zwei Zwischenpfeiler. Auch sie folgen der Verjüngung im System und sind am Fuß 1,70 m stark. Nicht nur die acht Hauptpfeiler dienen in Brunelleschis System als tragende Elemente. Durch die Verzahnung dieser vier Konstruktionselemente tragen sie zusammen die anfallenden Lasten ab und können als geschlossene



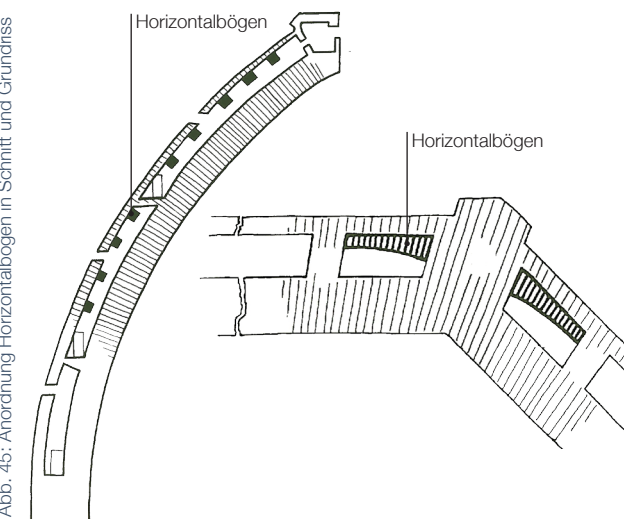
nes statisches System gesehen werden. Das Kuppel-system wird von drei Ringankern aus Stein (Abb. 43, 44) umschlossen. Die Steinketten bestehen aus zwei Reihen von Steinbalken, die wie Eisenbahnschienen auf Steinschwellen sitzen. Die Balken mit einer Stärke von 44 x 44 cm und eine Länge von 2,63 m. Sie sind über verzinnte Eisenklammern miteinander verbunden. Im unteren Bereich der Kuppel befindet sich ein weiteres Anker-element in Form eines Holzringes. Dieser Ring verläuft kreisförmig um die innere Schale, streift in den Mittelfeldern der Kappen die Außenschale und zieht in den Randfeldern zur Innenschale (Abb. 44). Dieser Holzring hat die Aufgabe, die Pfeiler miteinander zu verbinden. Weiters gibt es zwischen den Scha-



len neun Reihen horizontaler Bögen (Abb. 45), die die Zwischenpfeiler und die Außenschale stärker mit den Eckpfeilern verbinden. Dadurch werden die Ecken der Kuppel zusätzlich versteift. Am oberen Ende der Kuppel verspannt ein oktogonaler Schlussring als Keil die 24 Pfeiler und die Kappen des Gewölbes.⁵

Die eigentliche Genialität Brunelleschis liegt in der Ausmauerung der Rippen und Kappen. „Die ganze Konstruktion ist bis zu 7 m Höhe in Sandsteinquadern, darüber in Ziegelmauerwerk ausgeführt.“⁶ Durch die Rippen wird eine Stärke der Kuppel vorgegeben, doch Brunelleschi löst die Ausmauerung zwischen den Rippen in

⁵ Vgl. Krämer 2001, 54-60.
⁶ Hart 1965, 71.



zwei Schalen auf. Die zwei Schalen wurden zusätzlich durch radial angeordnete Stege miteinander verbunden. Die einzelnen Mauerkappen stellen ein einachsrig gekrümmtes Gewölbe dar und konnten somit durch ein Schnurgerüst gemauert werden. An den Ecken der Hauptrippen bilden die Kappen eine Kehle aus, deren Kante dem Kuppelradius folgt. Somit erfahren die beiden Schalen der Mauerkappen eine geringere Krümmung als die Rippen. Sie erreichen die Krümmung der Rippen erst im Scheitel (Abb. 46).⁷

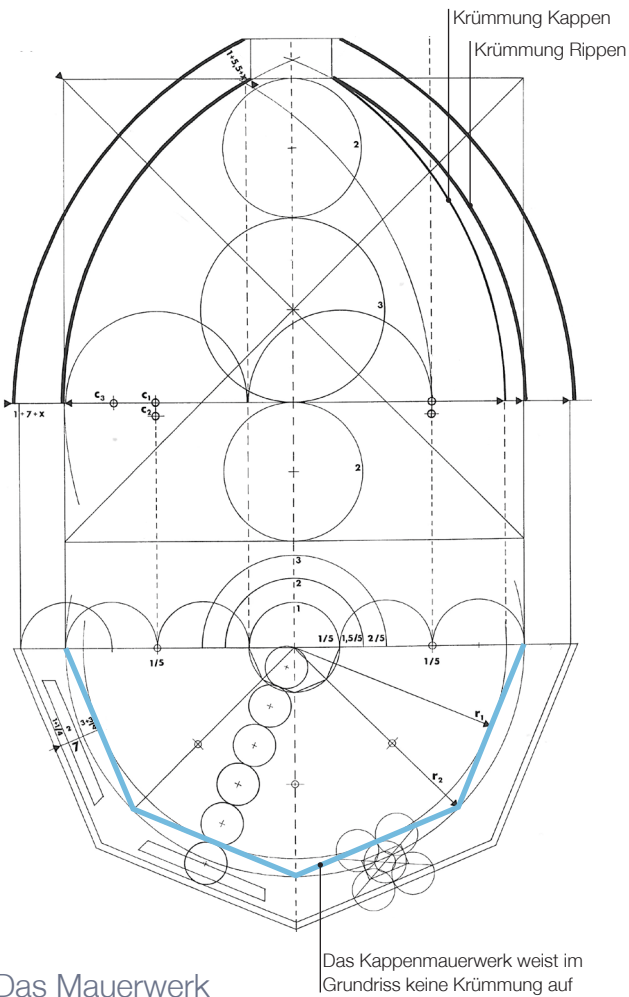
Im früheren freihändigen Wölbungsbau, wie z.B. bei den Römern, Byzantinern oder den frühen persischen

⁷ Vgl. Jesberg 1996, 50.

Kulturen, wurden meist Gewölbe in Form von Rundkuppeln gemauert, was natürlich auch praktische Gründe hatte. Ein oktogonales Kappengewölbe hat hinsichtlich der Einwölbung ohne Lehrgerüst große Nachteile gegenüber einer Rundkuppel. Dessen war sich Brunelleschi bewusst, und versuchte, die konstruktiven Vorteile der Rundkuppel auf das Kappengewölbe zu übertragen. Er wollte zusätzlich zu den Rippen, die einen großen Teil der Lasten abtragen, eine Stabilisierung erreichen, wie sie bei einer, im Querschnitt kreisrunden, Kuppel vorhanden ist.

Im Kuppelgewölbe der Santa Maria del Fiore sind einige Maßnahmen zu erkennen, die darauf hinzielen, der Kuppel sphärische Eigenschaften zu verleihen. Alle Bauglieder im System sind radial auf die Mittelachse ausgerichtet, wie auch die Anker-elemente. Sie folgen nicht der achteckigen Form, sondern bilden einen Kreis. Die Horizontalbögen in den Ecken dienen in ihrer Form der Annäherung des Achtecks an einen Kreis. Zu dem Prinzip, das Gebilde möglichst sphärisch zu behandeln, zählt auch die kraftschlüssige Verbindung der einzelnen Konstruktionselemente die Brunelleschi sehr wichtig war.⁸

⁸ Vgl. Krämer 2001, 62-64.



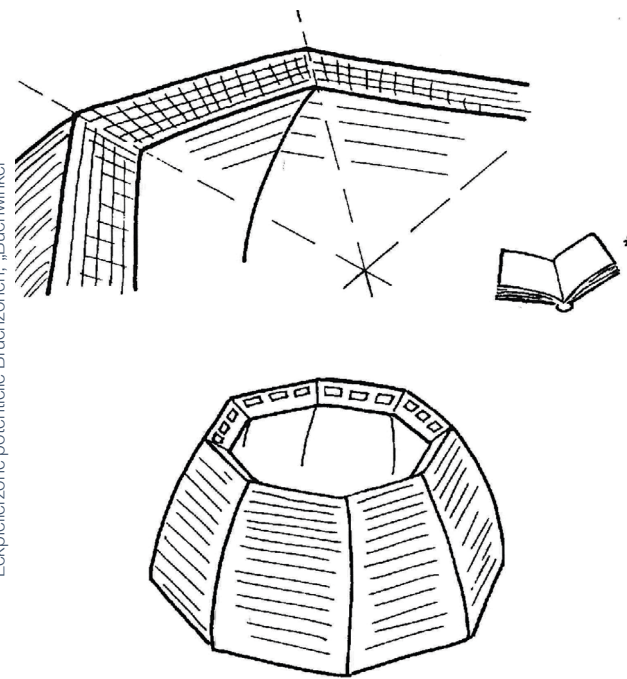
Das Mauerwerk

Das Herstellen dieser konstruktiven Einheit erfolgte über die Anker-elemente und über den besonderen Ziegelverband der Rippen und Kappen, die miteinander verzahnt sind. Brunelleschi studierte anderer Ziegel-

bauten und seine Genialität ermöglichten es ihm, aus einer Kombination verschiedener Mauerwerkstechniken und Ziegelwerkstoffen einen Verband zu entwickeln, der genau den Anforderungen seiner Kuppel entsprach. Mit dieser Lösung nutzte er die einfachen Grundvoraussetzungen der Keramik als Baustoff perfekt aus und zeigte die großen Vorteile, die im Wesen dieses Materials liegen. Brunelleschi's Ziegelverband weist mehrere Mauertechniken auf, durch die eine gute Lastabtragung ermöglicht wird, indem die Konstruktionsglieder miteinander verbunden und ausgesteift wurden.

Die einzelnen Mauerwerksschichten weisen eine Schräglage in Richtung des Kuppelzentrums auf und verlaufen girlandenartig zwischen den Eckpfeilern (Abb. 48). Würden die Schichten vollkommen waagrecht verlaufen, wäre in den Ecken der durchgehende Mauerverband unterbrochen, wodurch eine Schwachstelle im Verbund entstehen könnte (Abb. 47). Die statische Voraussetzung für ein gerüstloses Einwölben ist, dass sich jeder geschlossene Mauerring selbst trägt, wie es bei einer Rundkuppel der Fall ist. Bei der Domkuppel sind die Kappen jedoch im waagrechten Schnitt gerade und somit nicht vor dem Einstürzen gesichert. Brunelleschi löste dieses Problem, indem er jeden dieser Mauerstreifen wie einen scheinbaren Bogen ausform-

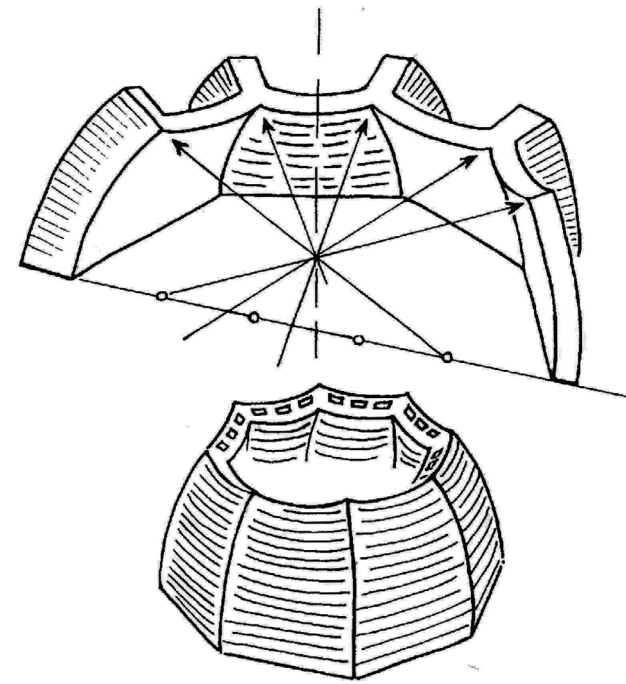
Abb. 47: Bei einer waagrecht-geraden Schichtenlage entstehen in der Eckpfeilerzone potentielle Bruchzonen, „Buchwinkel“



te (Abb. 49). In der Kuppelkonstruktion entstand ein waagrecht zu den Pfeilern hin laufender Schub. Dieser kann von einem konventionellen, horizontal geschichteten Mauerverband nicht aufgenommen werden, da er auf die schmalen Seiten der Ziegel trifft. Brunelleschi verwendete einen Fischgrätverband (Abb. 50, 51), in dem die, senkrecht zur Schubkraft gestellten, Ziegelbänder die Horizontalschichten in ideale Keile unterteilt. So entsteht ein scheinbarer Bogen, der in der Lage ist, den seitlichen Schub günstig aufzunehmen.⁹

⁹ Vgl. Krämer 2001, 82-84.

Abb. 48: Brunelleschi's Lösung, girlandenförmige Schichten



Brunelleschi entschied sich aus mehreren Gründen für die Verwendung eines keramischen Baustoffes. Es ist ein Material, das im Verhältnis zu Stein leicht ist und somit den Gewölbeschub und die Last auf die Unterkonstruktion gering hält. Der Ziegel ist auf der Baustelle zeitsparend in seiner Verarbeitung und bei Belastung hochdruckfest. Außerdem kann die Festigkeit im Brennprozess kontrolliert werden.

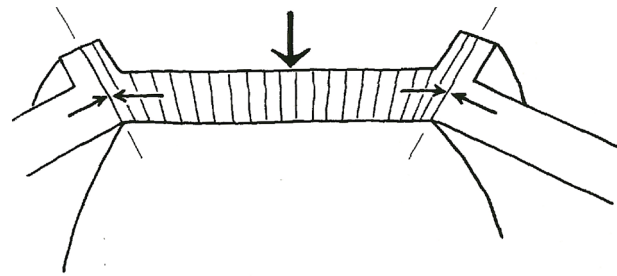


Abb. 49: Keilförmige Anordnung des Mauerwerks

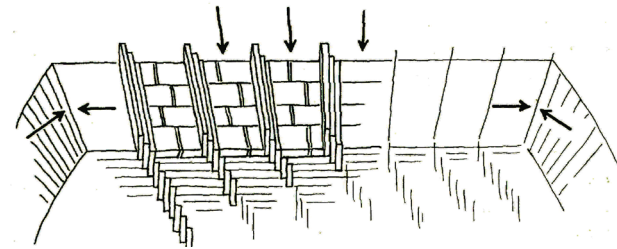


Abb. 50: Keilförmige Strukturierung durch Fischgrätenverband



Abb. 51: Fischgrätenmuster im Inneren der Kuppel

Brunelleschi wusste die Vorteile keramischer Bauteile gezielt einzusetzen, was er in seinen Mauertechniken atemberaubend darstellte. Die Ziegelform konnte einfach an die Bedürfnisse des Mauerwerks angepasst werden, welches den Anforderungen entsprechend, eine hohe Komplexität aufweisen musste. Auch die einfache Anfertigung von Spezialteilen wurde beim Kuppelbau in Anspruch genommen. „Eine Sonderform, die Dachziegel, ließ Brunelleschi unter Einschluß [!] von Stroh formen und brennen, um ihr Gewicht zu verringern.“¹⁰

¹⁰ Krämer 2001, 67.

Die Konstruktion Brunelleschis Kuppel spiegelt in ihrer Form den materialgerechten Einsatz keramischer Baustoffe wider. Er nutzte und zeigte die Stärken des Materials und wirkte den Schwächen, durch die Verbindung mit anderen Materialien, entgegen. Die Zugkräfte in seinem System, die vom Ziegel nicht aufgenommen werden konnten, leitete er in andere, besser dafür geeignete Materialien, nämlich in seine Ankerketten. Somit entstand eine logische in sich geschlossene Verbundkonstruktion, die es in dieser Komplexität und Ausgereiftheit noch nicht gab.

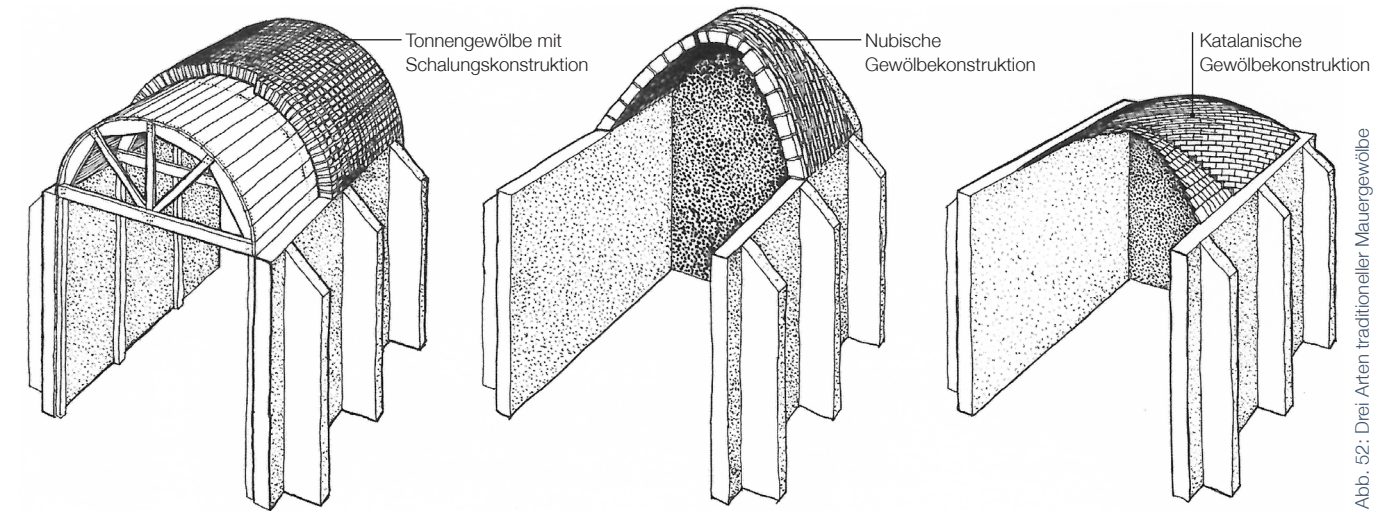


Abb. 52: Drei Arten traditioneller Mauergewölbe

Spanische Tradition

Wie die meisten Bautechniken geht auch die Entwicklung des katalanischen Gewölbes auf die vorhandenen und einfach zu nutzenden natürlichen Ressourcen der Region zurück. „Der Mangel an Bauholz in Spanien erschwerte die Konstruktion von Balkendecken oder aufwändigen Schalungsbauten für gewöhnliche Gewölbe und verlangte nach Alternativen.“¹ So wurde die katalanische Wölbungstechnik entwickelt, die auf der Verwendung natürlicher Materialien basiert und ohne aufwändige Schalungskonstruktionen umgesetzt werden konnte. Diese Art der Gewölbefertigung stellt durch geringen Materialverbrauch und kurzer Bauzeit eine

¹ Block / Rippmann 2013, 528

wirtschaftliche Mauerwerksmethode dar. Zwei wesentliche Merkmale unterscheiden das katalanische Ziegelgewölbe von einem herkömmlichen Ziegel- oder Steingewölbe (Abb. 52). Erstens, dünne Ziegelsteine werden flach aneinander gelegt, um das Gewölbe zu erzeugen, und an den dünnen Seiten miteinander verbunden; im Gegensatz zur vertikalen Orientierung der Steine bei traditionellen Mauerwerken. Zweitens, die erste Ziegelschicht wird mit rasch härtendem Mörtel ausgefüllt, der so schnell aushärtet, dass die Ziegel fast augenblicklich in ihrer Position verharren, wodurch keine Sekundärkonstruktionen, wie Schalungen nötig sind.²

² Vgl. Ochsendorf 2010, 20.

Konstruktionsweise

Diese erste Schicht aus flachen extrudierten Ziegeln dient den folgenden Lagen als Trägerschicht. In den meisten Fällen besteht eine katalanische Gewölbekonstruktion aus drei Ziegellagen, die gegenseitig, um jeweils 45°, gedreht angeordnet werden (Abb. 53). Einfache Gewölbeformen können durch diese Technik, völlig ohne Hilfskonstruktion, errichtet werden. Bei größeren und komplexen Gewölbegeometrien werden lediglich leichte Holzkonstruktionen zur ersten Formgebung und Orientierung benötigt. Dieser Verzicht von Lehrgerüsten brachte dieser Wölbungstechnik einen großen Vorteil gegenüber anderen konventionellen Techniken dieser Zeit. Zuvor waren freihändig errichtete Gewölbekonstruktionen, wie z.B. das nubische Gewölbe, in ihrer Formgebung durch die Konstruktionsweise stark eingeschränkt. Ein weiterer Vorteil, der aus der schalungslosen Bauweise entsteht, ist die freie Zugänglichkeit der Gewölbeunterseite. Dadurch wird ein sauberes Verfügen und Gestalten der Untersicht ermöglicht, wodurch die optische Qualität zusätzlich erhöht werden kann. Diese gerüstfreie Wölbungstechnik forderte eine statische Stabilität der Konstruktion über die gesamte Bauphase. Tonnengewölbe werden in einzelnen Bögen, die aneinander gereiht werden, schrittweise aufgebaut. Kuppelkonstruktionen entstehen aus in sich geschlossenen, stabilen Ziegelringen, die Reihe

Abb. 53: Katalanisches Gewölbe, Mapungubwe Interpretation Center, Südafrika



für Reihe aneinander gemauert werden. Eine weitere Grundvoraussetzung des katalanischen Gewölbes ist die Verwendung einer rein druckbeanspruchten Geometrie. Durch die dünne Materialstärke und dem damit verbundenen Gewicht können Biegemomente aus asymmetrischen Lastfällen reduziert werden.³

Die Konstruktion des katalanischen Ziegelgewölbes ist um ein Vielfaches dünner als bei konventionellen Mauerwerken, in denen Ziegel oder Steine vertikal angeordnet werden. Eine dünnere Ziegelkonstruktion ist leichter und übt weniger Druck aus als ein dickes Mauerwerk, wodurch die Anforderung an die Dicke von Wänden

³ Vgl. Block/Rippmann 2013, 528

und Stützen auf denen das Gewölbe liegt verringert wird. Die ersten Anwendungen dieser Wölbungstechnik gehen auf das 14. Jhd zurück. Eines der ersten Beispiele des katalanischen Wölbungsbaus stellt die Jofre Kapelle im Kloster Santo Domingo in Spanien dar, welche 1382 erbaut wurde.⁴

Haupteinsatzgebiet war zu Beginn die Herstellung flacher Geschoßdeckengewölbe. Antoni Gaudí leitete im 19. Jhd Bauformen der Gotik in katalanische Gewölbestrukturen um, wodurch diese weiterentwickelt wurden und neue Anwendungen fanden. Im Bau der Casa Milà (Abb. 54) benutzte er eine Abwandlung des katalanischen Gewölbes und formte daraus parabelförmige Bögen, über die sich eine durchlaufende Ziegelschale spannt, die gleichzeitig die Dachhaut bildet. Auch beim Dach der Gemeindeschule der Sagrada Familia nutzte er die flachen Ziegel, um eine Wellenschale zu konstruieren. Die Wirtschaftlichkeit dieser Wölbungstechnik wird durch die Tatsache unterstrichen, dass sie auch im Bereich großer Industriebauten Verwendung fand. Dort wurden katalanische Gewölbedecken oft in Verbindung mit schlanken Eisenkonstruktionen eingesetzt.

⁴ Vgl. Ochsendorf 2010, 20-21.

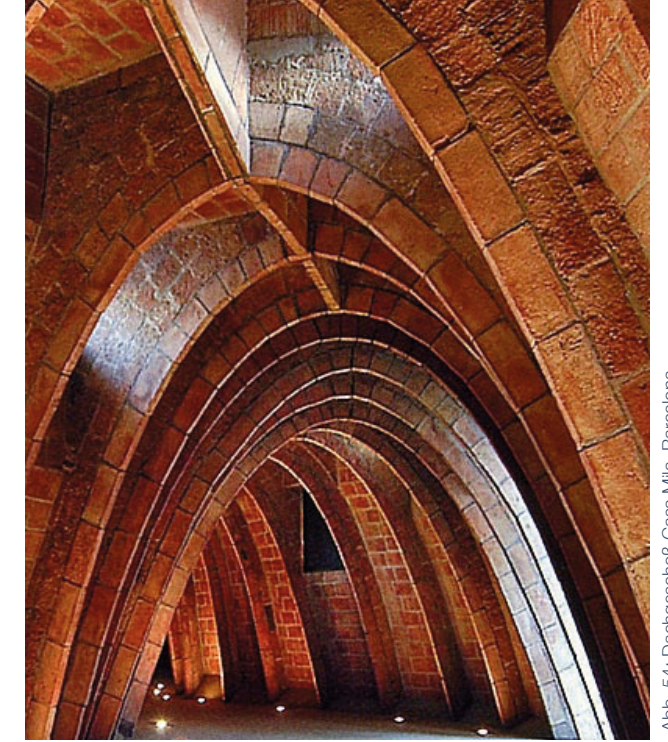


Abb. 54: Dachgeschoß Casa Milà, Barcelona

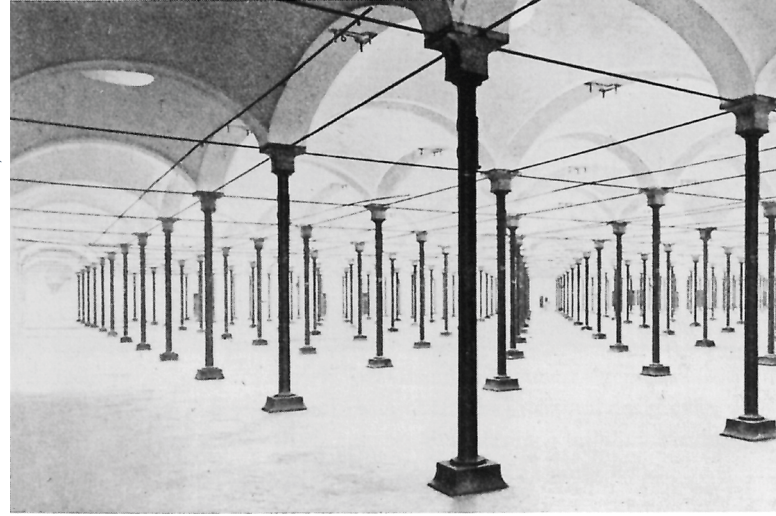
„Diese Entwicklungen gründeten auf der Pionierarbeit des spanischen Industriearchitekten Rafael Guastavino (1842-1908), der 1881 in die USA immigrierte, und die katalanische Wölbungstechnik in Nordamerika verbreitete und weiterentwickelte.“⁵

⁵ Block/Rippmann 2013, 529.



Rafael Guastavino

Rafael Guastavino unterschied sich von anderen, in Europa ausgebildeten, Architekten in der Mitte des 19. Jhdts. durch seine Verbindung zur historischen Bautradition Spaniens. Im Unterschied zu den Architekten, die an den Beaux - Arts Instituten in Frankreich ausgebildet wurden, wo theoretisches Wissen gelehrt wurde, lernte man Guastavino an der Escola Especial de Mestres d'Obres in Barcelona die praktischen handwerklichen Aspekte der Baukunst.



Batlló Fabrik

1868 bekam Guastavino den Auftrag, die Batlló Fabrik zu entwerfen und zu bauen, eine bedeutende Textilfabrik, die sich über vier Stadtblocks erstrecken würde. Bei der Batlló Fabrik vermischte Guastavino das traditionelle katalanische Gewölbe mit Eigenschaften industrieller Architektur, um neue Möglichkeiten für den Industriebau zu kreieren. Die Verwendung von Stahlsäulen, in Verbindung mit traditionellem Ziegelgewölbe, war eine wesentliche Konstruktionsinnovation, wie auch der Maßstab des Gebäudes. Die kurze Bauzeit war ebenfalls außergewöhnlich, da sie nur 2 Jahre betrug. Außerdem gelang Guastavino eine innovative Materialverbesserung, durch Verwenden von Portland-



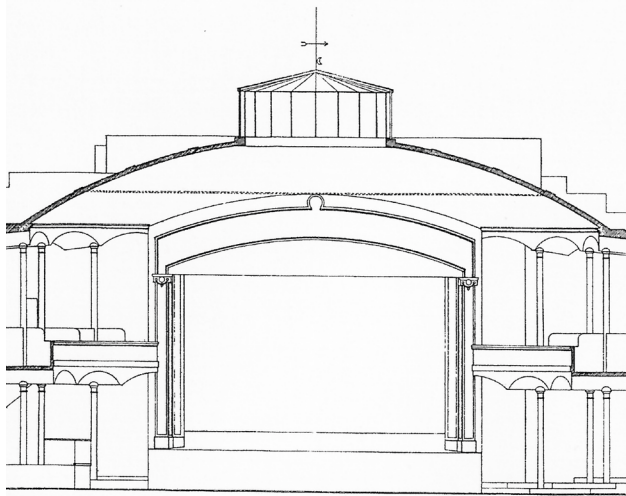
zement anstatt Kalkmörtel, wie er zuvor bei der traditionellen Methode eingesetzt wurde. Dadurch konnte er eine wesentlich höhere Festigkeit der Konstruktion erreichen. Die großzügige Struktur der gemauerten Treppenhäuser des Haupthauses zog die Aufmerksamkeit auf sich und demonstrierte Guastavinos Fähigkeit, innovative dreidimensionale Strukturen zu bauen.⁶

La Massa in Vilassar de Dalt

Das erste Projekt, das die Arbeit Guastavinos der breiten Öffentlichkeit zugänglich machte, war das Theater La Massa in Vilassar de Dalt, nahe Barcelona. Dieser Auftrag gab Guastavino die Möglichkeit zu zeigen, dass

⁶ Vgl. Ochsendorf 2010, 25-29.

seine Wölbungstechnik nicht nur eine wirtschaftliche Industriebauweise darstellte, sondern auch hohe ästhetische Qualitäten hatte. Er begann mit den Arbeiten im November 1880 und stellte die Gebäudestruktur wenige Monate später fertig. Um eine uneingeschränkte Sicht zu garantieren, designte Guastavino eine Ziegelkuppel mit einer Spannweite von 17 m und einer Höhe von 3 m. An der höchsten Stelle der Kuppel befindet sich eine kreisförmige Oberlichte mit einem Durchmesser von 4 m. Die Schale ist unglaubliche 5 cm dünn, mit 17 radialen Rippen, deren maximale Dicke 10 cm beträgt. Als Auflager dienen 14 schlanke Stahlsäulen, die durch 13 quer verlaufende Gewölb Bögen versteift wurden. Zusätzlich nimmt ein eingebetteter Stahl-



ring im unteren Bereich der Kuppel Schubkräfte auf. Betonschalen werden in diesen Dimensionen erst 40 Jahre später gebaut.⁷

Auf diese eindrucksvolle Art und Weise stellte Guastavino seine Fähigkeiten als großer Ingenieur und Designer sowie das hohe Potenzial seiner Wölbungstechnik dar. Er zeigte, dass er in der Lage war, großzügige stützenfreie Räume zu schaffen, wie sie die Architektur im öffentlichen Bereich benötigt.

Auswanderung in die USA

1881 wanderte Rafael Guastavino in die USA aus. Ein Grund dafür war sicherlich der Bauboom in vielen amerikanischen Städten, in dem er einen großen Markt für seine Mauerwerkskonstruktionen sah.

„Nach anfänglichen Schwierigkeiten gelang ihm und später seinem Sohn der Aufbau einer Baufirma, die für die Konstruktion von katalanischen Gewölben in nahezu 1000 Gebäuden in 30 Staaten der USA zuständig war.“⁸

Die Guastavinos erkannten den großen Vorteil der Brandbeständigkeit gegenüber Stahl und Holz und entwickelten auch Adaptionen, wie Akustikziegel. Mit dem Bau der Boston Public Library, in Zusammenarbeit mit dem angesehenen Architekturbüro „McKim Mead and White“ gelang ihnen 1889 der Durchbruch. McKim bat Guastavino, ihm anhand eines Probebogens seine Mauerwerkstechnik zu präsentieren. Dieser Bogen wurde einem Belastungstest ausgesetzt. Er hielt bei einer Spannweite von 1,7 m einer Belastung von 5500 kg stand, was einer Belastbarkeit von 2700 kg/m² entspricht. Dieser Test erregte im Bauwesen große Aufmerksamkeit und verhalf der Baufirma zu größerer Bekanntheit.⁹

Es folgten unzählige Gewölbekonstruktionen in verschiedensten Bereichen der Baubranche. Vor allem im öffentlichen Bereich konnte sich Guastavinos Konstruktionsweise durch Effizienz und vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten etablieren. Die Bar des Vanderbilt Hotels in New York zeigt diese gestalterischen Qualitäten durch Verwendung von farbig glasierten Ziegeln in Verbindung mit verschiedenen Verlegemustern. Auch die ständige Weiterentwicklung der katalanischen Wölbungstechnik war den Guastavinos wichtig, um in der Baubranche konkurrenzfähig zu bleiben. Am deutlichsten zeigten sich diese Entwicklungen, nachdem Rafael Guastavino die Baufirma an seinen Sohn Rafael Guastavino Jr. übertrug.

⁷ Vgl. Ochsendorf 2010, 35-39.

⁸ Block/Rippmann 2013, 529.

⁹ Vgl. Ochsendorf 2010, 47-50.



St. John the Divine

Die Kuppel der St. John the Divine Kirche in New York ist die konstruktiv anspruchsvollste Gewölbekonstruktion der Guastavinos und beinhaltet eine wesentliche konstruktive Weiterentwicklung im Wölbungsbaue mit Flachziegeln.

Der Bau der St. John the Divine begann bereits 1892 und auch die Guastavino Baufirma arbeitete an diesem Projekt. 1909 wurden die vier Auflagerbögen fertiggestellt, die später einen Kirchturm tragen sollten. Doch die Baukosten waren um ein Vielfaches höher als erwartet und der Bau des Kirchturmes musste verschoben werden. Die Baumeister suchten nach einer kostengünstigen temporären Konstruktion, um



Abb. 63: Untersicht mit Ringschichten

die riesige Öffnung zwischen den vier Mauerwerksbögen zu schließen und den Bau somit vor Witterung zu schützen. Guastavino Jr. schlug die Überdeckung mit Hilfe einer Kuppel vor. Diese habe eine kurze Bauzeit und benötige keine aufwändige Schalung, wodurch man die Kosten niedrig halten könne. Die Bauherren vertrauten Guastavino und innerhalb von 15 Wochen schaffte er es, die Kuppel fertigzustellen.

Mit einem Radius von 20 m ist diese Konstruktion die größte der Guastavino Kuppeln und gleichzeitig eine der größten Mauerwerkskuppeln, die jemals gebaut wurden. Atemberaubend ist jedoch die Dicke des Mauerwerks, die am höchsten Punkt nur 11,4 cm beträgt.¹⁰

¹⁰ Vgl. Ochsendorf 2010, 117-126.

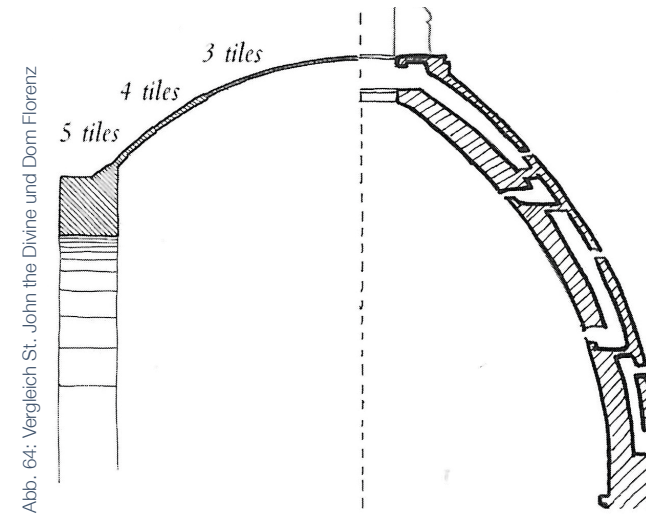


Abb. 64: Vergleich St. John the Divine und Dom Florenz

Bewehrtes Mauerwerk

Diese dünnchalige Konstruktion wird auch durch die Anwendung eines bewehrten Mauerwerks ermöglicht. In Bereichen, wo große Zugkräfte auftreten, befinden sich zwischen den Ziegelschichten Stahlstäbe die das Mauerwerk unterstützen. Vor allem im Bereich des Kuppelfußes nimmt die Bewehrung die anfallenden Zugkräfte auf. Diese Kuppel war der erste Bau der Guastavinos, der sich solch einer Mauerwerkskonstruktion bediente. So wurde die traditionelle Methode des katalanischen Gewölbes an die modernen Standards im amerikanischen Bauwesen angepasst. Durch diese technische Erneuerung war es möglich große Gewölbekonstruktionen in kurzer Bauzeit zu errichten.

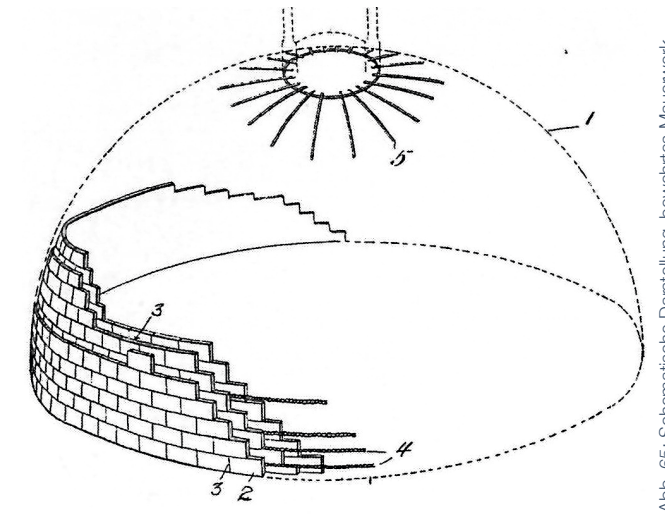


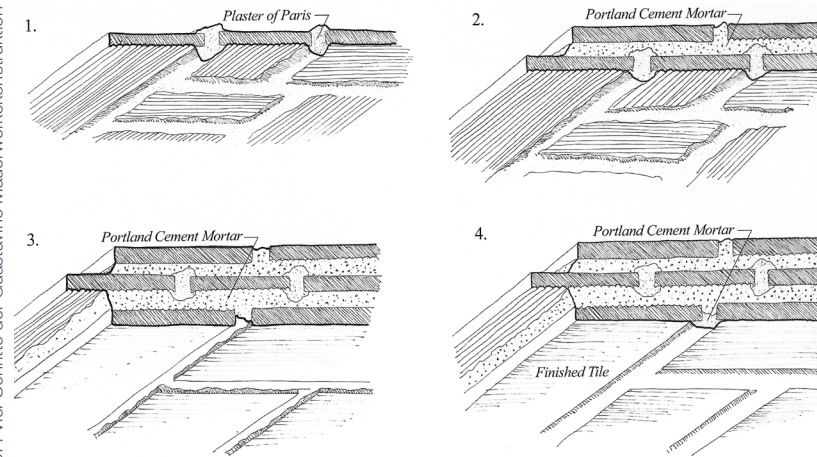
Abb. 65: Schematische Darstellung, bewehrtes Mauerwerk

Alle, in den Dimensionen vergleichbaren, zuvor gebauten Kuppeln in Europa, waren nicht ansatzweise so effizient in ihrer Konstruktion, wie die Kuppel von St. John the Divine. Brunelleschis Kuppel der Santa Maria del Fiore in Florenz ist vergleichsweise über zehn Mal so schwer und weist eine Bauzeit von vierzehn Jahren auf.¹¹

¹¹ Vgl. Ochsendorf 2010, 126.



Abb. 67: Vier Schritte der Guastavino Mauerwerkskonstruktion



Weiterentwicklung der Mauertechnik

Nach dem erfolgreichen Kuppelbau ließ sich Guastavino 1910 seine Konstruktionsweise des bewehrten Mauerwerks patentieren. Auch die katalanische Mauerwerkstechnik selbst war zu diesem Zeitpunkt nicht mehr dieselbe wie bei den frühen Gewölbekonstruktionen. Um komplexere Verlegemuster und mehr gestalterische Freiheiten zu ermöglichen, wurde die Reihenfolge der Ziegelschichten verändert. In der traditionellen katalanischen Wölbungstechnik wird zuerst eine Ziegellage mit schnell aushärtendem Mörtel gemauert, welche auch nach der Fertigstellung von unten sichtbar bleibt. Um 1910 wurde bereits eine andere Vorgehensweise verwendet, bei der ein Gewölbe in vier

Schritten errichtet wurde. Die erste Ziegelschicht wird mit einem schnell aushärtenden Gipsmörtel gemauert, wodurch die Anforderungen an eine Schalung minimiert werden. Danach wird die zweite Schicht mit kräftigerem Portlandzement - Mörtel darüber verlegt. Der dritte Layer wird ebenfalls mit Portlandzement-Mörtel von unten ergänzt. Diese Schicht kann mit glasierten Ziegeln in kunstvollen Mustern verlegt werden. Zuletzt wird die Untersicht sauber verfugt, um ein optisch ansprechendes Ergebnis zu erhalten.¹²

¹² Vgl. Ochsendorf 2010, 126-127.

Tragverhalten katalanischer Gewölbe

Rafael Guastavino sen. bezeichnete seine Gewölbebauten selbst als „kohäsive Konstruktion“. „Nur durch Kohäsion, die großartige Bindekraft des Mörtels, ist der freie Vorbau der Ziegelschale ohne Schalung möglich.“¹³ Guastavino war der Meinung, seine Gewölbe stellen durch die starke Verbindung zwischen Ziegel und Mörtel eine homogene Konstruktion dar, ähnlich einem Schalentragwerk. Er war überzeugt, dass diese Konstruktionen auch Zugkräfte aufnehmen können und somit keine Schubkraft an den Auflagern entsteht. Diese These basierte jedoch nicht auf Berechnungen oder wissenschaftlichen Theorien. Tatsächlich verhalten sich Guastavinos Wölbungen statisch gleich wie andere traditionelle Mauerwerksgewölbe. Nur durch ihr vergleichbar geringes Gewicht treten wesentlich geringere Horizontalkräfte auf als bei anderen Gewölbekonstruktionen. Das Material kann wie bei anderen Mauerwerken hohen Druck aufnehmen, jedoch nur geringen Zugkräften standhalten. Guastavinos Gewölbe sind durch die Verwendung der korrekten Geometrie stabil, nicht durch die Belastbarkeit des Materials auf Zug.¹⁴

¹³ Diehl 2006, 290.

¹⁴ Vgl. Ochsendorf 2010, 54-58.



Abb. 68: Belastungstest einer Wendeltreppe

Eladio Dieste

Der Bauingenieur Eladio Dieste entwickelte Baumaschinen und Bausysteme, die in seinen Konstruktionen sehr erfolgreich eingesetzt wurden. Dieste gilt als Erfinder einer bewehrten und vorgespannten Ziegelbauweise, mit der er zahlreiche Schalen, Faltwerke und Türme errichtete. Im Bereich der bewehrten Baukeramik ist er nicht der Einzige, steht aber mit seiner ausgereiften Technik einsam an der Spitze. In seinen Bauwerken fand er zu einer selten erreichten Einheit von Struktur und Form.¹

Die Ausformungen seiner Bauwerke sind nicht das Resultat einer künstlerischen Intention. Die Form entstand durch Verwendung effektiver Geometrie, die sich an die Eigenschaften des Materials anpasst. Alle verwendeten Elemente in seinen Bauwerken sind aufeinander abgestimmt und bilden eine Einheit. Die Schalenformen, die Dieste verwendete, sind direkt an die strukturellen Bedingungen der verwendeten Materialien geknüpft. Alle Komponenten in seinem Bausystem sind auf die Verwendung bewehrter Keramik ausgelegt. Durch dieses Design- und Konstruktionsprinzip war es ihm möglich, unglaublich dünne Ziegelschalen herzustellen. Der Ziegel ist in Uruguay ein weit verbreiteter Baustoff, wodurch auch viel praktisches Wissen im Umgang mit

¹ Vgl. Bosshard/Mäder 1999, 10-11.



Abb. 69: Markthalle, Porto Alegre

Mauerwerken vorhanden ist. Laut Dieste ist der Ziegel ein Material mit uneingeschränkten Möglichkeiten, das von der modernen Technologie ignoriert wurde. Er war überzeugt, dass der Backstein dieselben technologischen Möglichkeiten aufweist wie der Stahlbeton.²

Bewehrtes Ziegelmauerwerk

In Diestes Mauerwerkskonstruktionen ist eine Verbindung zu der katalanischen Wölbungstechnik zu erkennen. Er sah das Potential dieser Technik und machte sie mit Hilfe von Bewehrungen für andere Lastfälle

² Vgl. Consejería de Obras Públicas y Transportes Andalucía 1996, 21-28.

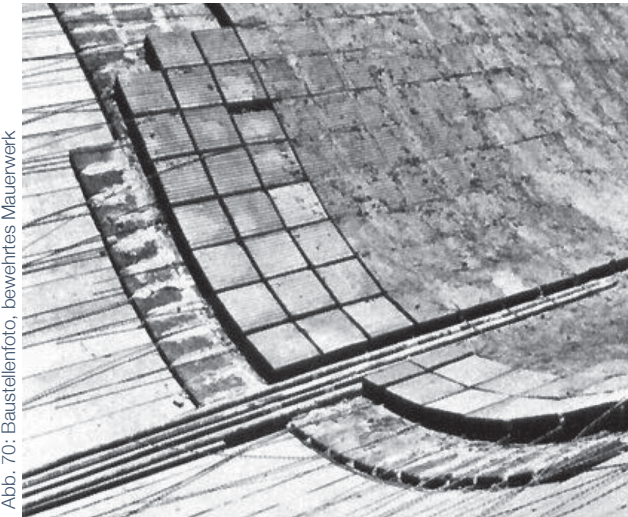


Abb. 70: Baustellensfoto, bewehrtes Mauerwerk

brauchbar. Die Ziegel werden dabei nicht im Verband angeordnet, sondern mit, in beiden Richtungen durchlaufenden, Fugen verlegt. Dadurch können die Stahlstäbe kreuzweise in den Fugen verlaufen (Abb. 70). Die Bewehrung macht Diestes Ziegelgewölbe zu Schalenträgwerken, welche bau- und tragwerkstechnisch dem Betonbau näher sind als dem Mauerwerksbau.³

Gauss'sche Schale

Dieste errichtete mit seinem Bausystem eine Vielzahl an Industriehallen in Südamerika. Zu so vielen Aufträgen kam er, weil in der Regel sein Lösungsvorschlag der billigste war. „Die zwingende statisch-kon-

³ Vgl. Jaeger 2011, 52.

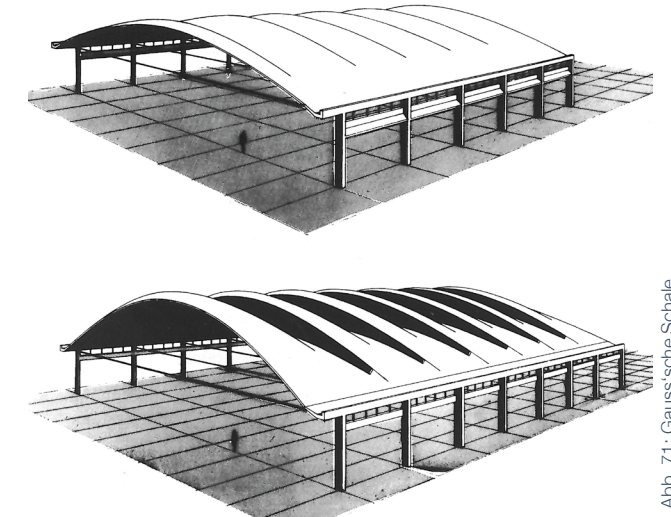


Abb. 71: Gauss'sche Schale

struktive, bautechnische und funktionelle Logik dieser Konstruktionen zeigt sich am deutlichsten bei seinen Gauss'schen Schalen (Abb. 71).⁴ Im Hallenquerschnitt stellt der Schalenschnitt die Stützlinie zur Eigenlast dar. Diese genau definierte Kurve trägt bei Eigenlast momentenfrei nur durch zentrische Normalkräfte. Alle Bogenschnitte münden in einer Stahlbetontraufe, die gerade zur Hallenrichtung verläuft. Sie dient als Bogenwiderlager und versammelt den Bogenschub auf den Kabeln der Unterspannung und auf den Stützen. Im Längsschnitt hat das Dach im Scheitel von Oberlicht zu Oberlicht die Form eines liegenden „S“ (Abb. 72). Dadurch werden die einzelnen Schalenabschnitte zwischen den Oberlichtern ausgesteift und erhalten die nö-

⁴ Bosshard/Mäder 1999, 12.

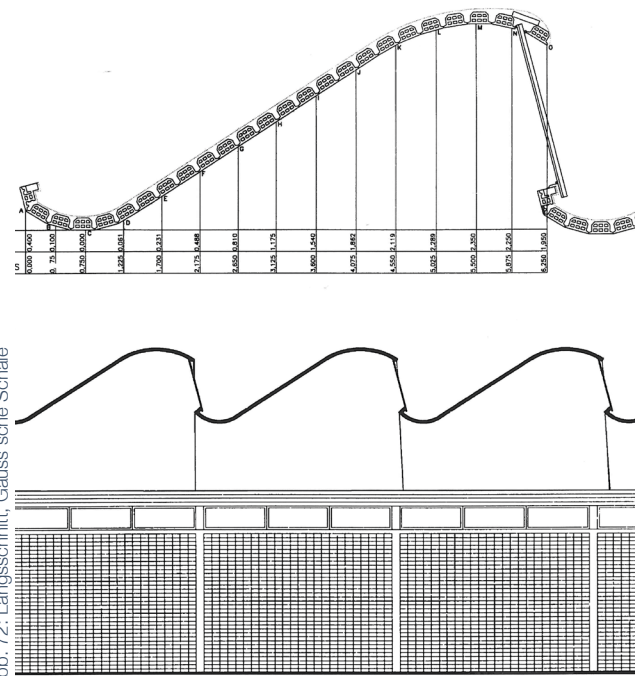


Abb. 73: Freistehendes Gewölbe, Busbahnhof Salto



tige Knicksicherheit. Das Erreichen der Knicksicherheit erfolgt bei diesem System nicht durch Veränderung der Schalendicke, sondern durch die Geometrie. Die Stärke der Schale kann somit immer mit dem konstruktiven Minimum von rund 12 cm ausgeführt werden. Durch diese Optimierung der Geometrie überspannen Dientes Schalen bis zu 50 m, wobei er der Meinung war, dass bis zu 100 m möglich wären. Für die Wirtschaftlichkeit des Systems war auch der Bauvorgang selbst entscheidend, bei dem die Abschnitte zwischen den Oberlichten, Bogen für Bogen entstanden. Dieste entwickelte ein motorisiertes System zum Anheben, Absenken und Verschieben der Rüstung. So wurde das Ausrüsten erleichtert und alle Abschnitte konnten mit

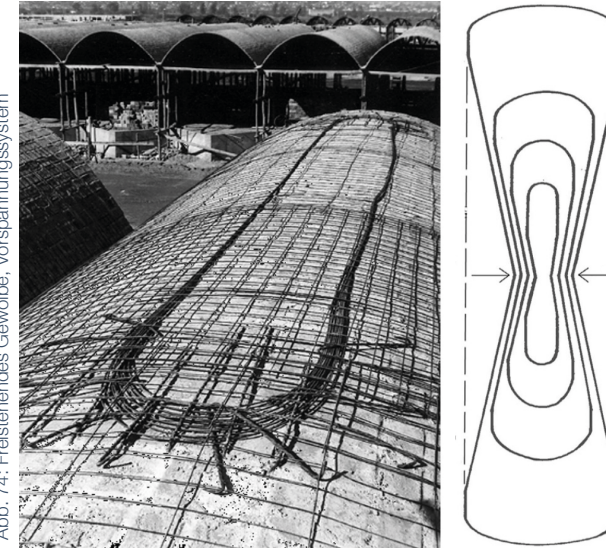
derselben Schalung gemauert werden. Bei fünfzehn Metern Spannweite beträgt die Ausrüstungsfrist nur vier Stunden, bei 50 m vierzehn Stunden.⁵

Das freistehende Gewölbe

Bei seiner zweiten, oft angewendeten Konstruktionsweise verwendete Dieste Tonnenschalen, die er aneinanderreicht, um große Dachflächen zu schaffen. Sie spannen dabei in Längsrichtung und bilden ein balkenähnliches Tragsystem. Dieses Prinzip verwendete er auch bei seinen weit auskragenden Überdachungen, die zu schweben scheinen. „Mit schräg abgeschnittenen, auf einer einzigen Stützenreihe lagernd

⁵ Vgl. Bosshard/Mäder 1999, 12.

Abb. 74: Freistehendes Gewölbe, Vorspannungssystem



und beiderseits 13,50 m auskragenden Tonnen ist der Busbahnhof von Salto (1973 - 74) (Abb. 73) von ungeheurer Dynamik und betörender Eleganz.“⁶ Um diese Auskragungen erreichen zu können, entwickelte der Ingenieur eine einfache und praktikable Art der Vorspannung (Abb. 74). Dabei werden Bewehrungsschleifen an der Oberseite der Schale angebracht. Zuerst werden sie jedoch nur an den Dachenden eingemörtelt. Danach werden in der Dachmitte die Drähte in Querrichtung zusammengezogen, wodurch die Schleife unter Zugspannung gesetzt wird. Bei einem Tankstellendach in Salto trieb Dieste das Prinzip seiner frei stehenden Gewölbekonstruktionen auf die Spitze. Fast schon unwirklich erscheinen die zwei parallelen Tonnen, die

⁶ Jaeger 2011, 54.



Abb. 75: Tankstellendach, Salto

auf nur einer Stütze ruhen und beidseitig 8,80 m auskragen (Abb. 75). Das, aufgrund seines Aussehens „Möwe“ genannte, Bauwerk strahlt eine unglaubliche Leichtigkeit und Dynamik aus und ist mittlerweile Teil einer Dieste Gedenkstätte.⁷

Christo Obrero-Kirche (Abb. 76)

Es war Eladio Diestes erstes Projekt, in dem er auch die Aufgabe des Architekten übernahm. Seine grundlegende Idee war es, durch die Bauform jedem Gemeindemitglied das Gefühl zu vermitteln, ein Teil des Gottesdienstes zu sein. Dazu entwarf er die Kirche als einen einzigen großen Raum, der die Einheit der Ge-

⁷ Vgl. Jaeger 2011, 54.



Abb. 77: Christo Obrero - Kirche, Baustellenfoto



Abb. 78: Christo Obrero - Kirche, Innenraum

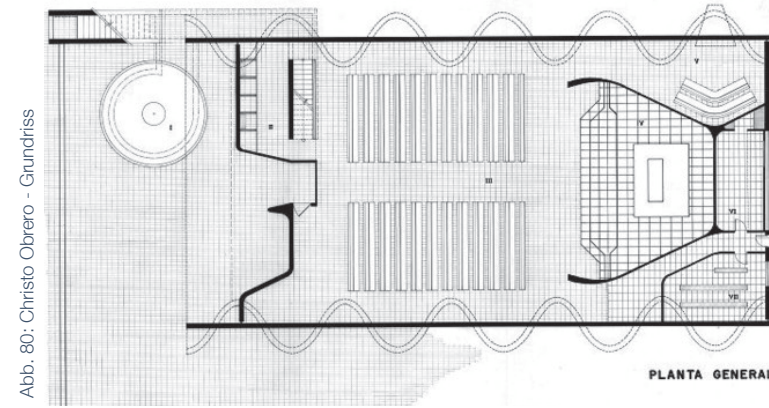


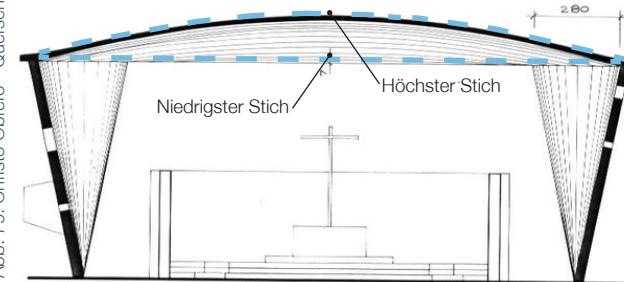
Abb. 80: Christo Obrero - Grundriss

meinde darstellt.⁸

Alle Decken und Wände der Kirche sind mit Ziegeln gemauert, wobei das Mauerwerk bei allen Elementen sichtbar ist. Die Konstruktionsweise ist eine Weiterentwicklung und Verbindung von Methoden, die Dieste bereits bei anderen Gebäuden, wie Fabriken oder Sporthallen eingesetzt hat. Durch die Verwendung von Bewehrung und geeignetem Mörtel wird der Ziegel zu einem aktiven strukturellen Element. Diese Konstruktionsweise macht es möglich, komplexe Geometrien, wie die doppelt gekrümmte Wand der Kirche, mit niedrigen Kosten herzustellen. Der Bau erstreckt sich mit

einer Höhe von ca. 9 m über eine Grundfläche von 16 x 30 m. Die Wände in Längsrichtung folgen am Boden einer Linie und entwickeln sich nach oben hin zunehmend zu einer Sinuswelle. Um diese Form zu konstruieren, wurden Kabel zwischen dem geraden Ursprung und dem sinusförmigen Abschluss der Mauer gespannt (Abb. 77). Somit konnten die Maurer diesen Führungslinien folgen und die doppelt gekrümmte Fläche einfach herstellen. Die 30 cm dicke Wand ist mit 3 mm starken Stahldrähten bewehrt. Am oberen Ende verläuft eine Art horizontaler Balken, der eine Traufe ausformt und den Schub des Gewölbes aufnimmt. Aus ökonomischen Gründen wurde die Dachschale durch die Addition identischer Bögen konstruiert. Das Dach aus be-

Abb. 79: Christo Obrero - Querschnitt



wehrt Mauerwerk hat die Form einer Gauss'schen Schale mit einer abschließenden Schicht aus porösen Ziegeln, die der Isolation dienen. Die Wellenschale mit dem flachsten Stich von 7 cm bis zum höchsten Stich von 147 cm hat eine maximale Spannweite von 18,80 m und folgt der Kettenlinie (Abb. 79). Die Zugbänder

sind an den Traufenelementen der Wand verankert und können durch die flache Schalengeometrie in den Wellentälern verschwinden. Die Bewehrung der Schale verläuft kreuzweise in den Fugen zwischen den Steinen.⁹ Die Tragwirkung der Konstruktion ist hybrid und liegt irgendwo zwischen Bogen und Balken. Das Auflager wirkt wie ein Ringanker, der die anfallenden Schubkräfte in die Zugbänder weiterleitet.¹⁰

Eladio Dieste schaffte auch in diesem Bauwerk eine starke Einheit von Struktur, Form und Material. Durch die Verbindung von Keramik und Stahl entwickelte er

⁸ Vgl. Consejería de Obras Públicas y Transportes Andalucía 1996, 153.

⁹ Vgl. Consejería de Obras Públicas y Transportes Andalucía 1996, 164-165

¹⁰ Vgl. Jaeger 2011, 54.



Abb. 81: Caputto Fruit Plant, Salto, Uruguay

das Mauerwerk zu einem Schalentragsystem, das auch Vorteile gegenüber dem Stahlbeton aufweisen kann. Das Bausystem ist wirtschaftlich sehr effektiv und stellt vor allem in ärmeren Ländern eine kostengünstige Alternative zum Stahlbeton dar. Dieste erwähnte immer wieder das ungeheure Potential des Ziegels und sah in diesem Material große Vorteile, wenn es in Verbindung mit zugfesten Elementen verwendet wird. Er war der Meinung, die moderne Forschung würde sich diesem Thema viel zu wenig widmen. In seinen vielen, weit spannenden keramischen Schalentragsystemen, wird dieses Potenzial sichtbar. Sie zeigen jedoch auch, dass nicht viele Ingenieure seiner konstruktiven, keramischen Technologie folgten, auch wenn sie vielversprechend wirkt.



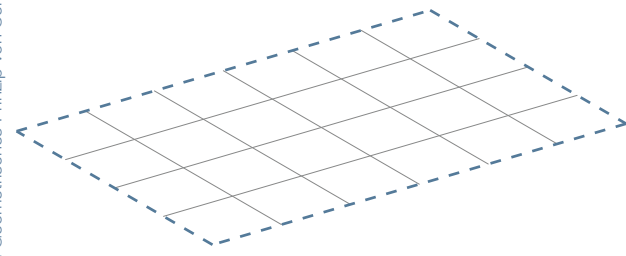
Das entwickelte keramische Bausystem basiert auf einem geometrischen Prinzip, welchem drei Grundparameter zugrundeliegen: Raster, Schnittgeometrie und Modulgeometrie. Diese drei Komponenten bestimmen die Eigenschaften der generierten Tragstruktur und sind eng miteinander verwoben. Über die Veränderung dieser Grundparameter können verschiedene Systemvariationen mit bestimmten Eigenschaften entwickelt werden.

Das „Ceramic Translation“ - Bausystem

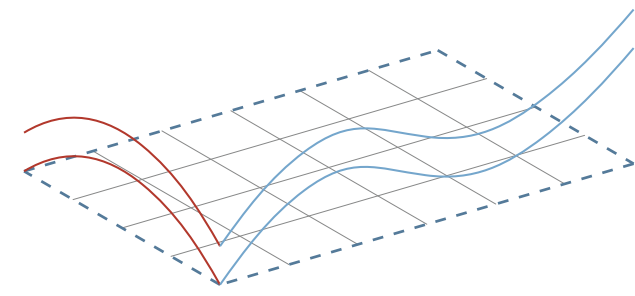
Abb. 82: Hochlochziegel in verschiedenen Formaten

Geometrisches Prinzip von „Ceramic Translation“

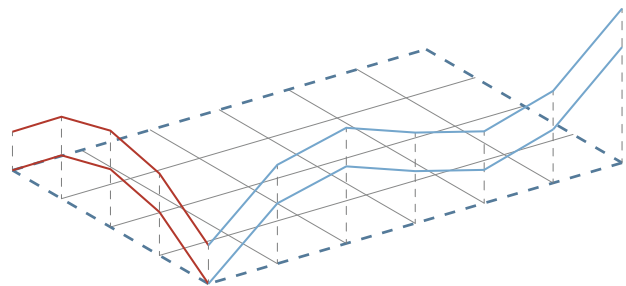
Abb. 83: Geometrisches Prinzip von Ceramic Translation



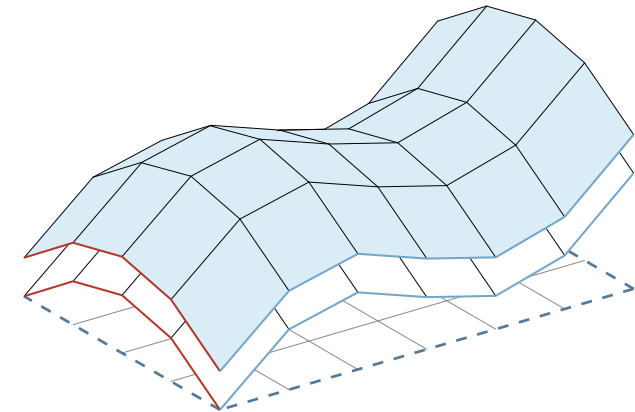
1. Festlegen der Grundfläche und des Rasters



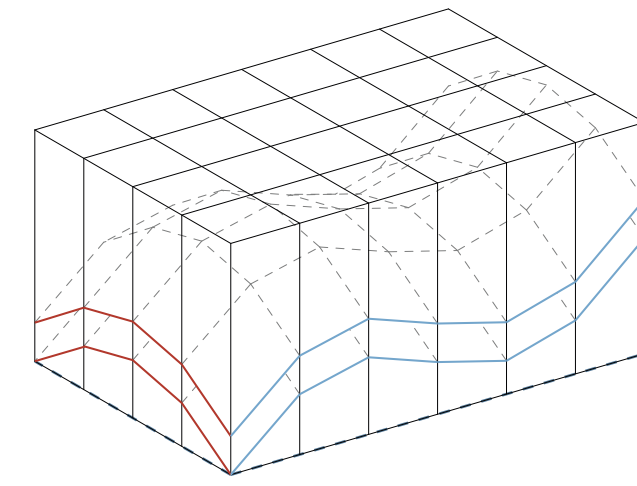
2. Randkurven erzeugen



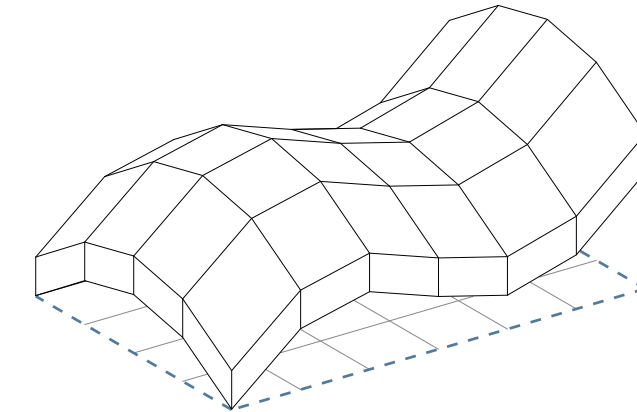
3. Randkurven in Abhängigkeit des Rasters linearisieren



4. Obere und untere Schnittfläche erzeugen



5. Modulraster extrudieren

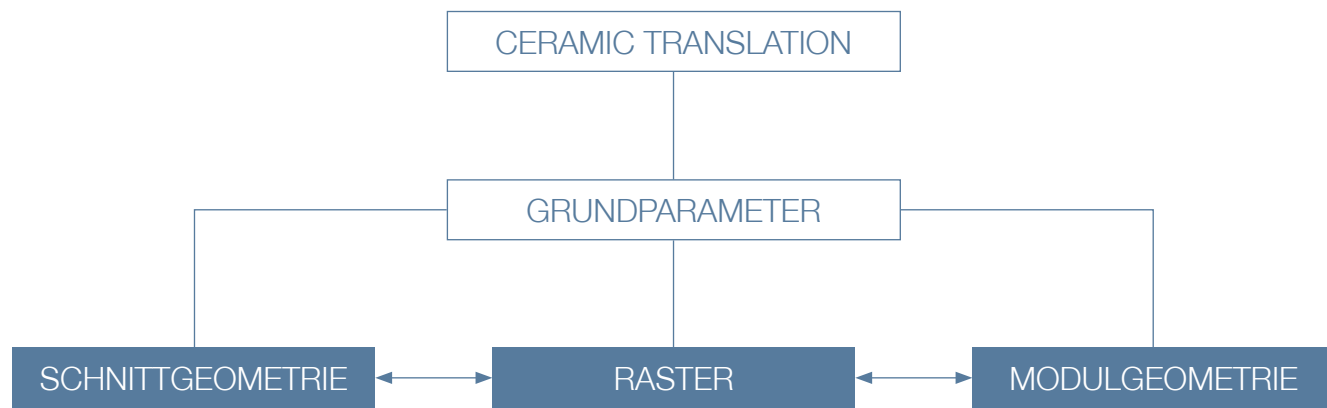


6. Modulstränge mit Schnittflächen schneiden

Generieren einer Tragstruktur nach dem „Ceramic Translation“ - Prinzip.

Das entwickelte Bausystem funktioniert nach einem geometrischen Prinzip mit dem Tragwerksgeometrien in sechs Schritten generiert werden.

1. Die gewünschte Grundrissfläche des Tragwerks wird festgelegt und gerastert.
2. Entlang der Grundrissgrenzen werden jeweils zwei Randkurven für die obere und die untere Schnittfläche erzeugt, welche die Tragwerksgeometrie bestimmen.
3. Die Randkurven werden in Abhängigkeit des Rasters linearisiert. Das bedeutet die Kurven werden in bestimmten Abständen in lineare Polylinien umgewandelt.
4. Durch die Extrusion einer Randkurve entlang der Anderen entsteht eine Schnittfläche in Form einer Translationsgeometrie. Beide Schnittflächen zusammen werden als Schnittgeometrie bezeichnet.
5. Alle Rasterflächen der Grundfläche werden vertikal extrudiert, wodurch die Modulstränge entstehen.
6. Die Modulstränge werden mit den beiden Schnittflächen getrimmt.

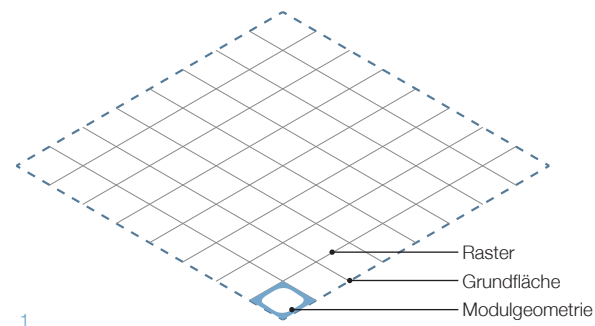


Grundparameter

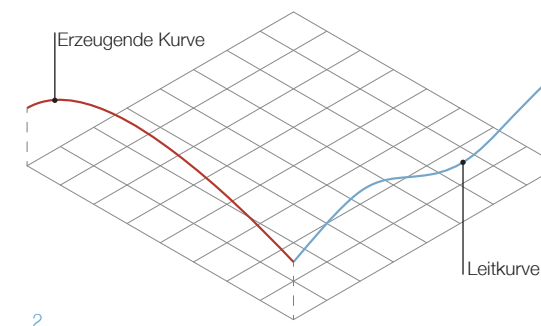
Das geometrische Grundprinzip von „Ceramic Translation“ basiert auf drei Grundparametern. Raster, Schnittgeometrie und Modulgeometrie bestimmen bautechnische und gestalterische Eigenschaften der keramischen Tragstrukturen und stellen die grundlegenden Planungswerkzeuge des „Ceramic Translation“-Bausystems dar. Die Parameter stehen in Bezug zueinander, wodurch auch Abhängigkeiten entstehen. Bei einer Veränderung innerhalb eines Grundparameters müssen daher oft andere Systemelemente an diese

angepasst werden. Um in der Planung Fehler zu vermeiden, muss das System immer gesamtheitlich betrachtet werden.

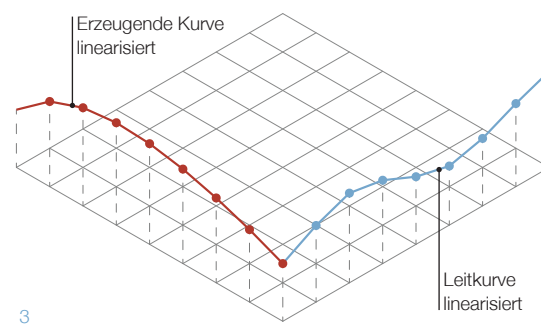
Um mögliche Ausformungsvarianten des Bausystems darzustellen, werden die Grundparameter näher betrachtet und verschiedenen Veränderungen unterzogen. Diese Varianten zeigen, wie man das Bausystem kontrolliert, um gegebene Anforderungen an das Bauwerk zu erfüllen.



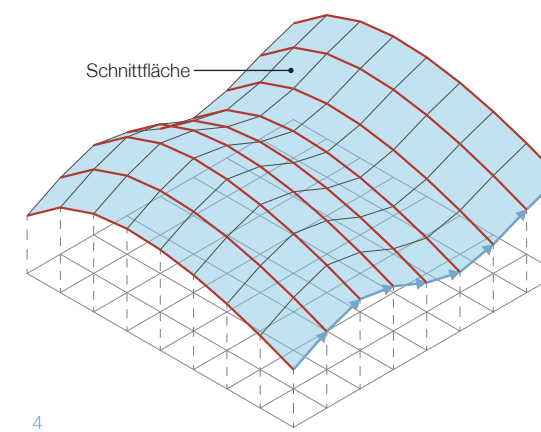
1



2



3



4

Raster

Um „Ceramic Translation“-Tragstrukturen zu generieren, wird die zu überspannende Grundrissfläche gerastert. Dieser Raster bestimmt die Modulgröße und beeinflusst die Linearisierung der Randkurven. Der Raster wird in Maß und Form durch die Grundrissgeometrie sowie durch bauliche Anforderungen beeinflusst. So kann durch das Maß der Rasterfelder z.B. die Modu-

lanzahl, das Erscheinungsbild und das Tragverhalten bewusst gesteuert werden. Der Raster steht in direkter Wechselwirkung mit Schnitt- und Modulgeometrie und ist somit das verbindende Glied zwischen den drei Grundparametern.

Abb. 84: Generieren der Schnittfläche in Abhängigkeit des Rasters

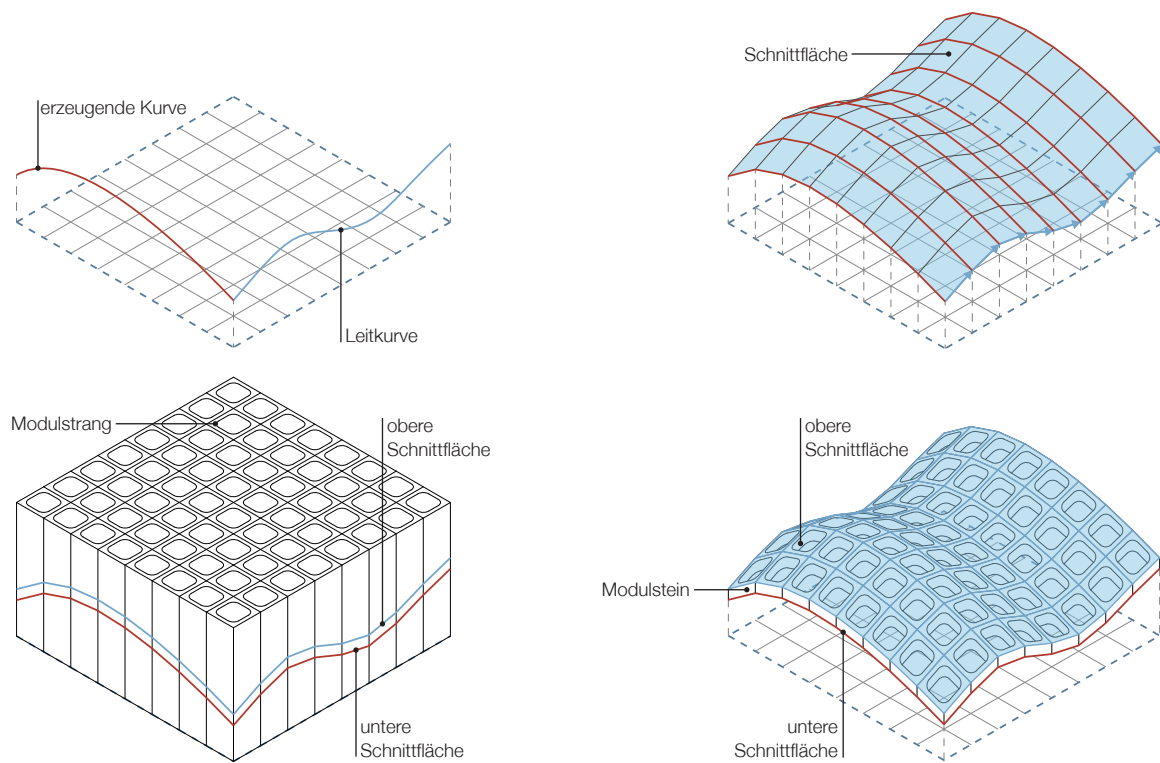


Abb. 85: Generieren einer Schnittfläche und schneiden des Modulstranges

Schnittgeometrie

Über diesen Grundparameter wird die Geometrie einer Tragstruktur, vor allem die Krümmung, bestimmt. Die Schnittgeometrie besteht aus einer oberen und einer unteren Schnittfläche, welche über die beiden Randkurven (Leitkurve und erzeugende Kurve) erstellt werden. Die Formgebung dieser Kurven ist von statischen sowie gestalterischen Anforderungen abhängig. Über die beiden Schnittflächen wird die Konstruktionshöhe

der Modulsteine definiert. Diese Translationsflächen können sich in ihrer Geometrie unterscheiden, wodurch punktuelle Veränderungen in der Konstruktionshöhe möglich sind. Im Bausystem wird die Schnittgeometrie hauptsächlich durch die Ausformung des Rasters beeinflusst.

Modulgeometrie in Abhängigkeit des Rasters

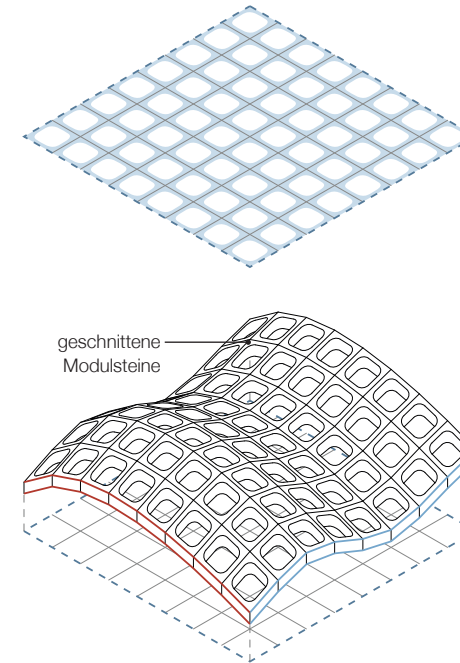
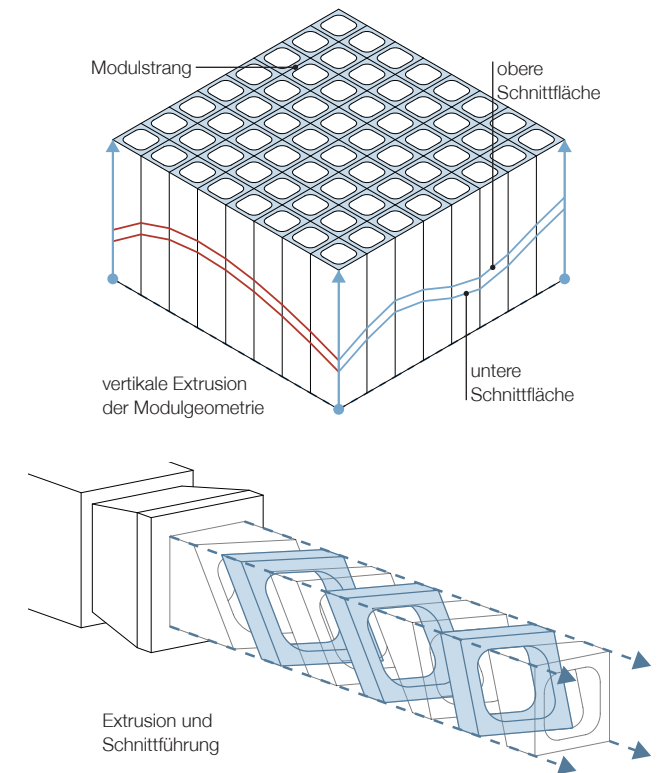


Abb. 86: Extrudieren und schneiden des Modulstranges

Modulgeometrie

Über die Modulgeometrie wird vor allem die Querschnittsform des Extrusionsstrangs festgelegt, aus welchem die Modulsteine geschnitten werden. Durch die Herstellung mittels Strangpressverfahren kann die Modulgeometrie bei vergleichsweise niedrigem Aufwand komplexe Formen annehmen. Die Querschnittsgröße der Module ist durch das Extrusionsverfahren begrenzt (siehe S 80). Weiters sind Geometrien mit



einer kleineren Stegbreite als 5 mm schwierig herzustellen, da sich solch dünne Strukturen vor allem beim Schneidvorgang ungewollt verformen können. Die Querschnittsformen werden in Abhängigkeit baulicher und gestalterischer Anforderungen gewählt und bieten in ihren Ausformungsmöglichkeiten einen hohen Individualisierungsgrad. Die Modulgeometrie steht im Bausystem in direkter Verbindung zum Raster. Eine „Ceramic Translation“ - Tragstruktur kann sowohl eine einzige, als auch mehrere Modulgeometrien beinhalten.

3

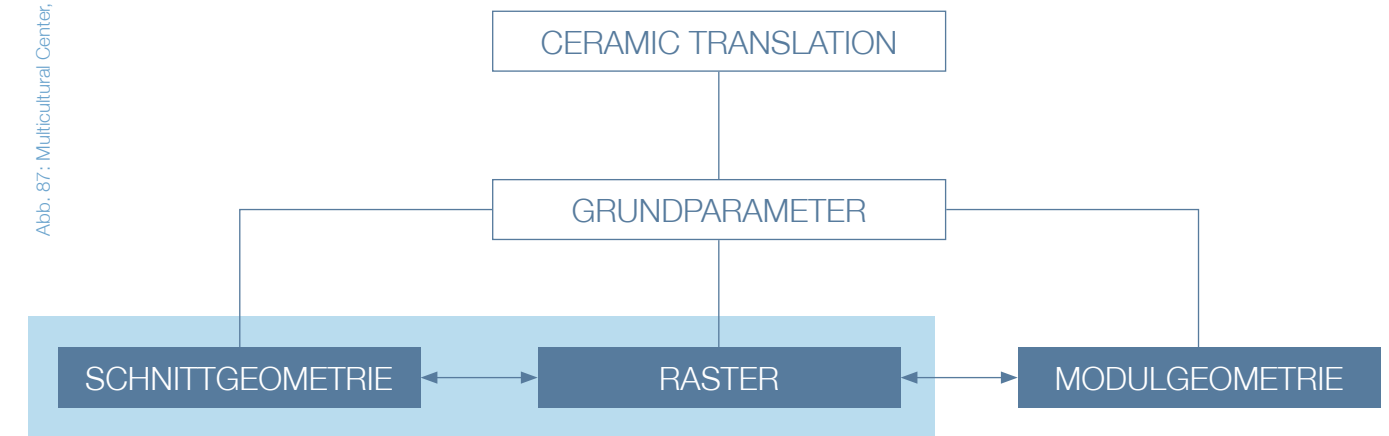
Durch das geometrische Prinzip können „Ceramic Translation“ - Tragstrukturen verschiedenste Formen annehmen. Die Ausformungsvarianten der Tragstrukturen in Kapitel drei zeigen, wie über die Grundparameter Raster und Schnittgeometrie, das Bausystem gesteuert werden kann, um statische und gestalterische Anforderungen an das Bauwerk zu erfüllen

Ausformungsvarianten von „Ceramic Translation“ - Tragstrukturen

Abb. 87: Multicultural Center, Amsterdam, Marlies Rohmer

Formgebende Parameter für Tragwerksgeometrien

3.1



Formgebung durch Raster und Schnittgeometrie

Die geometrische Ausformung einer „Ceramic Translation“ - Tragstruktur wird hauptsächlich über den Raster und die Schnittgeometrie definiert. Im Grundriss ist die Tragwerksform vom gewählten Modulraster abhängig. Das Rastermaß legt die Modulgröße fest und beeinflusst den Linearisierungsgrad der Randkurven. Die Krümmung der Tragwerksgeometrie sowie die Materialstärke wird über die beiden Schnittflächen definiert.

Diese formgebenden Parameter, Raster und Schnittgeometrie, bieten eine Vielzahl an Variationsmöglichkeiten, um mit „Ceramic Translation“ ein breites Anwendungsfeld abdecken zu können. Vor allem die Reaktion auf bautechnische und gestalterische Anforderungen in der Planung wird durch diese Ausformungsvarianten möglich.

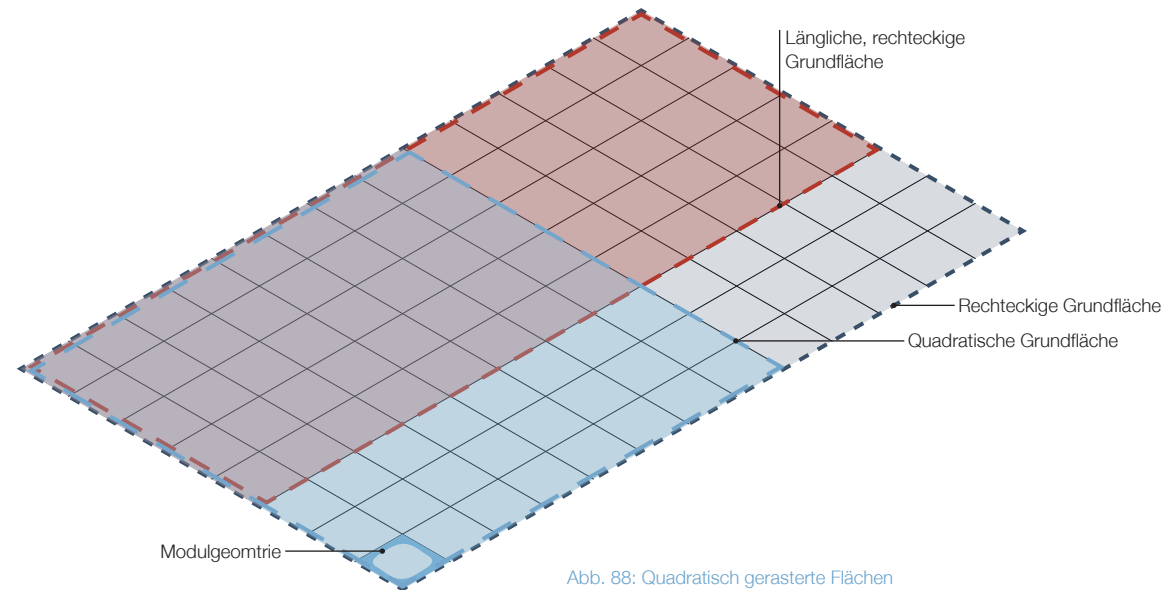


Abb. 88: Quadratisch gerasterte Flächen

Orthogonaler, quadratischer Raster

Vor allem bei quadratischen Grundflächen bietet es sich an, einen orthogonalen quadratischen Raster zu wählen. Auch für Tragwerke mit ähnlichen oder gleichen statischen Anforderungen in beide Spannrichtungen liegt es nahe, diese Form der Rasterung zu wählen. Durch den quadratischen Modulquerschnitt können auch die Keramik - Module so geformt sein, dass sie eine gleichmäßige Tragfähigkeit in beide Spannrichtungen aufweisen. Außerdem können alle Steine dieselbe Modulgeometrie besitzen, und somit mit einer einzigen Matrizenform hergestellt werden. Natürlich können

auch Tragwerke mit rechteckiger Grundfläche (Abb.: 89) quadratisch gerastert werden, was aber auch Nachteile mit sich bringen kann. Längliche Tragstrukturen spannen in eine Richtung oft um ein Vielfaches weiter, als in die andere. So entstehen in den verschiedenen Spannrichtungen unterschiedliche Anforderungen an die Tragfähigkeit der Module.

Abb. 89: Tragwerk mit rechteckigem Grundriss

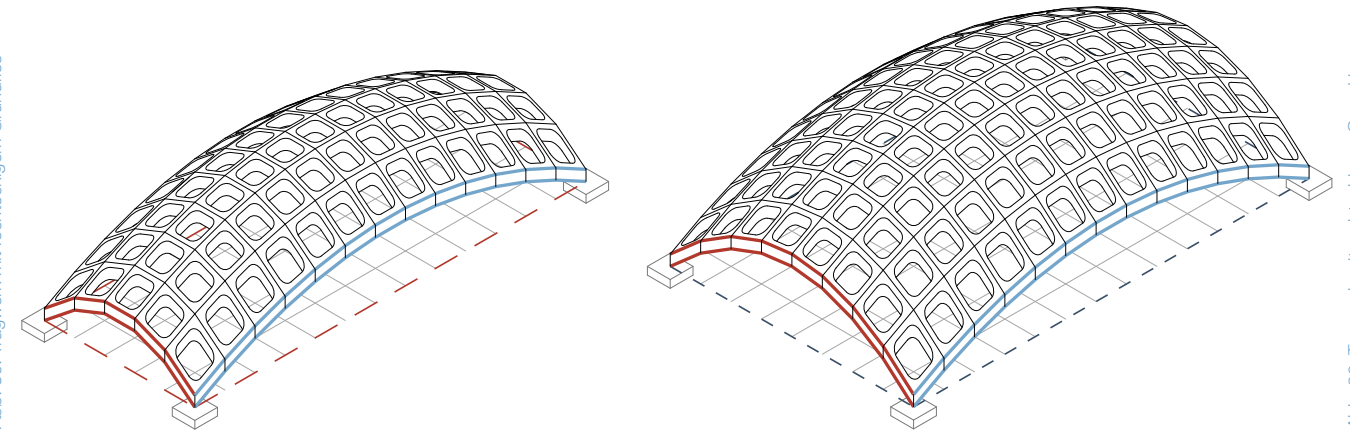


Abb. 90: Tragwerk mit rechteckigem Grundriss

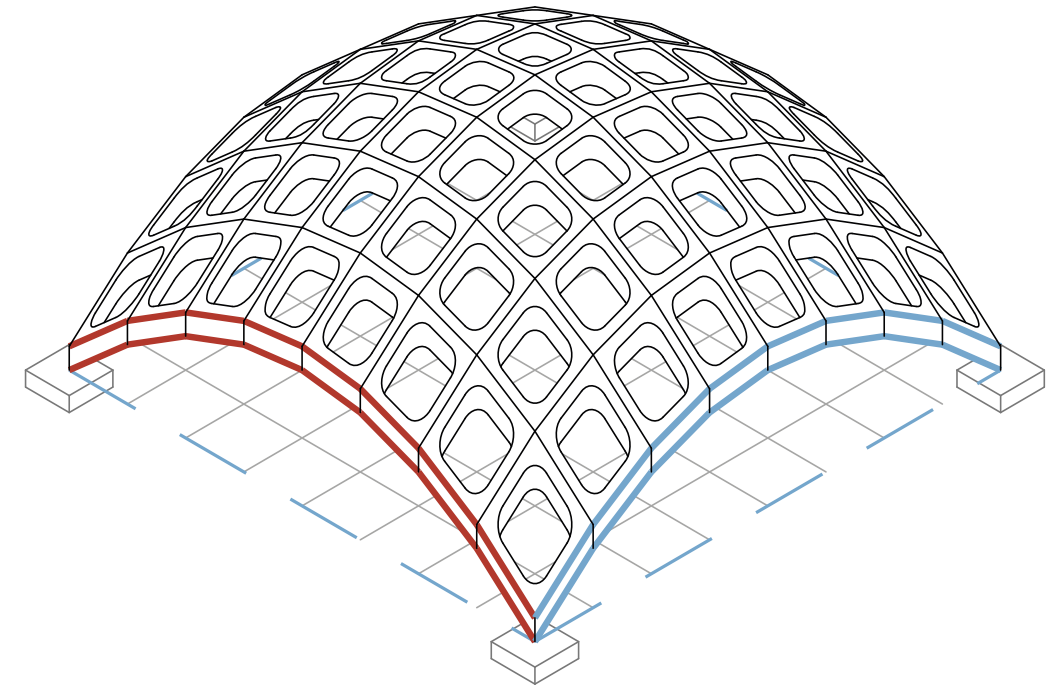


Abb. 91: Tragwerk mit quadratischem Grundriss

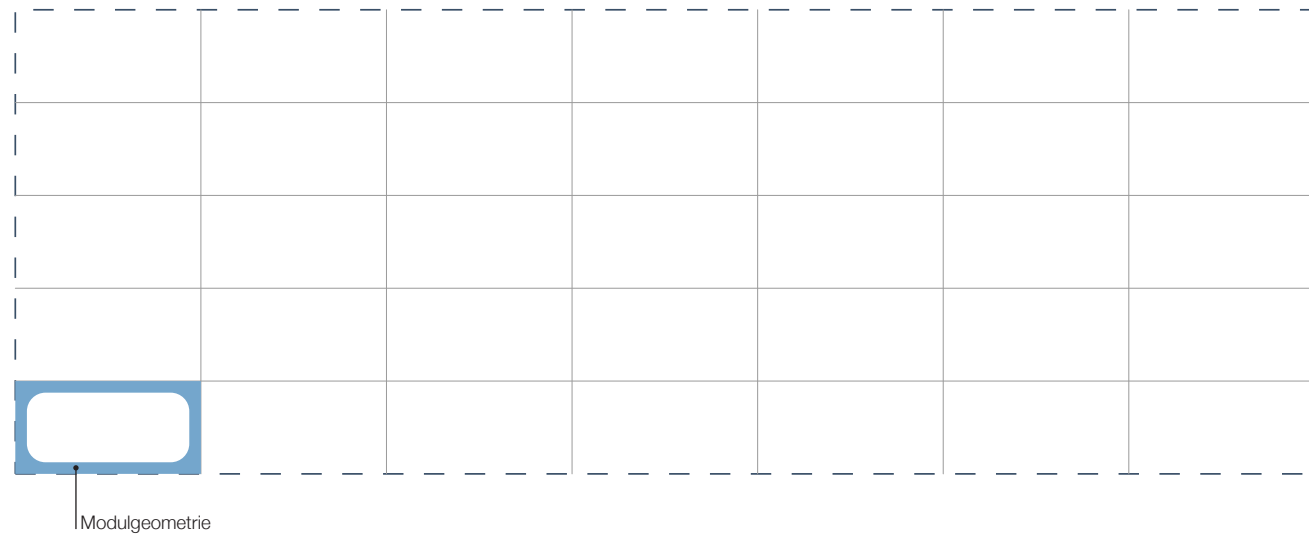


Abb. 92: Rechteckiger Raster

Orthogonaler, rechteckiger Raster

Die Ausformung und Größe von Modulsteinen wird über die Abmessungen des Modulrasters stark beeinflusst. Dieser Raster kann in Abhängigkeit statischer Anforderungen gewählt werden. Durch diese Anpassungsmöglichkeit der Rastermaße kann zum Beispiel die Spannrichtung einer Tragstruktur Einfluss auf die Steinform nehmen. Das Tragwerk in Abb. 93 wird in eine Spannrichtung wesentlich stärker beansprucht, wodurch sich auch die Anforderungen an die Modulsteine je nach Spannrichtung unterscheiden. Um auf diese Umstände zu reagieren, wird der Rasterabstand

in eine Richtung vergrößert, und in die andere verringert. Es entstehen längliche, rechteckige Steine, die der Tragstruktur, in der primären Spannrichtung, mehrere enger aneinander liegende Rippen verleihen. So kann das Tragverhalten den statischen Anforderungen angepasst werden.

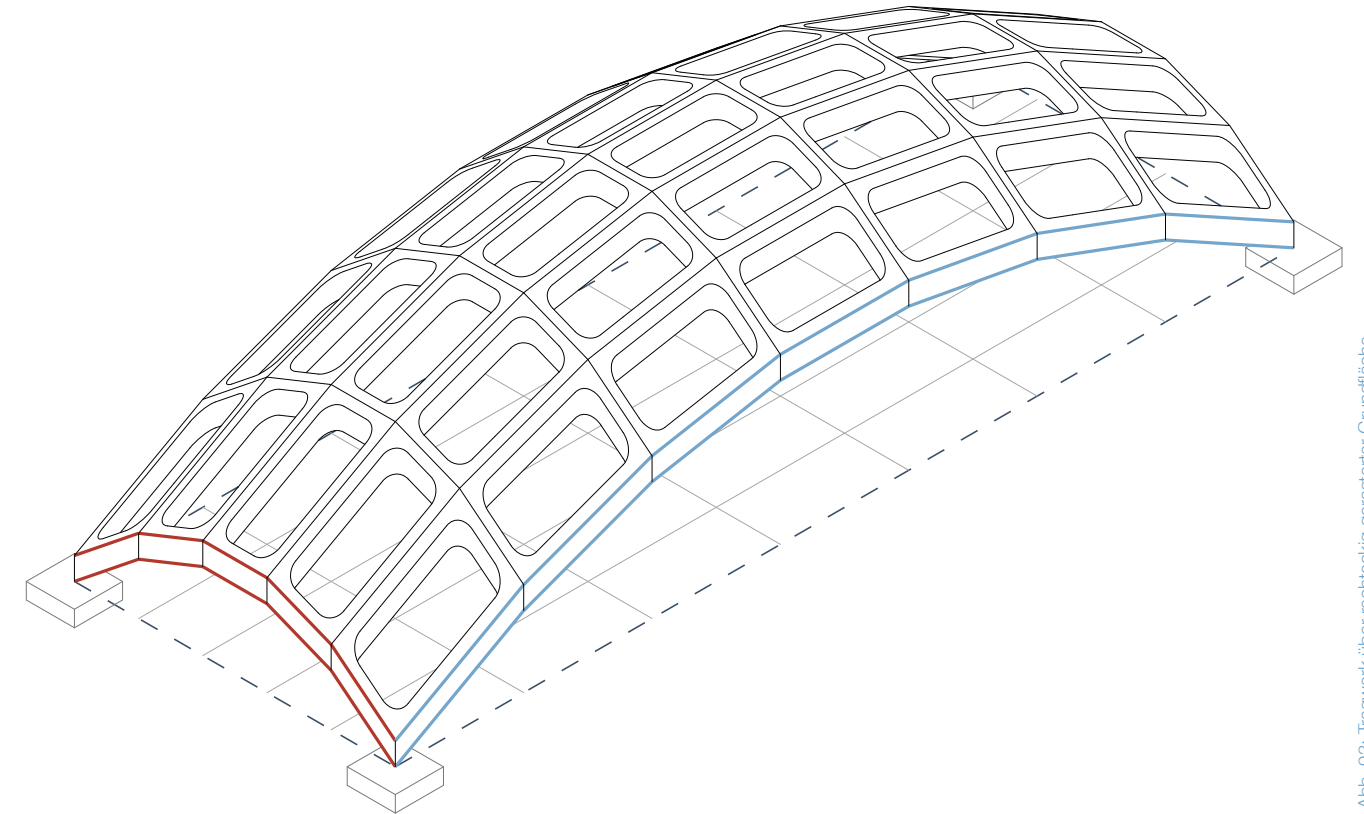


Abb. 93: Tragwerk über rechteckig gerasterter Grundfläche

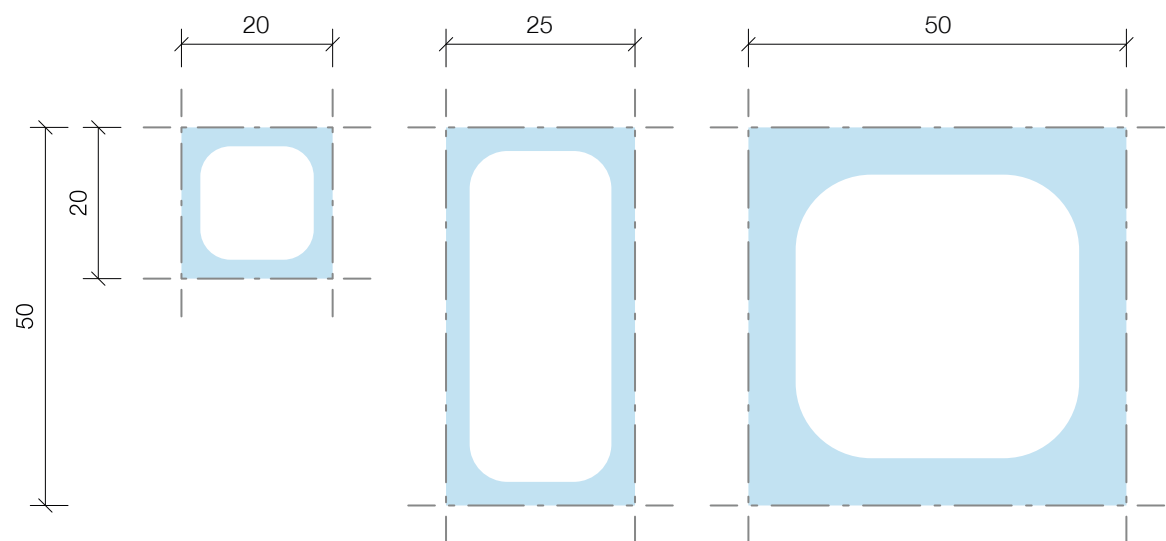


Abb. 94: Maximale und minimale Raster- bzw Modulgröße | M=1:10

Raster- und Modulgröße

Die Steingröße beziehungsweise Rastergröße wird im „Ceramic Translation“ - Bausystem von mehreren Faktoren beeinflusst. Statische, produktionsbedingte, und gestalterische Anforderungen spielen dabei eine Rolle. Im Teil I, Tragwerksentwurf und Konstruktion, der Masterarbeit werden die Einflüsse der Modulgröße auf die Tragfähigkeit des Systems näher behandelt. Eine Grundlage für die Bestimmung der Steingröße stellt die Herstellungsweise dar. „Ceramic Translation“ basiert auf dem Prinzip der Tonextrusion mittels Strangpresse. Diese Maschinen sind in der Herstellung von Profilen im Querschnitt begrenzt, wodurch auch die Modulgröße begrenzt wird. Auch die industrielle Fertigung von

Hochlochziegeln erfolgt über das Strangpressverfahren. Der maximale Querschnitt dieser Steine beträgt 50 x 25cm. Bei einem händischen versetzen der Modulsteinen sollte deren Größe und das Gewicht auch eine praktische Handhabung während der Ausführung von „Ceramic Translation“ - Konstruktionen gewährleisten. Das Rastermaß beeinflusst die Linearisierung der Randkurven, wodurch die Ausformung von Tragstrukturen mitbestimmt wird. Je kleiner die Rasterflächen sind, umso weicher und runder können Krümmungen mit dem Bausystem geformt werden. Mit der Verkleinerung des Rastermaßes steigt aber auch die Stein- und Knotenanzahl, wodurch der Aufwand in der Herstel-

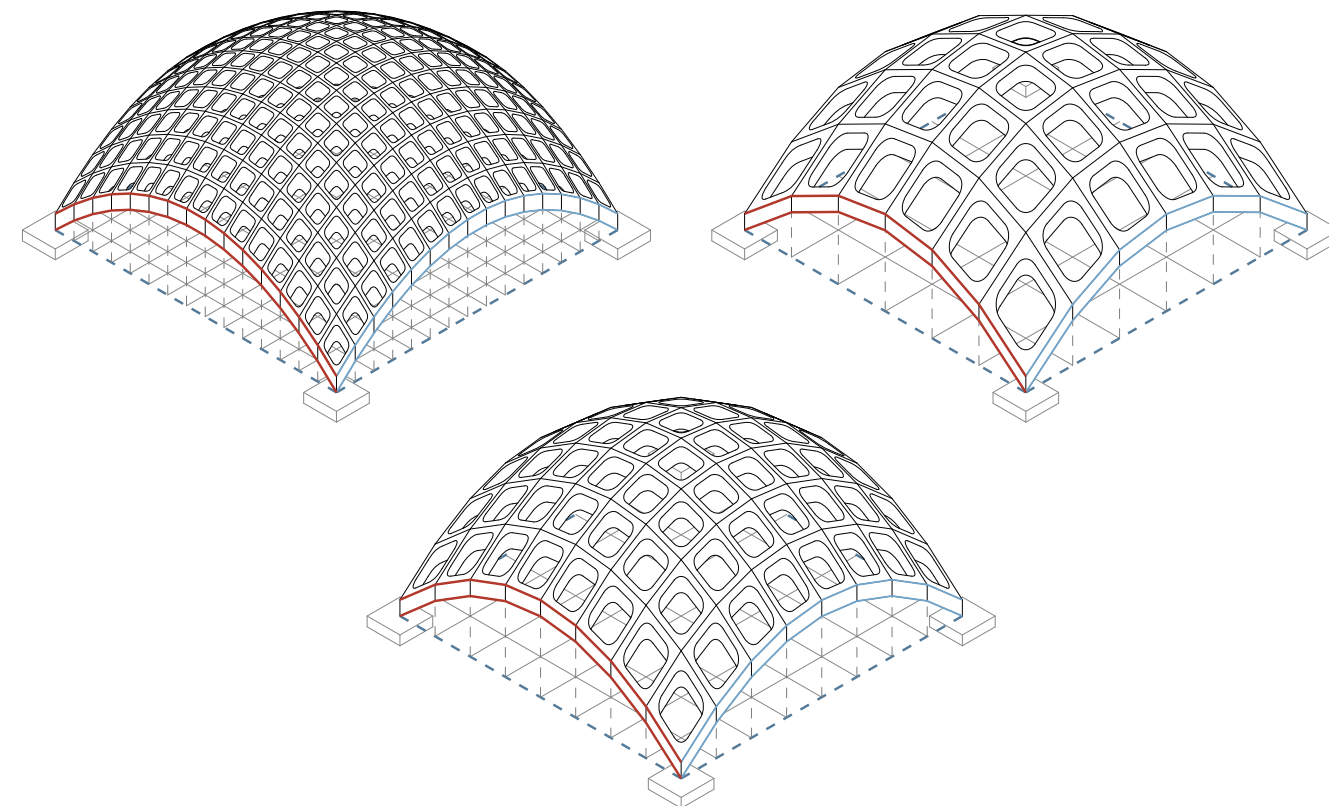


Abb. 95: Drei Kuppeln mit verschiedenen Rastermaßen

lung steigt. Aufgrund dieser Anforderungen kann das Rastermaß und somit der Modulquerschnitt, zwischen einer Mindestgröße von 20cm und einer Maximalgröße von 50cm, in beiden Achsrichtungen individuell gewählt werden. Abb.: 95 zeigt drei quadratische Kuppeln mit einer Größe von 3x3m. Das Rastermaß beträgt bei der ersten Kuppel 20cm, bei der zweiten 50cm, und bei der dritten 37,5cm.

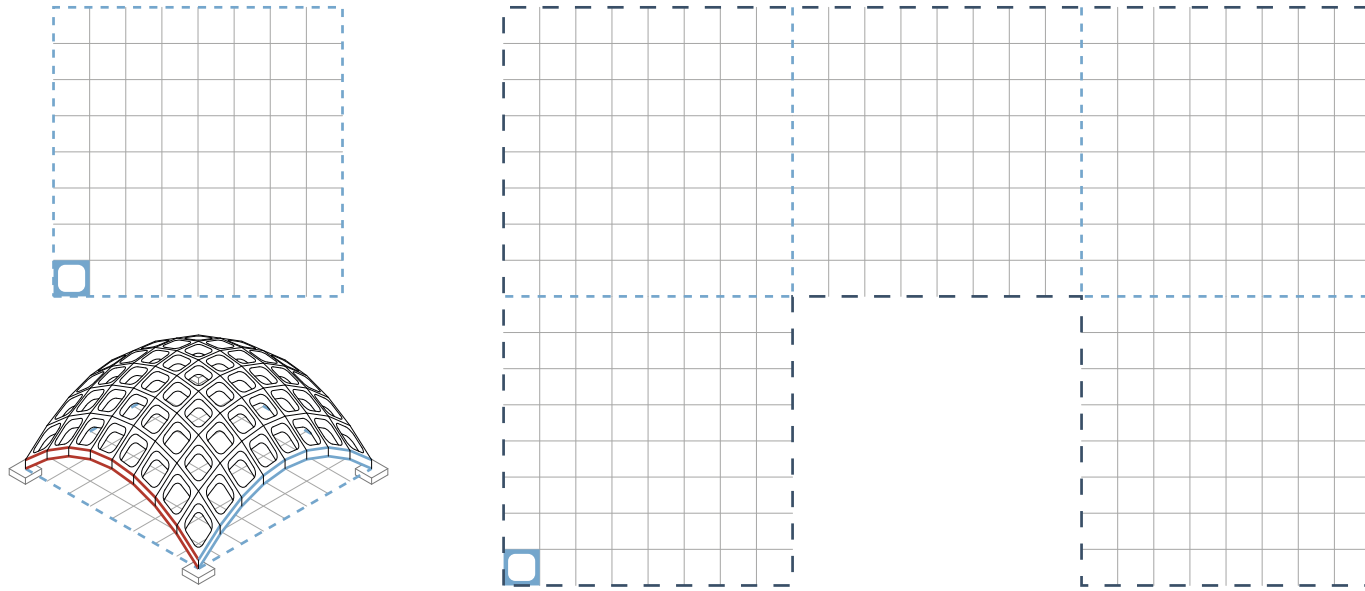


Abb. 96: Addition der gerasterten Grundfläche

Addition gerasterter Grundflächen

Die zuvor gezeigten Varianten zeigen immer Tragstrukturen über quadratischer oder rechteckiger Grundfläche. Es ist jedoch auf mehrere Arten möglich, komplexere, orthogonal gerasterte Grundrissflächen mit diesem Bausystem zu überspannen. Will man jedoch das Prinzip einer einzigen Modulgeometrie beibehalten, ist die Grundrissform immer dem orthogonalen Modulraster unterworfen. Wäre das nicht der Fall, müsste das System durch zusätzliche Sondersteine wie z.B. Randsteine ergänzt werden.

Eine Möglichkeit, komplexere Grundrissformen zu erzeugen, wäre die Addition mehrerer einzelner Tragstrukturen. In Abb.: 96 wird eine Kuppel über quadratischem Grundriss und quadratischem Raster vervielfältigt und aneinander gereiht. So kann unter Verwendung eines orthogonalen Rasters nicht nur im Grundriss, sondern auch formal, eine höhere Komplexität erreicht werden.

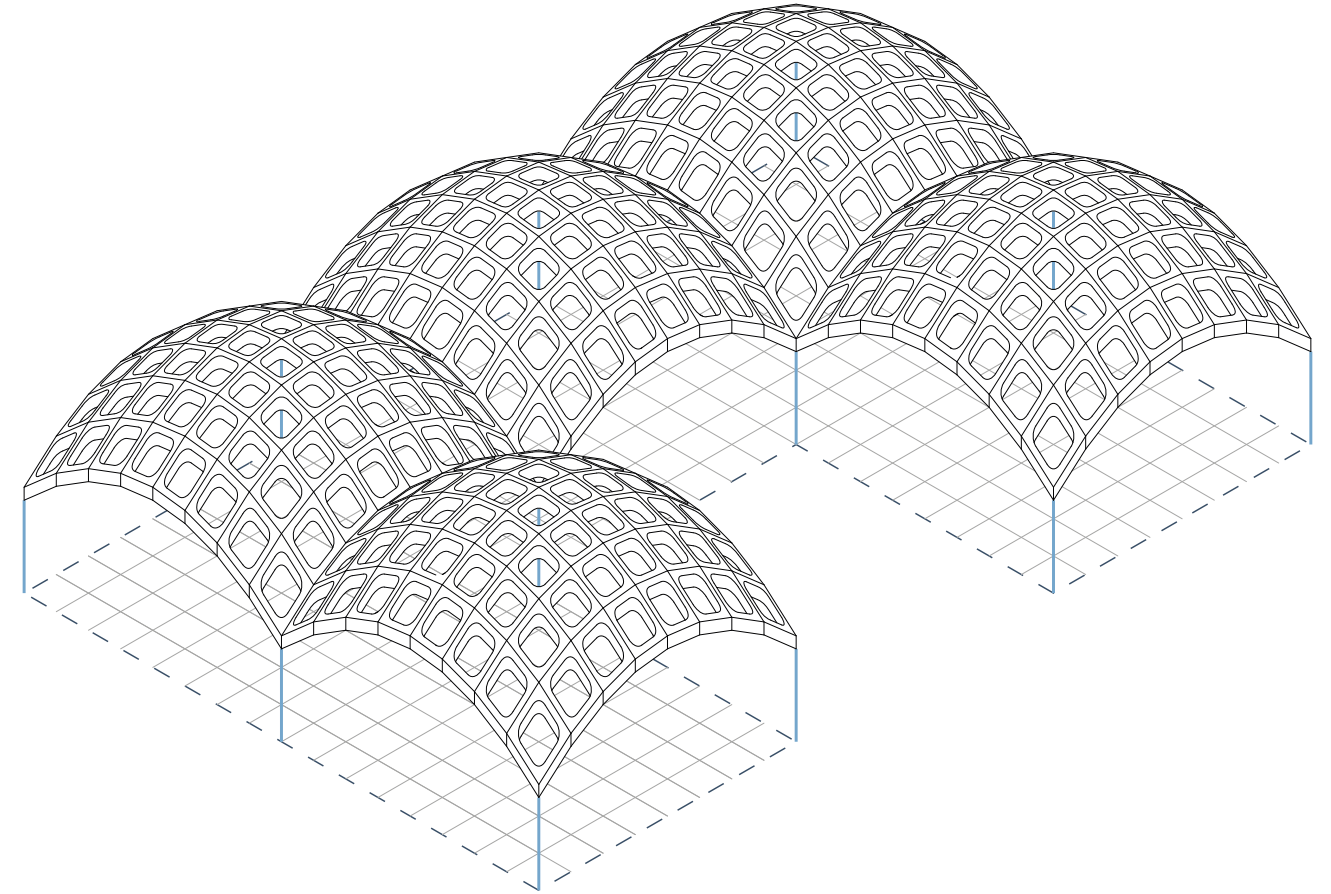
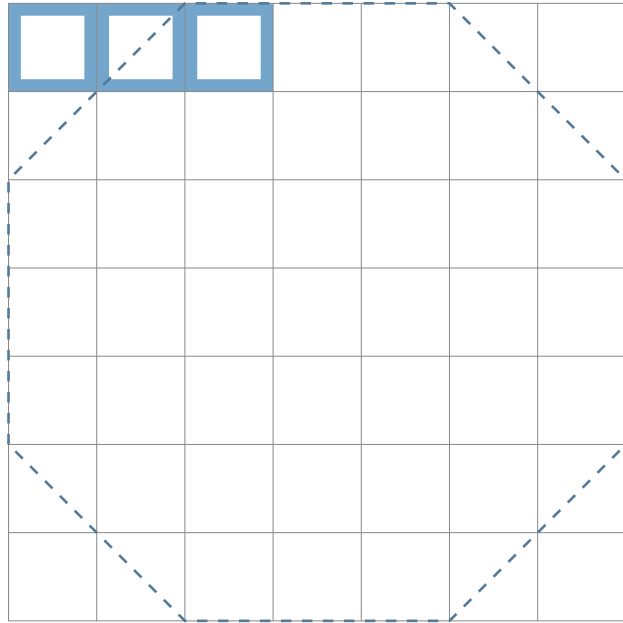
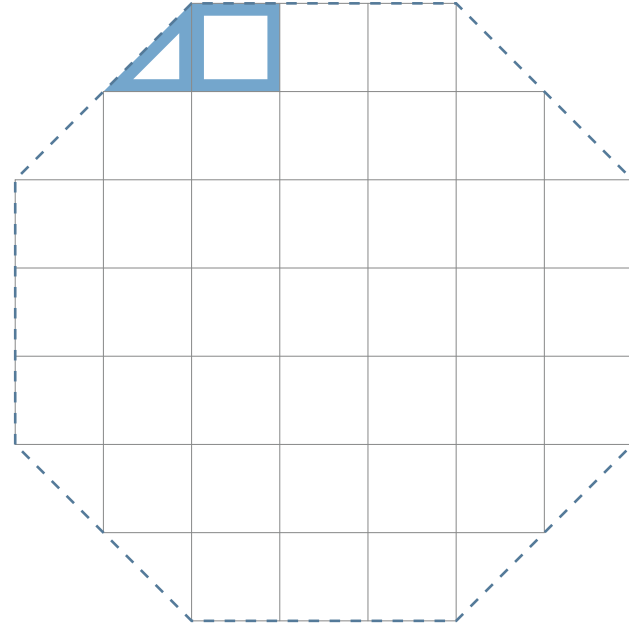


Abb. 97: Addition einzelner Tragstrukturen

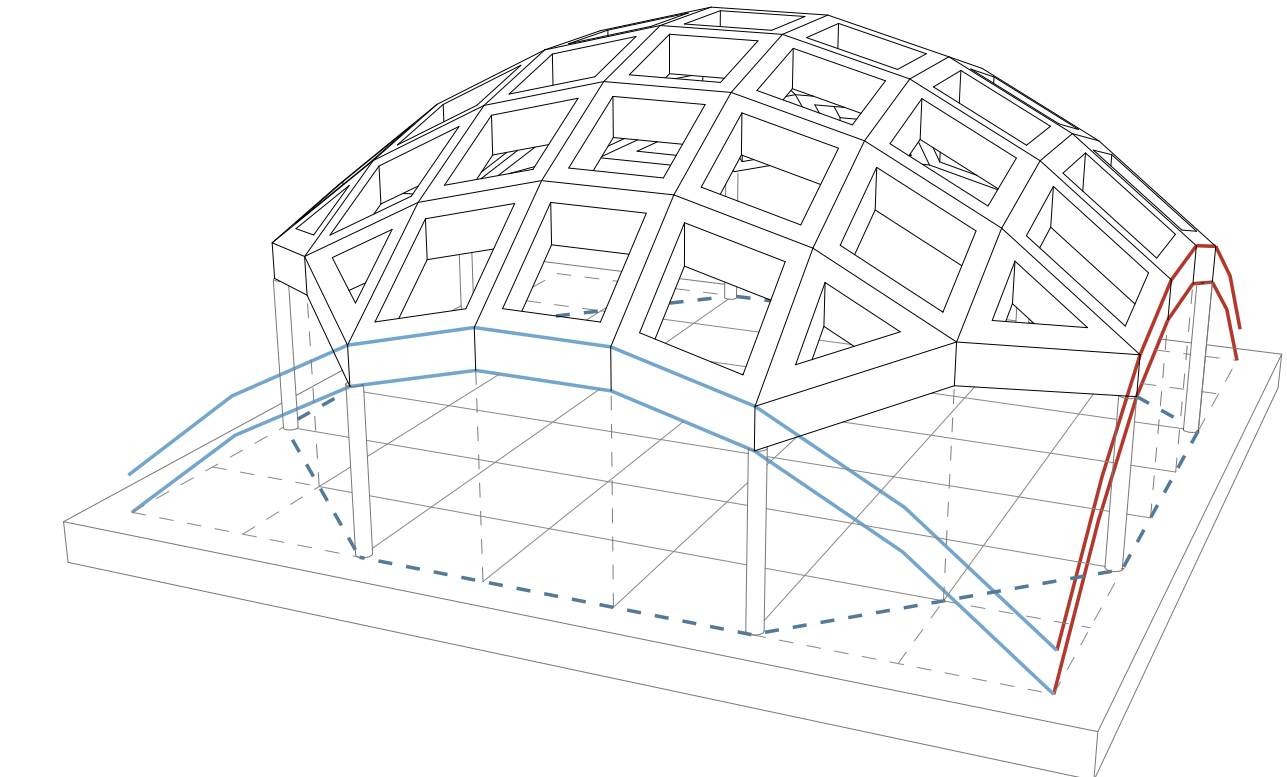
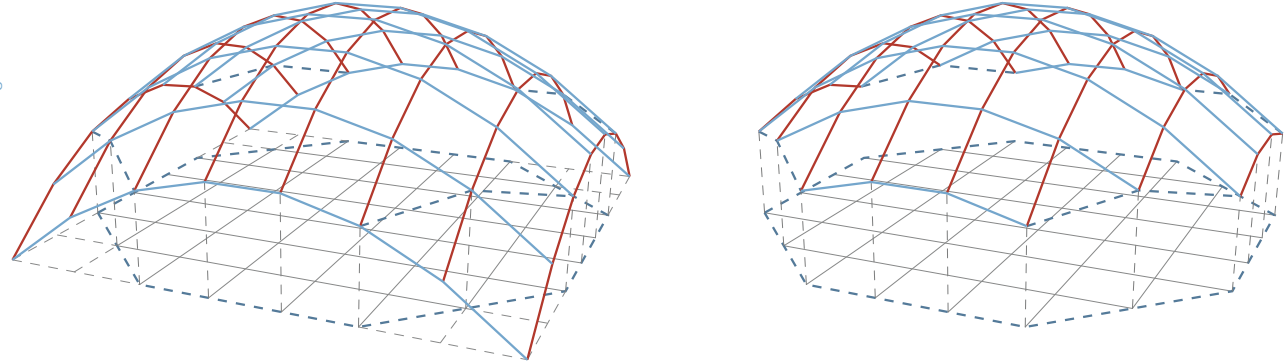


Trimmen von gerasterten Grundflächen

Fügt man dem System weitere Modulgeometrien hinzu, ist es möglich, orthogonal gerasterte Grundflächen zu verwenden, die in ihrer Form nicht zwingend den Rasterlinien folgen müssen. In Abb.: 99 wird der Raster diagonal getrimmt, wodurch Modulsteine mit dreieckigem Querschnitt entstehen, mit welchen es möglich ist, ein Tragwerk mit achteckiger Grundrissfläche zu konstruieren. Auch hier wird die Schnittgeometrie über das gesamte gerasterte Quadrat erstellt und danach entlang der Grundrissgrenzen getrimmt (Abb.:



100, 101). Das Einfügen mehrerer Modulgeometrien ist jedoch mit einem höheren Aufwand in der Fertigung verbunden, da bei der Herstellung der Modulsteine für jede Querschnittsform eine Matrize benötigt wird. Dies schwächt ab einer gewissen Anzahl verschiedener Modulgeometrien die Effizienz des Fertigungsprinzips mittels Strangpressverfahren. Außerdem widerspricht es dem Grundgedanken einer wirtschaftlichen Herstellungsweise komplexer Tragstruktur durch die Verwendung eines modularen Systems.



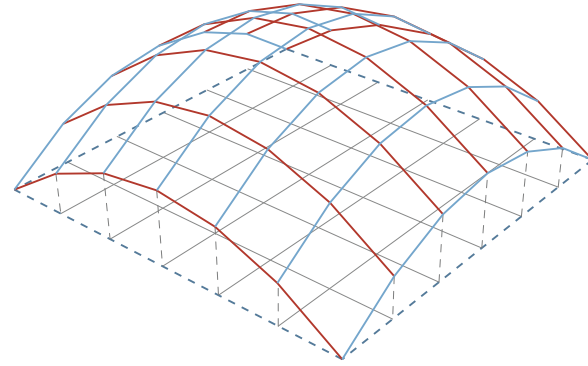
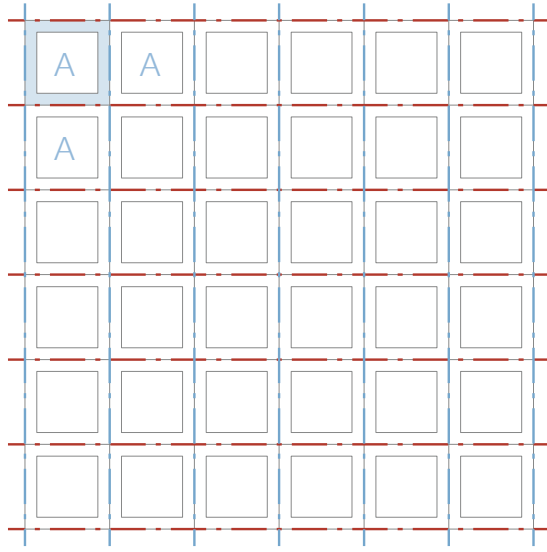


Abb. 104: Translationsgeometrie mit orthogonalem Raster

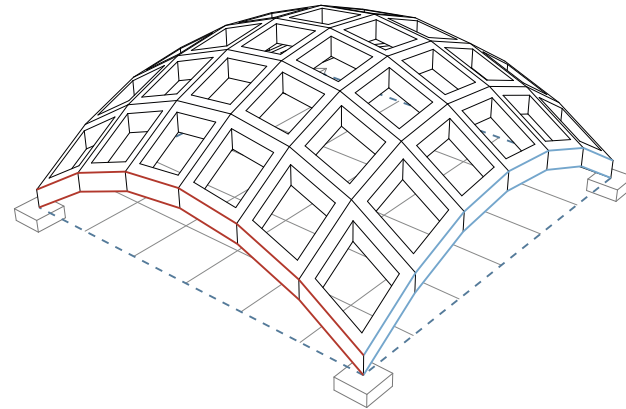


Abb. 105: Tragstruktur mit orthogonalem Raster

Auflösen des orthogonalen Rasters

Orthogonaler Raster | In den vorangehenden Ausführungsbeispielen liegt dem Bausystem immer ein orthogonaler Raster zugrunde. Dadurch ist es möglich, alle Modul- und Knotenelemente aus jeweils demselben Modulprofil herzustellen, wodurch der Herstellungsprozess vereinfacht wird, die Gestalt der Tragstrukturen jedoch formal eingeschränkt werden. So sind die Geometrien von Struktur und Modul im Grundriss auf quadratische und rechteckige Formen begrenzt. Um mehr formale Freiheiten zu erreichen, kann der orthogonale Raster aufgehoben werden.

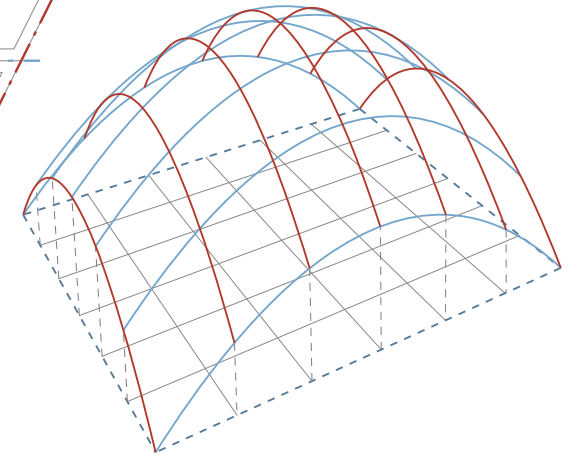
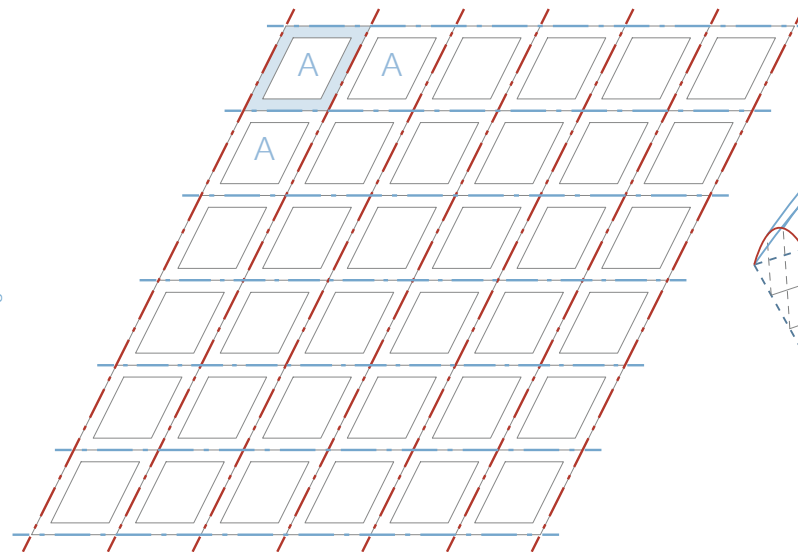


Abb. 107: Dem Raster folgende Translationsgeometrie

Parallelogramm als Raster | Im „Ceramic Translation“-Bausystem ist die Verwendung eines orthogonalen Rasters nicht zwingend nötig. Dieser kann zum Beispiel durch die Drehung einer Achse aufgehoben werden, wodurch Tragstrukturen mit rautenförmigem Grundriss entstehen. Auch die Steine verformen sich durch die Verdrehung im Profil zu Parallelogrammen, bleiben in ihrer Größe jedoch einheitlich. Dieses System besitzt den Vorteil, dass trotz der Aufhebung des orthogonalen Rasters, alle Steine weiterhin aus demselben Modulprofil hergestellt werden können.

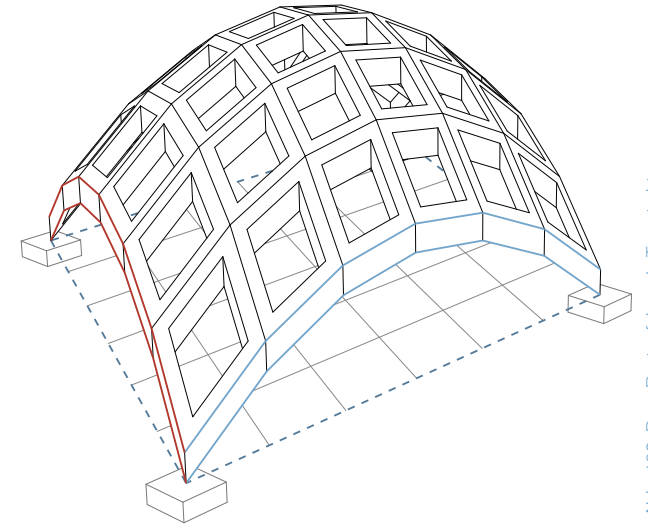


Abb. 108: Dem Raster folgende Tragstruktur

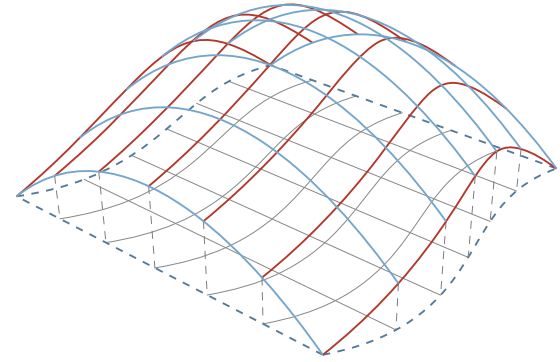
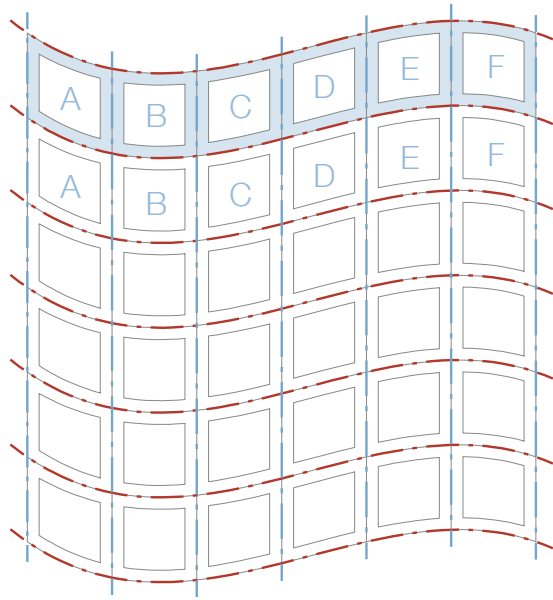


Abb. 110: Dem Raster folgende Translationsgeometrie

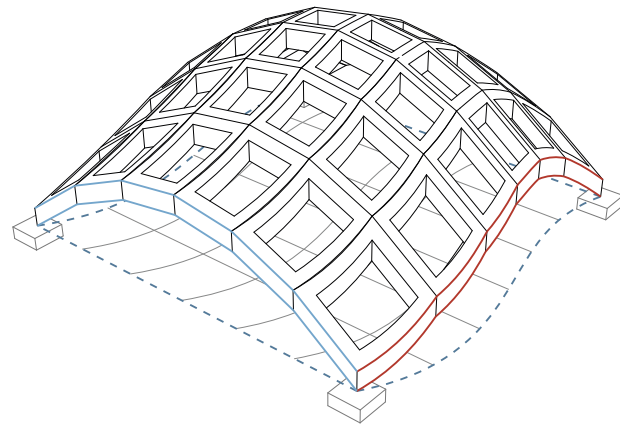


Abb. 111: Dem Raster folgende Tragstruktur

Auflösen einer Rasterachse in eine Kurve | Um weitere formale Freiheiten zu erreichen, ist es möglich, gerade Rasterlinien durch Kurven zu ersetzen, wodurch Tragstrukturen geschwungenen Grundrissen folgen können. Durch die Verwendung gekrümmter Rasterlinien erhöht sich jedoch die Anzahl verschiedener Modulprofile, die für die Konstruktion hergestellt werden müssen. Besteht der Raster in einer Richtung aus geschwungenen Kurven, besitzen alle Module entlang dieser Kurven verschiedene Profilquerschnitte. In der anderen Achsenrichtung behalten alle Profile jeweils dieselbe Querschnittsform.

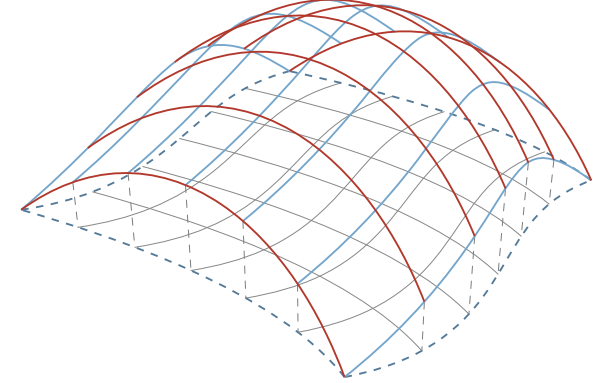
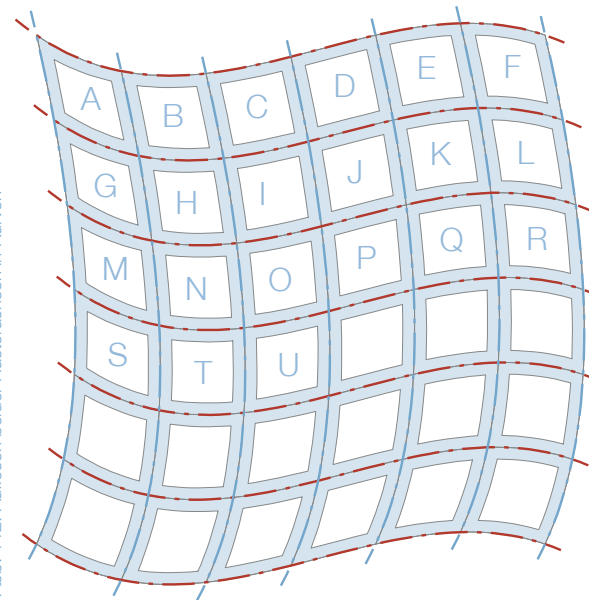


Abb. 113: Dem Raster folgende Translationsgeometrie

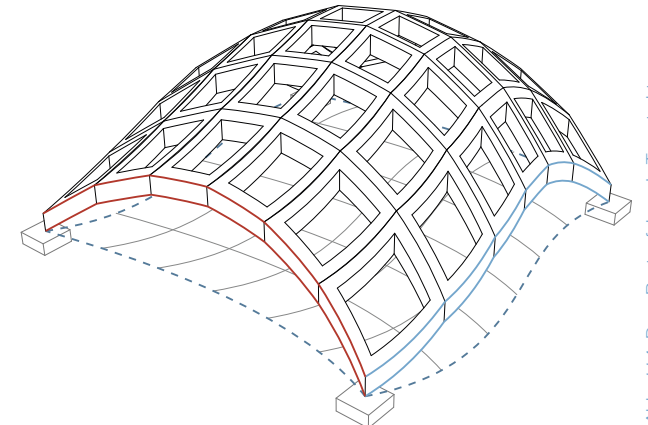
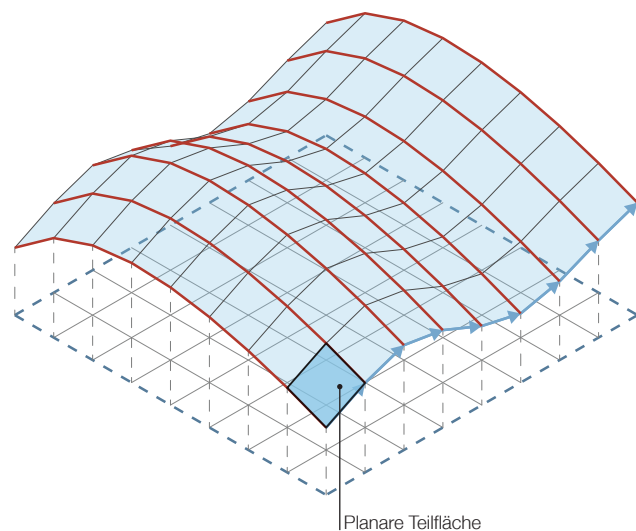


Abb. 114: Dem Raster folgende Tragstruktur

Auflösen beider Rasterachsen in Kurven | Es ist auch möglich, die Rasterlinien in beide Achsenrichtungen durch Kurven zu ersetzen. Dadurch können noch komplexere Formen von Tragstrukturen erreicht werden. Besteht der verwendete Raster aus zwei unterschiedlichen Kurven, besitzt jeder Modulstein eine andere Form im Querschnitt. Das bedeutet, dass für jeden Stein eine eigene Matrize nötig ist, um diesen mittels Strangpressverfahren herstellen zu können. Daher ist diese Ausformungsvariante theoretisch zwar herstellbar, stellt aber durch den hohen Aufwand in der Modulfertigung kein praktisches Anwendungsbeispiel eines modularen Bausystems wie „Ceramic Translation“ dar.

Abb. 115: Generieren einer Schnittfläche



Gleiche Ausformung von oberer und unterer Schnittfläche

Die geometrische Ausformung von Tragwerken wird über die Schnittgeometrie definiert. Grundsätzlich können mit dem „Ceramic Translation“ - Bausystem Tragstrukturen entworfen werden, deren Formen auf Translationsgeometrien basieren. Mit Hilfe einer oberen und unteren Schnittfläche, welche dem geometrischen Prinzip der Translation folgen, wird aus den Modulprofilen die gewünschte Tragwerksgeometrie herausgeschnitten. Die Schnittflächen werden über zwei Randkurven festgelegt, die in Abhängigkeit des Rasters linearisiert werden. Durch die Extrusion einer Randkurve entlang

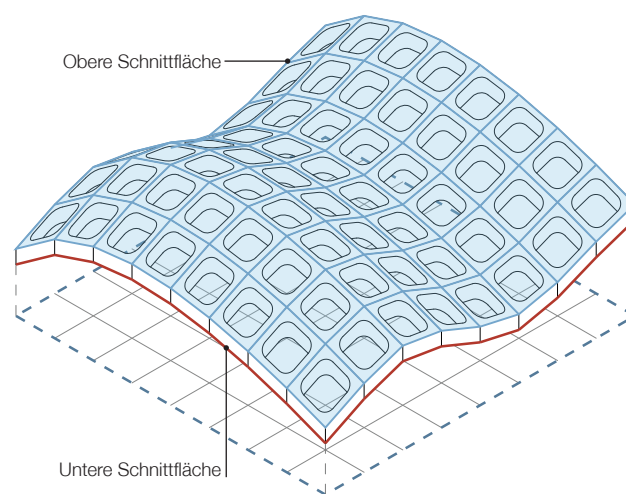
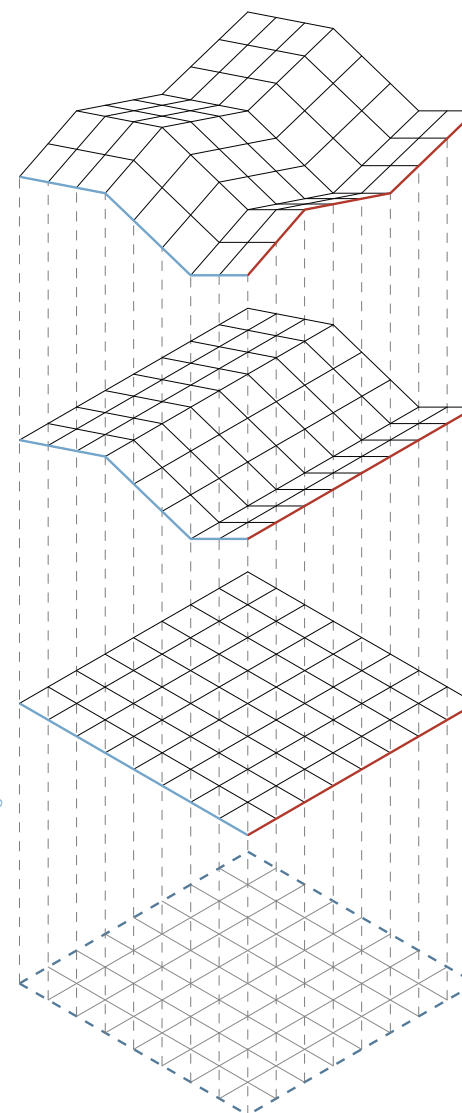


Abb. 116: Geometriestudie mit zwei identen Schnittflächen

der anderen entsteht eine Translationsfläche aus vielen planaren Flächen, die der Projektion der Rasterfelder entsprechen.

Die Konstruktionshöhe der Modulsteine wird über den Abstand zwischen den beiden Schnittflächen definiert. Bei der Geometriestudie in Abb. 116 sind die obere und untere Schnittgeometrie ident. So entsteht eine einheitliche Bauteildicke der Keramikstruktur. Abb. 117 und 118 zeigen mögliche Geometrien von Schnittflächen und Keramik - Strukturen.

Abb. 117: Ausformungsvarianten von Schnittflächen

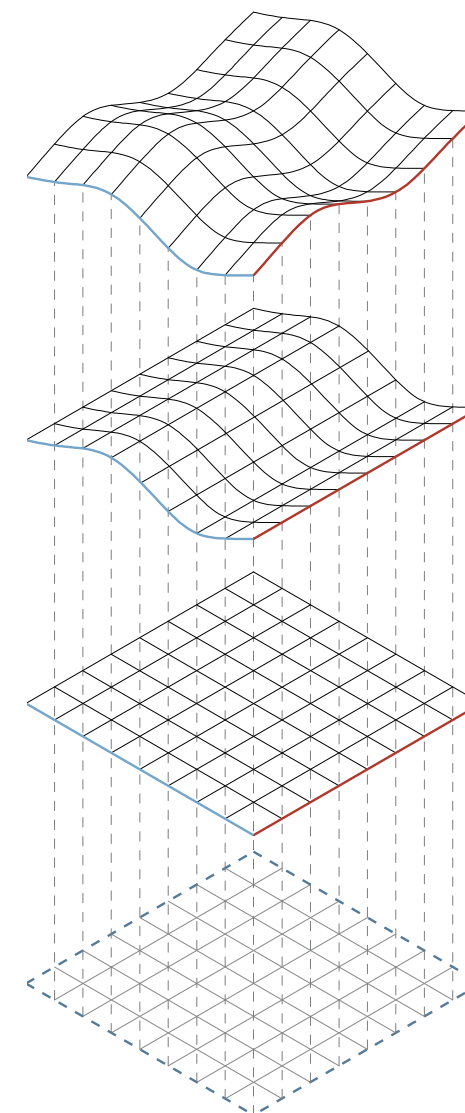


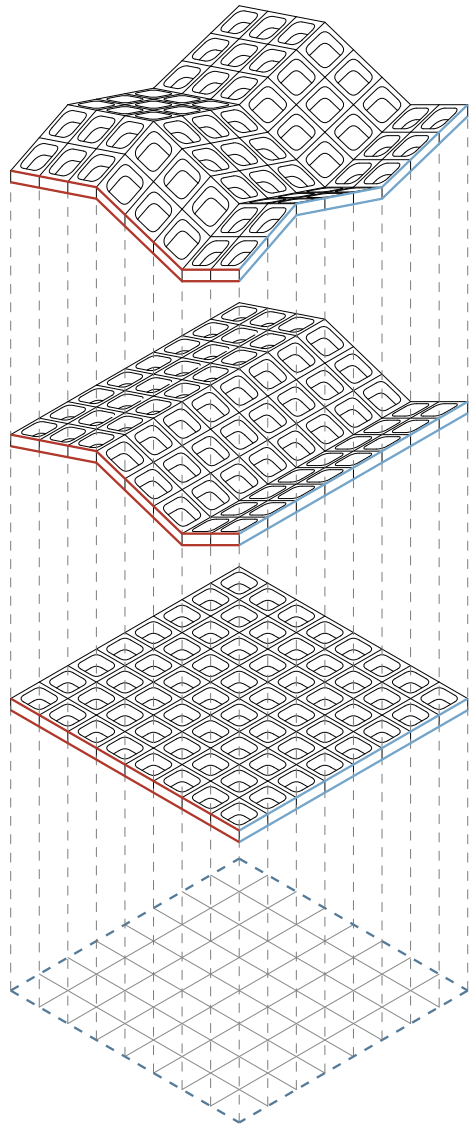
Doppelt geknickte /
Doppelt gekrümmte
Fläche

Einfach geknickte /
Einfach gekrümmte
Fläche

Ebene Fläche

Modulraster





Doppelt geknickte /
Doppelt gekrümmte
Fläche

Einfach geknickte /
Einfach gekrümmte
Fläche

Ebene Fläche

Modulraster

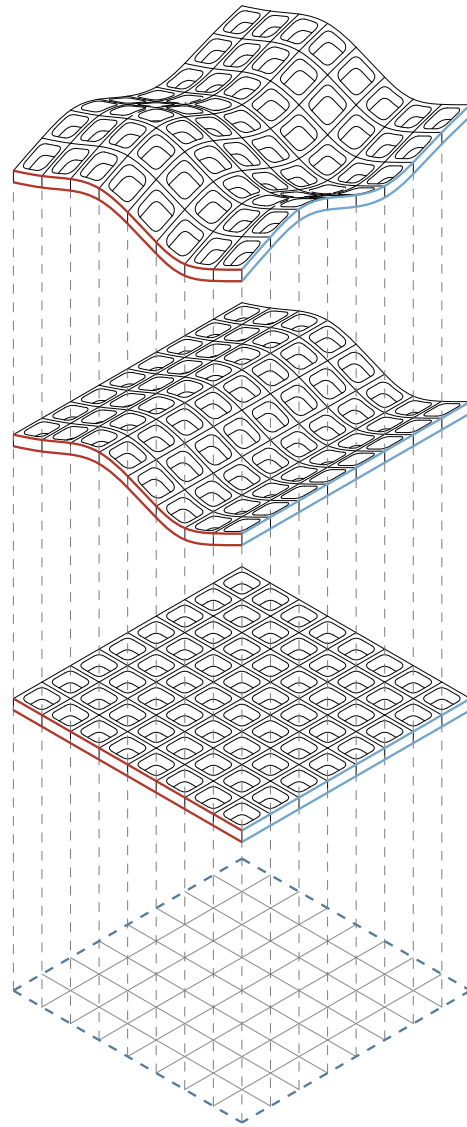
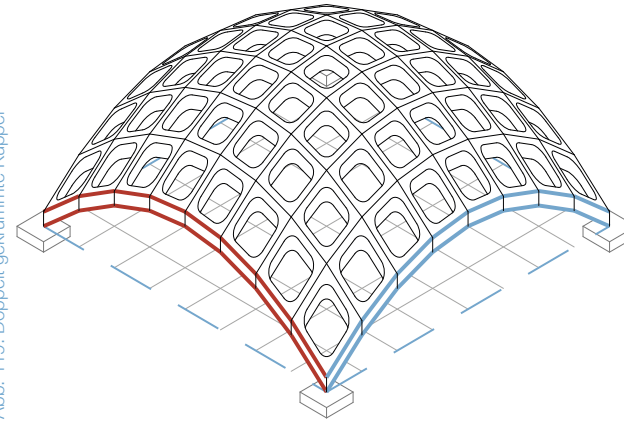


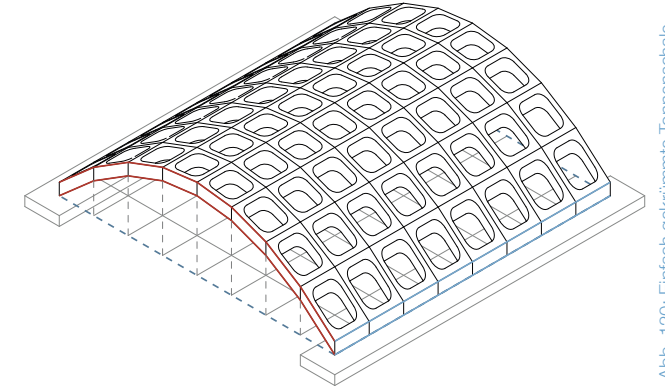
Abb. 119: Doppelt gekrümmte Kuppel

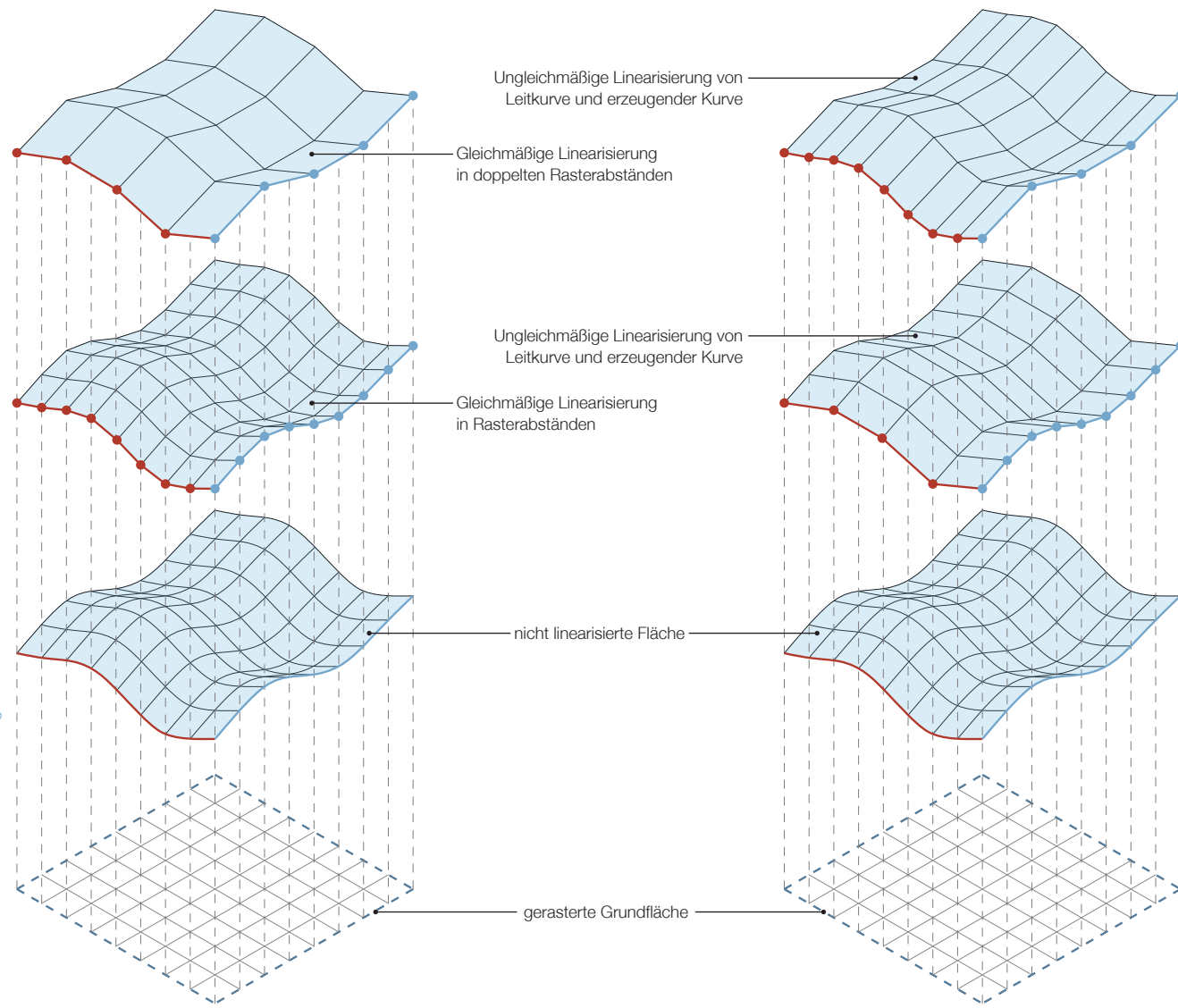


Ausformungsvarianten von Schnittgeometrien

Mit dem Prinzip der Translationsgeometrie ist es möglich, ebene, geknickte oder gekrümmte Flächen zu generieren. Die Flächen können sowohl in eine, als auch in beide Achsen gekrümmt sein (Abb.:117, 118). Diese formalen Freiheiten bieten die Möglichkeit mit „Ceramic -Translation“ Schalengeometrien herzustellen. Die Schalenwirkung erzeugt eine erhöhte Steifigkeit von Tragstrukturen, wie es zum Beispiel bei Kuppel- und Tonnenkonstruktionen (Abb.: 119, 120) der Fall ist. Durch diese Eigenschaften werden bei der Formfindung von „Ceramic Translation“ - Tragstrukturen, bevorzugt doppelt gekrümmte Geometrien gewählt.

Abb. 120: Einfach gekrümmte Tonnenhalle





Ungleichmäßige Linearisierung von Leitkurve und erzeugender Kurve

Gleichmäßige Linearisierung in doppelten Rasterabständen

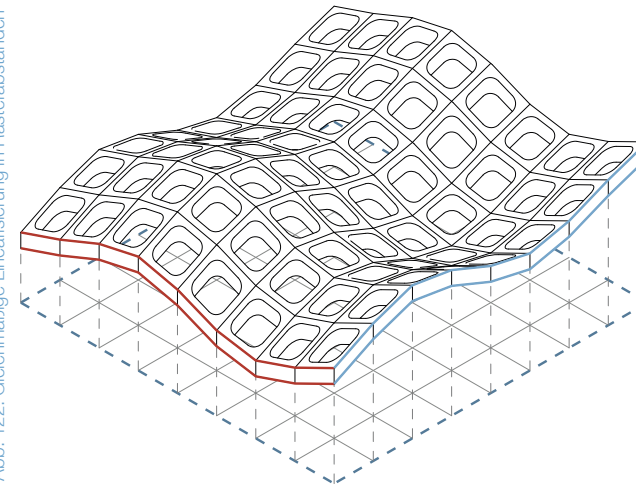
Ungleichmäßige Linearisierung von Leitkurve und erzeugender Kurve

Gleichmäßige Linearisierung in Rasterabständen

nicht linearisierte Fläche

gerasterte Grundfläche

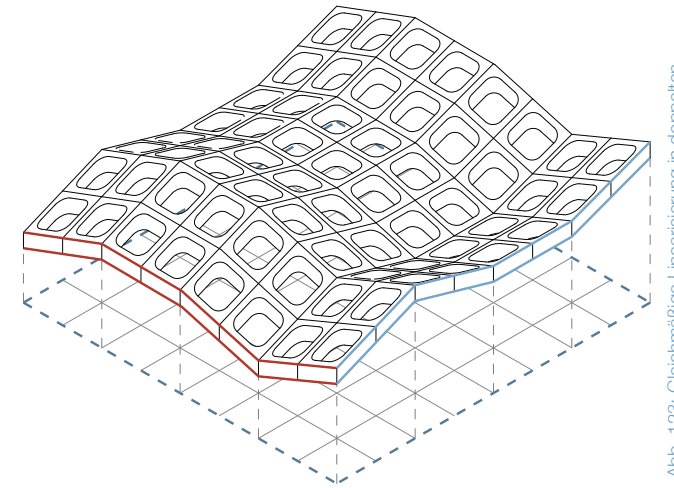
Abb. 122: Gleichmäßige Linearisierung in Rasterabständen



Linearisierungsvarianten von Schnittgeometrien

Die Schnittflächen setzen sich aus mehreren planaren Flächen zusammen. Diese Teilflächen entstehen durch die Linearisierung der Randkurven. Dabei werden die Kurven in Abhängigkeit des Rasters in Polylinien umgewandelt. Die Linearisierung kann in Abständen des Rastermaßes oder einem Vielfachen davon erfolgen (Abb.: 121). Auf diese Weise kann festgelegt werden, aus wie vielen Teilflächen sich die Schnittflächen zusammensetzen. Um weiche, runde Formen zu erreichen, sollte die Anzahl der Teilflächen möglichst hoch sein. Durch eine Teilung in größere Flächen können kantigere Formen bis hin zu Faltstrukturen erzeugt werden.

Abb. 123: Gleichmäßige Linearisierung in doppelten Rasterabständen



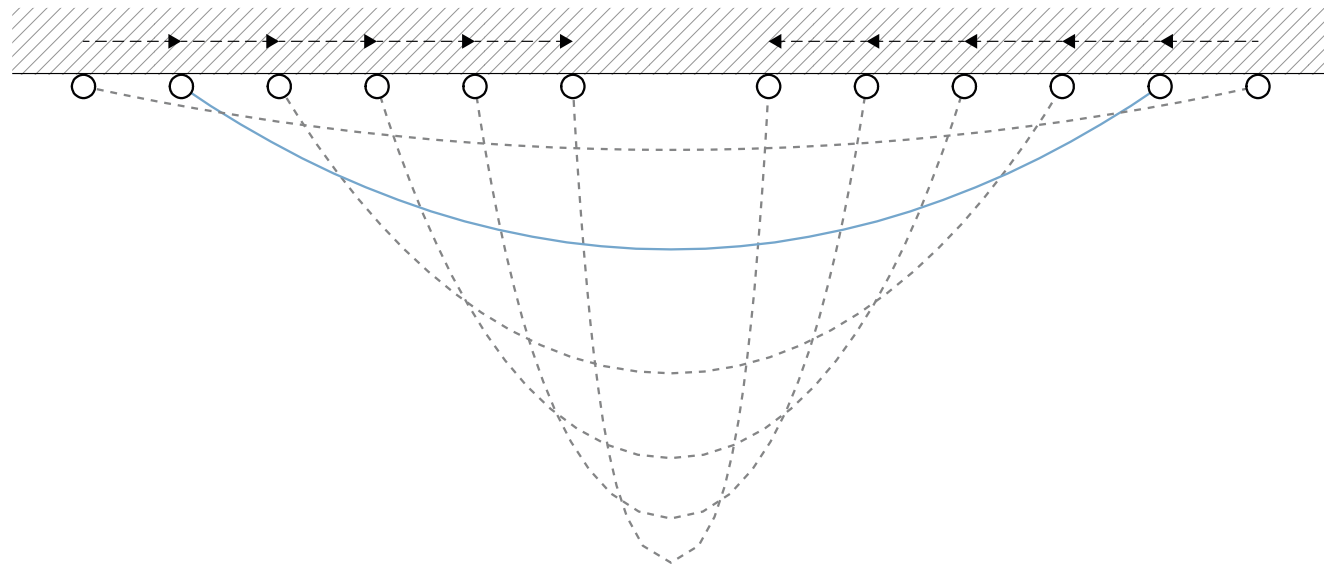


Abb. 124: Mit Hilfe von Kangaroo simulierte Kettenlinien

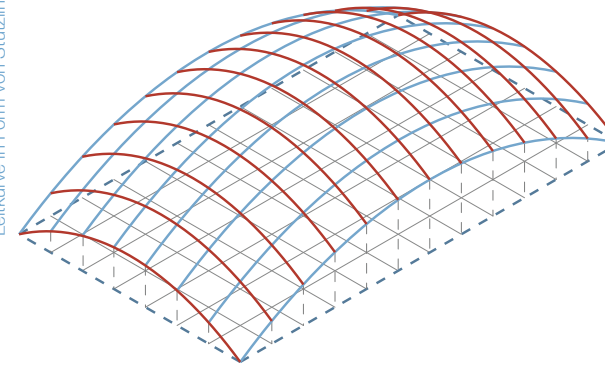
Formfindung der Randkurven durch Hängemodelle

Durch die Verwendung bestimmter geometrischer Formen können Tragstrukturen optimiert werden. Bei Bogen-, oder Schalenträgwerken werden dazu oft Stützlinien und Hängemodelle verwendet. Wird eine Kette an ihren Enden gehalten, hängt diese unter Einfluss der Schwerkraft durch und bildet die sogenannte Kettenlinie. Wird diese über eine horizontale Ebene gespiegelt, erhält man eine Stützlinie. Entspricht ein Bogen der Stützlinie, sind in seinem gesamten Querschnitt nur Druckkräfte vorhanden. Die Stützlinie folgt genau dem

Verlauf der Normalkräfte, und trägt dabei momentenfrei.

Diese Art der Formfindung kann am physischen Modell erfolgen, oder digital simuliert werden. Die Kettenlinien in Abb. 124 wurden über das Grasshopper - Plugin Kangaroo erstellt. Mit Hilfe dieser Software können Hängemodelle physikalisch simuliert werden. Ein weiteres Rhinoceros - Plugin zur Simulation von Hängemodellen stellt RhinoVAULT dar.

Abb. 125: Translationschale mit Rand- und Leitkurve in Form von Stützlinien



Anwendung der Stützlinien am System

Tragwerke in Form von Hängegeometrien sind mit „Ceramic Translation“ nur als einfach gekrümmte Flächen z.B. in Form von Tonnenschalen realisierbar. An die Geometrie einer doppelt gekrümmten Hängekuppel kann sich das Bausystem formal nur annähern. Dazu werden die Randkurven der Schnittflächen in ihrer Form an Kettenlinien angepasst.

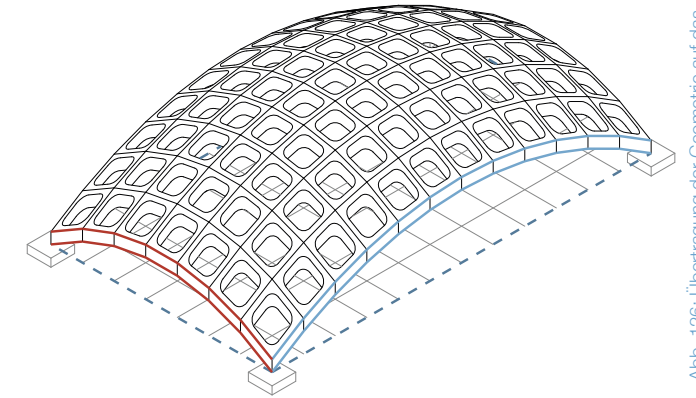


Abb. 126: Übertragung der Geometrie auf das Bausystem

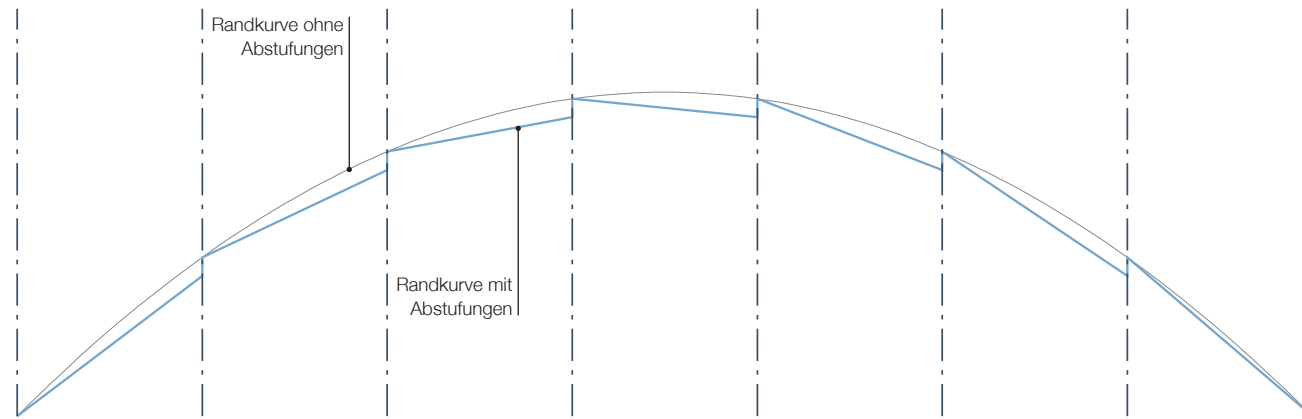


Abb. 127: Abstufen der Randkurve

Abstufen der Schnittflächen

Schuppenartiges Abstufen | Um Translationsgeometrien in planare Flächen aufzulösen, werden im „Ceramic Translation“ - Bausystem die Randkurven über den Modulraster linearisiert. Bei diesem Vorgang können die Randkurven in verschiedenen Varianten ausgeformt werden. Die Kurve kann zum Beispiel in der Ebene der Rasterlinie Höhengsprünge beinhalten. Durch die vertikale Richtung und die Lage des Versatzes bleiben die Schnittflächen bei diesem Vorgang planar. In dieser Ausformungsvariante wird dieses Prinzip verwendet, um eine schuppenartige Tragstruktur zu entwerfen. Diese Abstufung der Steine kann sowohl in eine, als auch in beide Achsenrichtungen erfolgen.

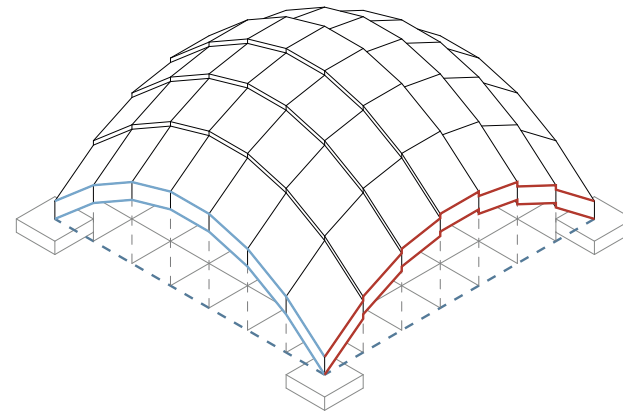


Abb. 128: Abstufung der Module in eine Richtung

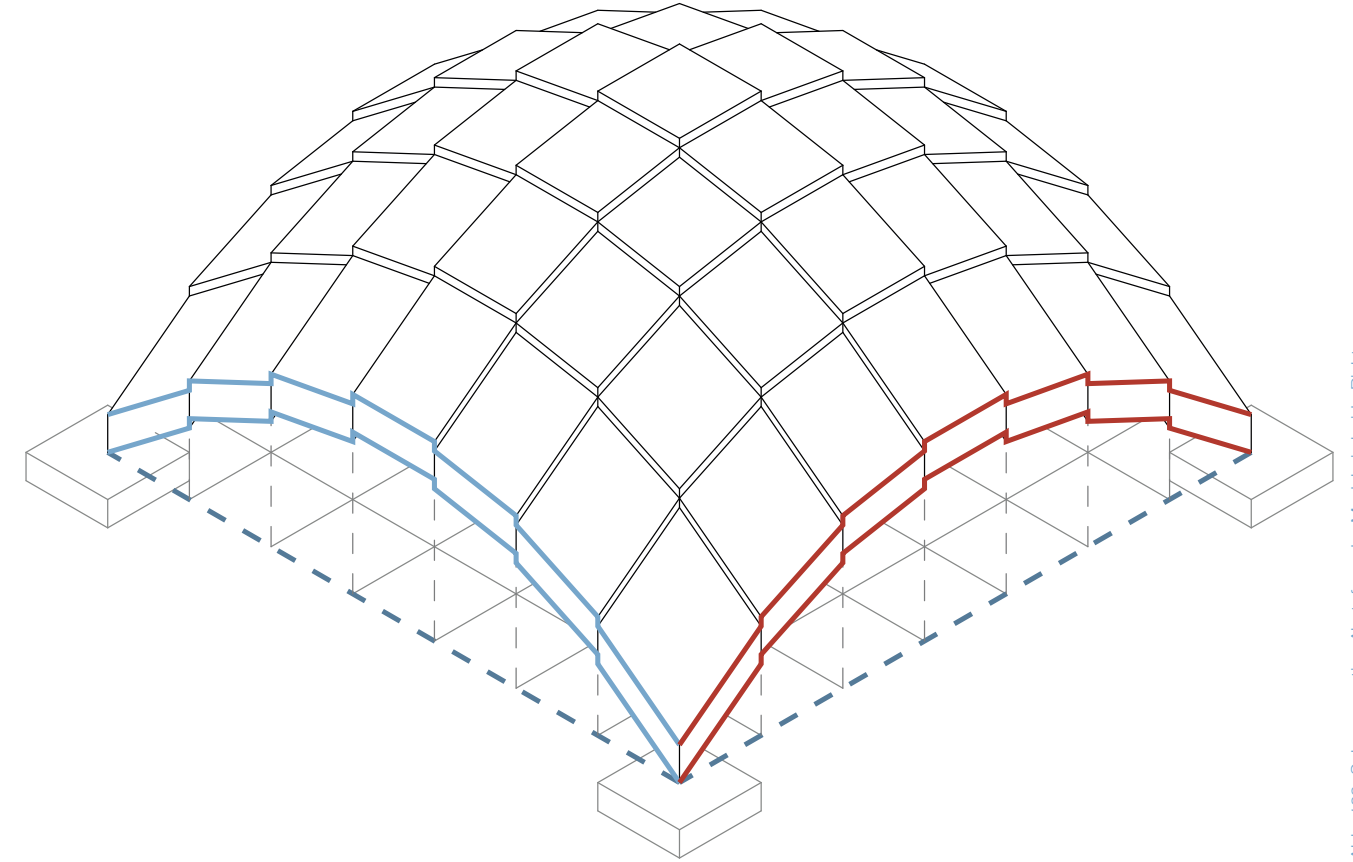


Abb. 129: Schuppenartige Abstufung der Module in beide Richtungen

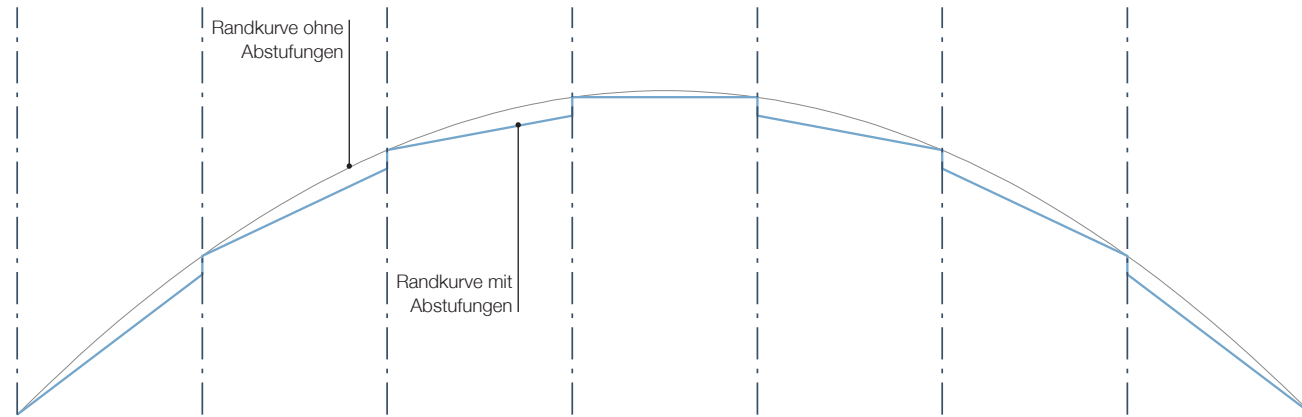


Abb. 130: Abstufen der Randkurve

Abstufen der Schnittflächen

Treppenartiges Abstufen | Eine weitere Variante der Abstufung wäre eine Abtrepung, welche vom höchsten Punkt einer Tragstruktur aus nach unten führt. Eine solche Struktur kann Vorteile bieten, wenn eine Eindeckung in Schindeloptik vorgesehen ist. Durch die verschiedenen Höhenlagen der Modulflächen, könnten die Deckplatten überlappend montiert werden. Auch die Untersicht von Tragstrukturen kann auf diese Weise stufenartig gestaltet werden. Werden die Module im Bausystem abgestuft, gibt es jedoch keinen klar definierten Knotenpunkt mehr, da sich die vier Steine um einen Knoten nicht in einer Ebene befinden. Dadurch entstehen besondere Anforderungen an Verbindung und Knotenmodul.

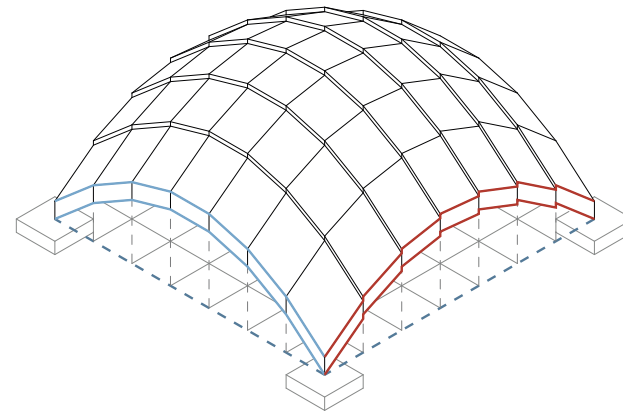


Abb. 131: Abtrepung der Module in eine Richtung

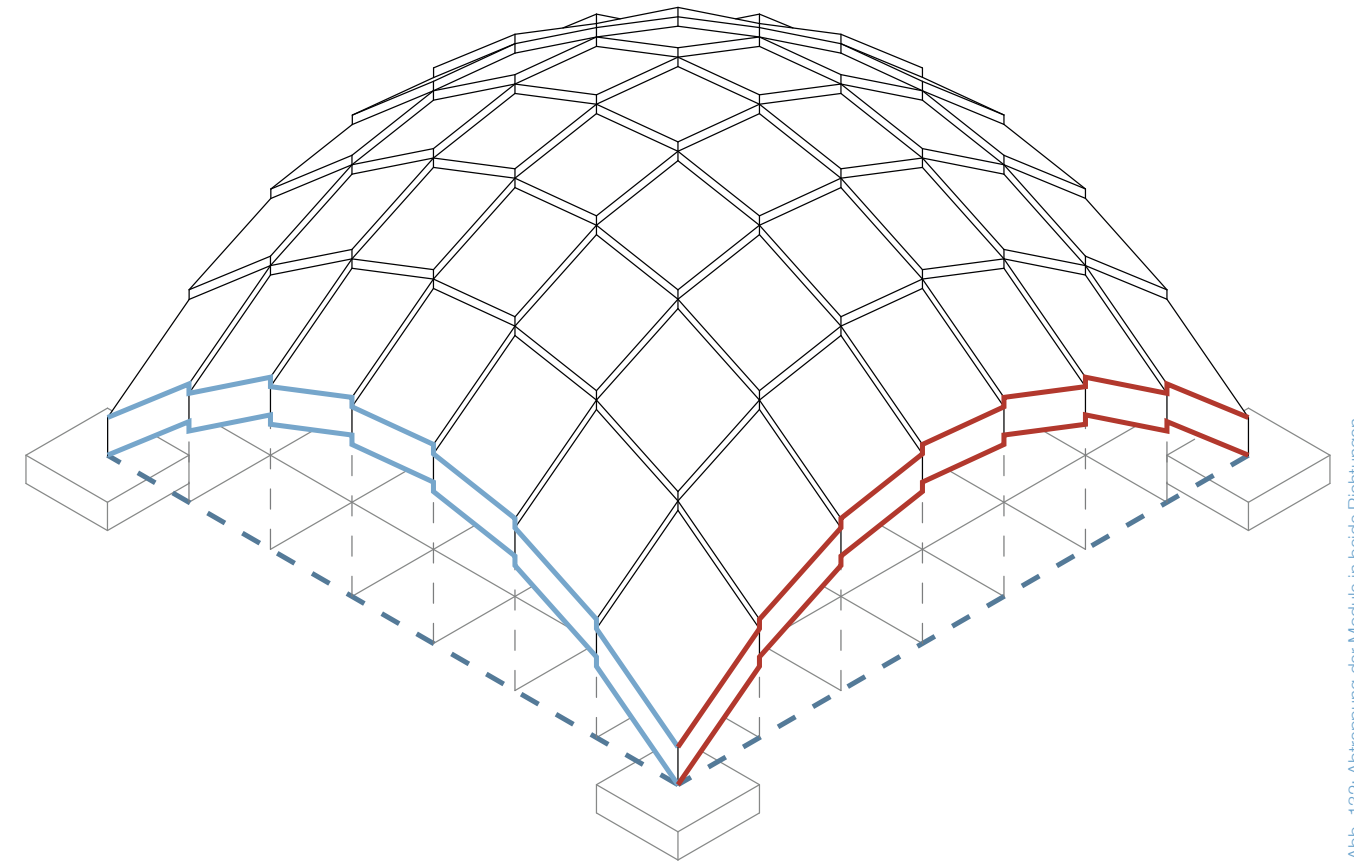
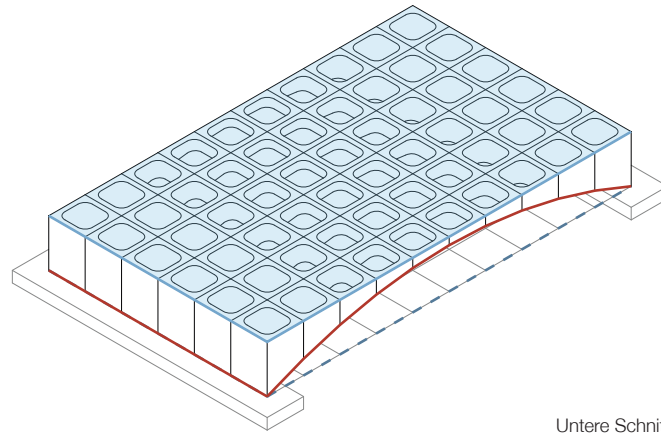


Abb. 132: Abtrepung der Module in beide Richtungen



Unterschiedliche Ausformung von oberer und unterer Schnittgeometrie

Beim „Ceramic Translation“ - Bausystem werden die extrudierten Profile mit einer oberen und einer unteren Schnittfläche geschnitten, wodurch die geometrische Ausformung des Tragwerks in erster Linie bestimmt wird. In den bisher gezeigten Variationsbeispielen sind die beiden Schnittflächen immer identisch, wodurch die Ober- und Unterseite der Tragstrukturen dieselbe Geometrie aufweisen. Es besteht aber auch die Möglichkeit, die Modulstränge mit unterschiedlichen Flächen zu trimmen. Somit kann wie in Abb.: 133 ein Tragwerk mit einer gekrümmten Unterseite und einer ebenen Oberseite entstehen. Auf diese Weise können sowohl komplexe als auch einfache geometrische Körper entstehen, wodurch eine große Bandbreite an Form und Funktion abgedeckt werden kann.

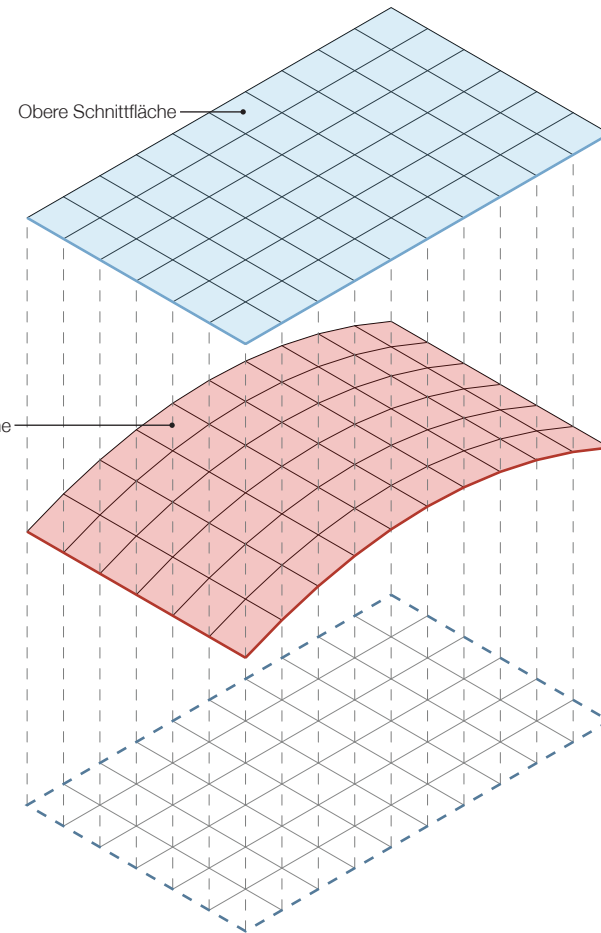
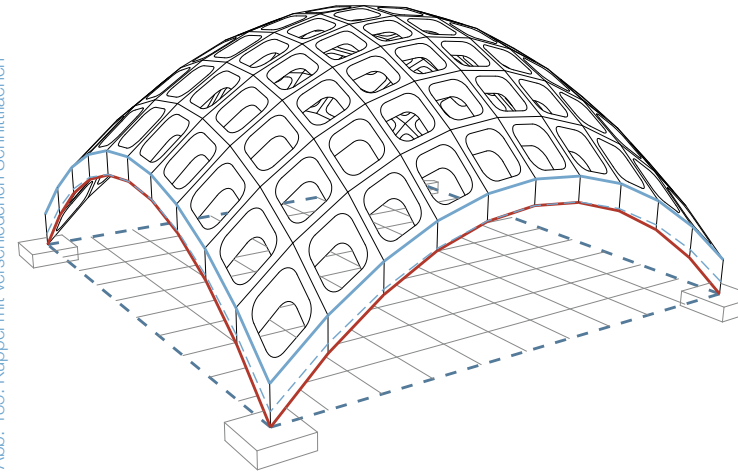


Abb. 134: Obere und untere Schnittfläche



Unterschiedliche Ausformung von oberer und unterer Schnittgeometrie

Durch die Wahl der Schnittflächen und deren Lage wird auch die Bauhöhe der Modulsteine festgelegt. Obere und untere Schnittfläche können so gewählt werden, dass an statisch stark beanspruchten Stellen die Materialstärke erhöht wird. Die Abb.: 135, 136 zeigen eine symmetrische Kuppel, welche auf den vier Eckpunkten gelagert wird. Durch die Lastabtragung über die

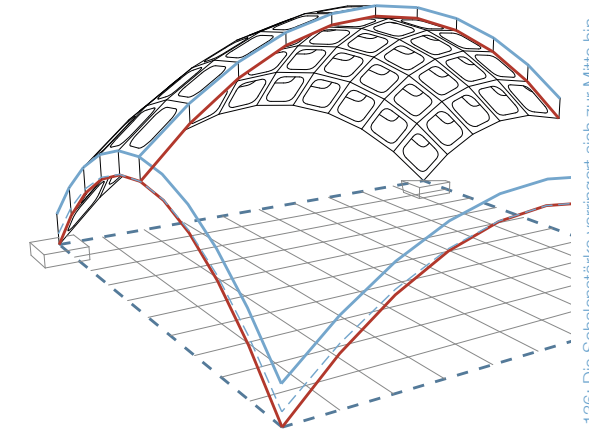


Abb. 136: Die Schalstärke verringert sich zur Mitte hin

se Punkte wird die Belastung der Modulsteine zu den Ecken hin größer. Um dieser ungleichen Beanspruchung entgegenzuwirken, werden die Schnittflächen so gewählt, dass die Bauhöhe der Steine von der Kuppelmitte aus, in Richtung der Ecken zunimmt. Somit wird einerseits das Gewicht der Module in Scheitelnähe verringert, andererseits werden die Steine an den Ecken verstärkt.

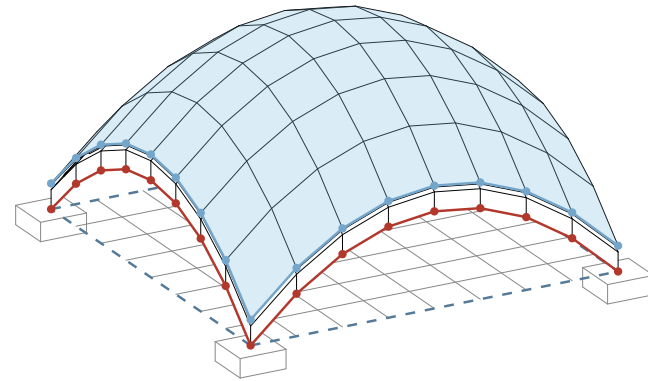
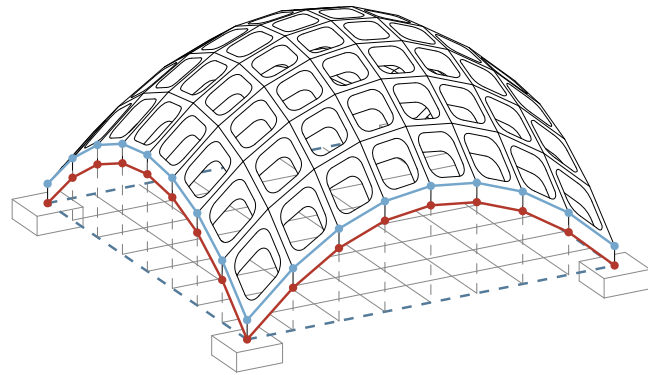


Abb. 137: Keine Vereinfachung der Deckflächen

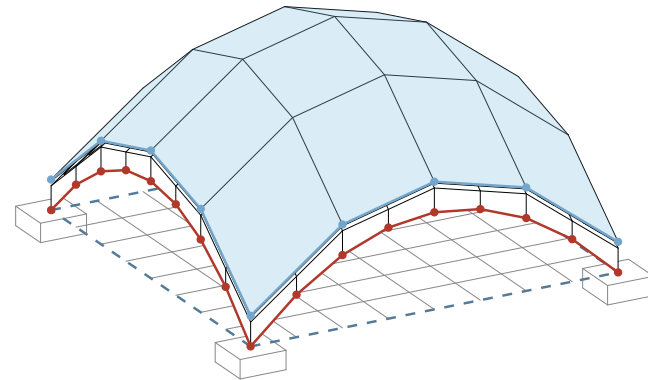
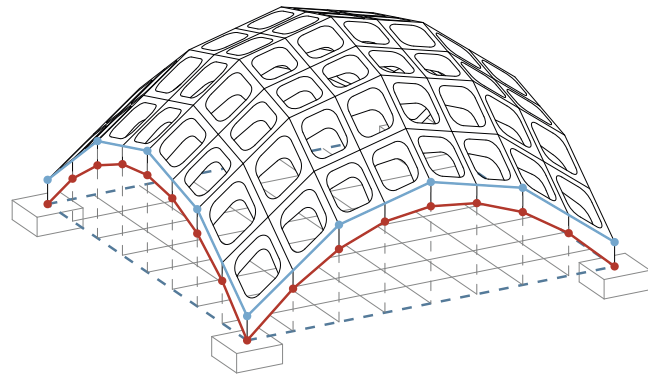


Abb. 138: Vereinfachung von 64 auf 16 Deckflächen

Vereinfachen der Deckfläche

Durch die Herstellungsmethode der „Ceramic Translation“ - Module ist es möglich, die Ober- und Unterseite einer Tragstruktur unterschiedlich auszuformen. Auf diese Weise kann die Deckfläche gegenüber der

Untersicht in ihrer Komplexität reduziert werden, wodurch sich die Plattenformate vergrößern. Dies führt zu einer stark reduzierten Anzahl von Platten- und Konstruktionselementen, wobei jedoch die Krümmung der

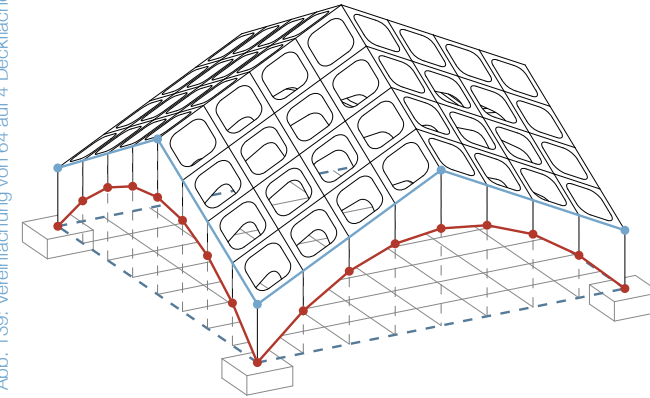


Abb. 139: Vereinfachung von 64 auf 4 Deckflächen

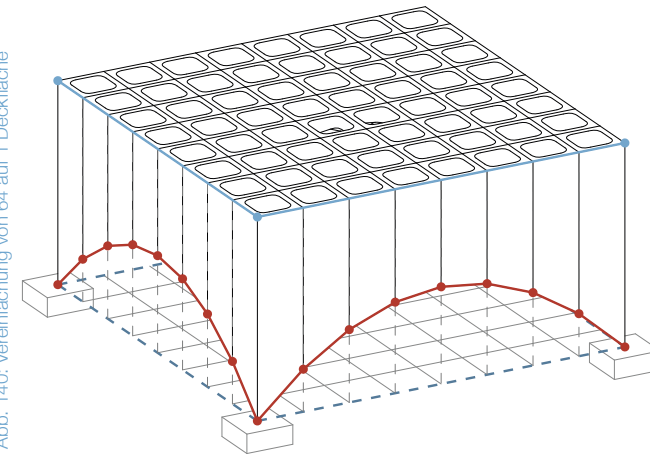
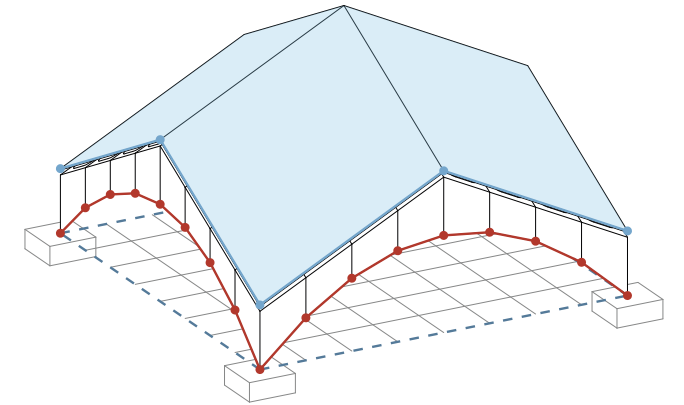
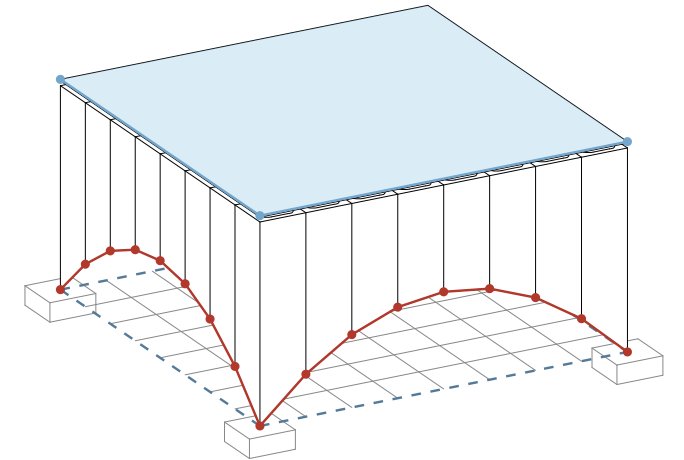


Abb. 140: Vereinfachung von 64 auf 1 Deckfläche



Untersicht nicht beeinflusst wird. Durch die Teilung der Translationsschale in größere Flächen kommt es zu einer Veränderung in der optischen Erscheinung. Um weiche und runde Krümmungen zu erreichen, müssen

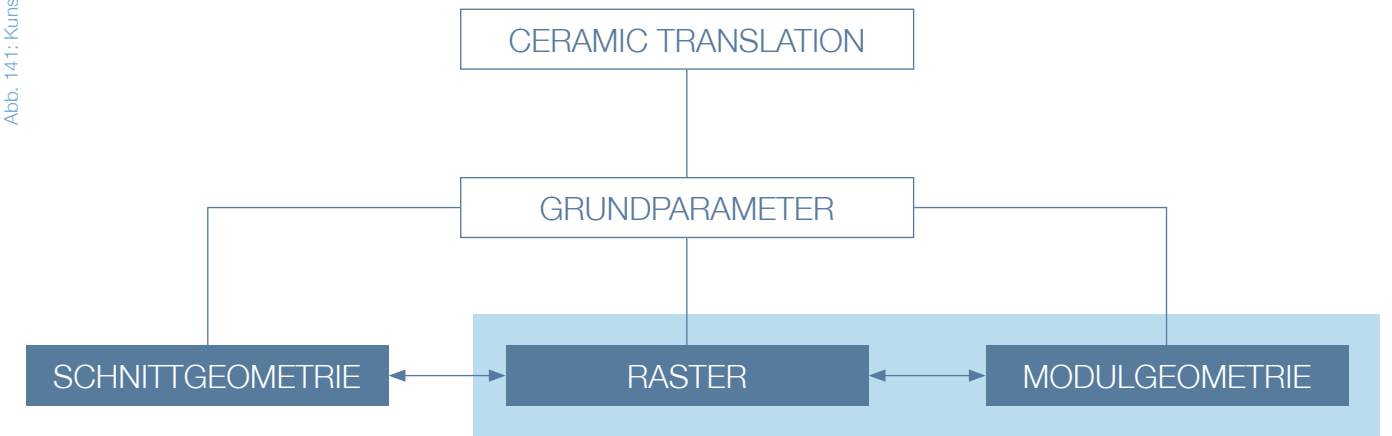
die Plattenformate möglichst klein sein. Umso größer die Platten werden, umso kantiger wird die Hülle eines Bauwerks.

Um anfallende Anforderungen an Tragstrukturen erfüllen zu können, muss das entwickelte Bausystem auf mehreren Ebenen individuell anpassbar sein. Durch die verwendete Herstellungsweise können bei vergleichsweise niedrigem Aufwand komplexe Steinformen erzeugt werden. Trotz Modularbauweise bietet das Bausystem durch das Strangpressverfahren vielseitige individuelle Möglichkeiten um hohe architektonische Ansprüche zu erfüllen. Dieses Kapitel zeigt die vielseitigen Gestaltungsmöglichkeiten von „Ceramic Translation“ und stellt eine Auswahl von Modul- und Knotenvarianten dar.

4

Ausformungsvarianten von „Ceramic Translation“ - Modulsteinen

Abb. 141: Kunstinstallation von Yusuke Seki



Formgebung der Steine durch Modulgeometrie und Raster

Die Form der Keramik - Module wird in erster Linie durch die Wahl von Modulgeometrie und Raster bestimmt. Die Größe der Steine wird durch das Rastermaß festgelegt. Die Definition der Stein- und Knotenform, und die damit verbundene Wahl des Verbindungsprinzips erfolgt über die Modulgeometrie. Über diese beiden Parameter können die Modulsteine an individuelle statische und gestalterische Anforderungen angepasst werden.

Die folgenden Stein- und Knotenvariationen zeigen unterschiedliche Ausformungen der Modulgeometrie und die damit verbundenen Auswirkungen auf das System. Um die einzelnen Varianten optisch miteinander vergleichen zu können, wurden jeweils doppelt gekrümmte Kuppelgeometrien und ein quadratischer Raster zur Darstellung verwendet.

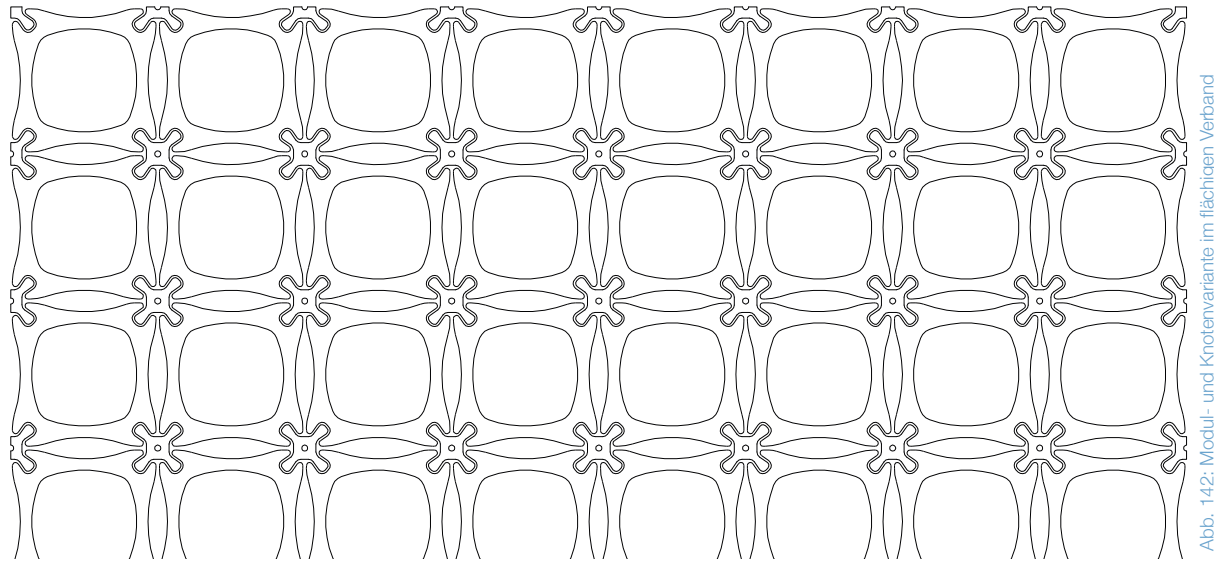


Abb. 142: Modul- und Knotenvariante im flächigen Verband

Weiterentwicklung der Modulgeometrie des Prototypen

Durch die Untersuchung des Prototypen im ersten Teil der Diplomarbeit ist es möglich, formale Korrekturen in der Stein- und Knotengeometrie vorzunehmen. Die Ausformung des Prototypensteins weist vor allem Schwachstellen in den Eckbereichen auf. Bei Belastungstests brachen zuerst die dünnen Eckzähne, die die Knotenelemente umfassen. Auch die kantige Ausformung der innenliegenden Ecken stellt eine potentielle Bruchstelle dar. Um den Schwachstellen entgegenzuwirken, wurde der Materialquerschnitt in diesen Bereichen erhöht. Es war generell zu erkennen, dass

die Steine zuerst an Kanten und in engen Krümmungen brechen. Solche Bruchstellen wurden durch die Verwendung weicher, abgerundeter Formen weitgehend verhindert. Zusätzlich wurden die PVC - Knotenelemente in ihrem Querschnitt verkleinert, wodurch sich der Materialquerschnitt der Keramik - Module in den Ecken vergrößert.

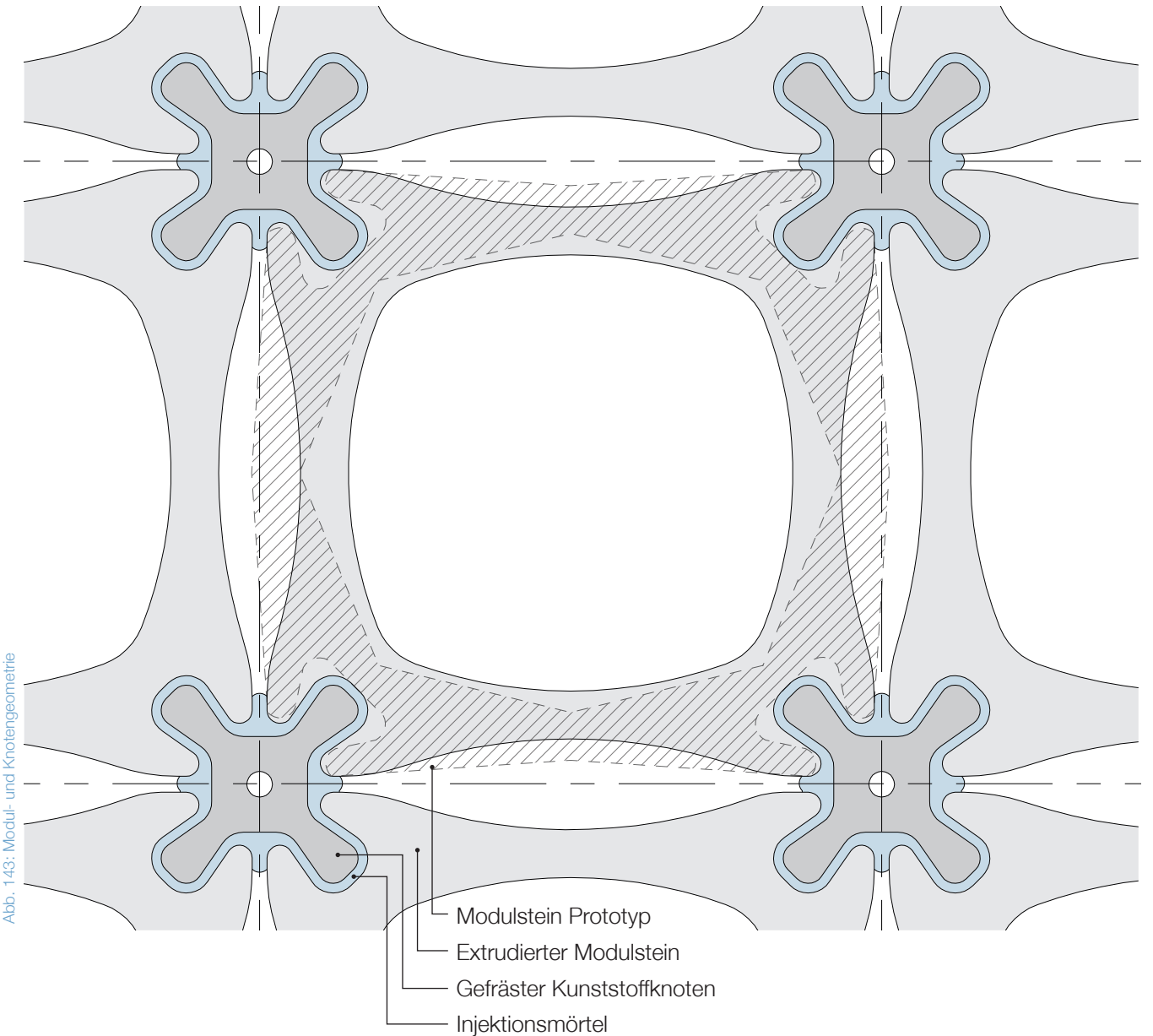


Abb. 143: Modul- und Knotengeometrie

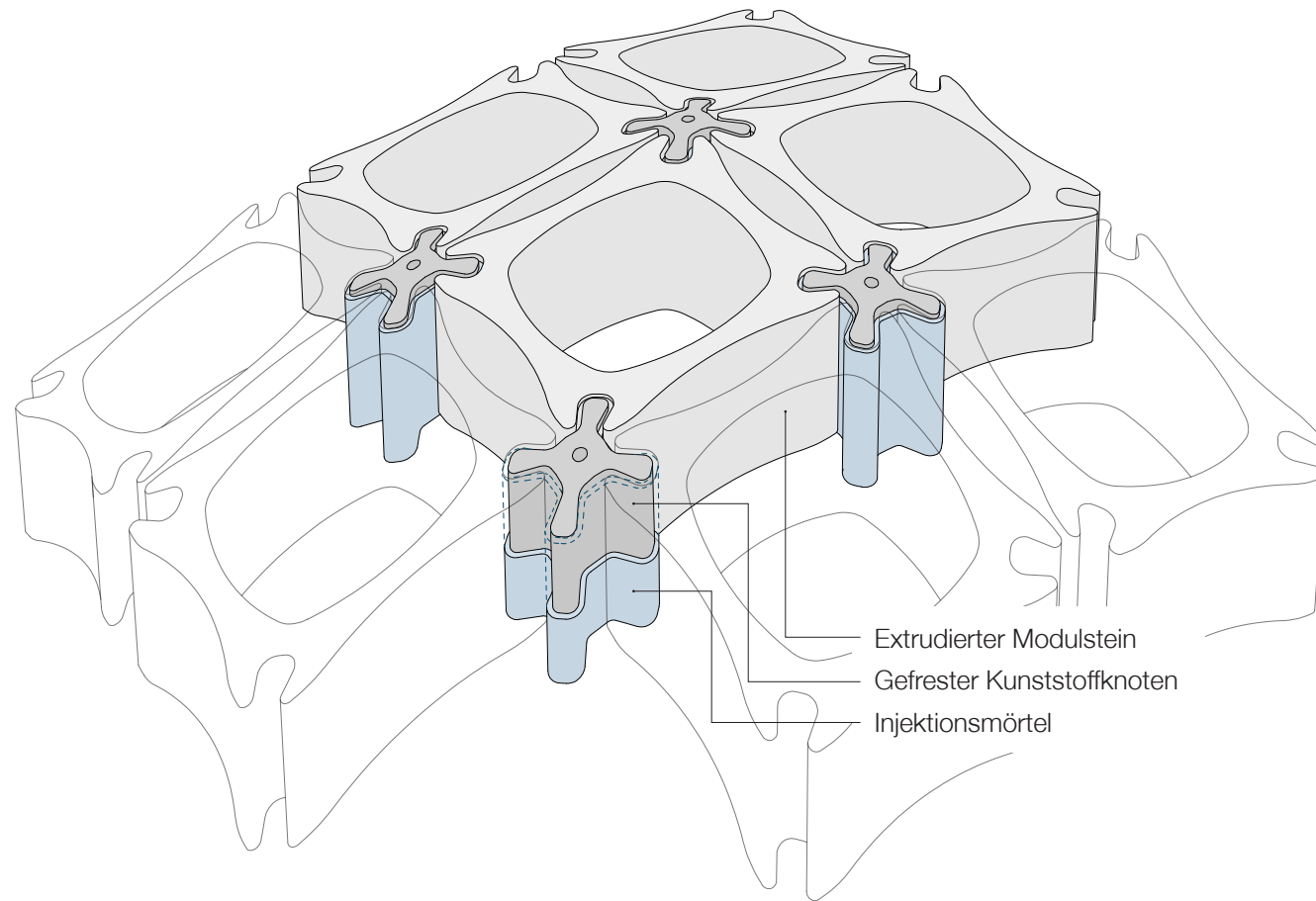


Abb. 144: Verbindungsprinzip

Verbindungsprinzip

Um die Steine kraftschlüssig zu verbinden, wird das gleiche Prinzip wie beim Bau des Prototypen angewendet. Die Module werden auf eine Schalung aufgelegt. Danach werden in den Knotenpunkten die PVC - Verbinden eingebracht. Die Fugen zwischen den Steinen

und Knotenelementen werden anschließend mit Injektionsmörtel vergossen.

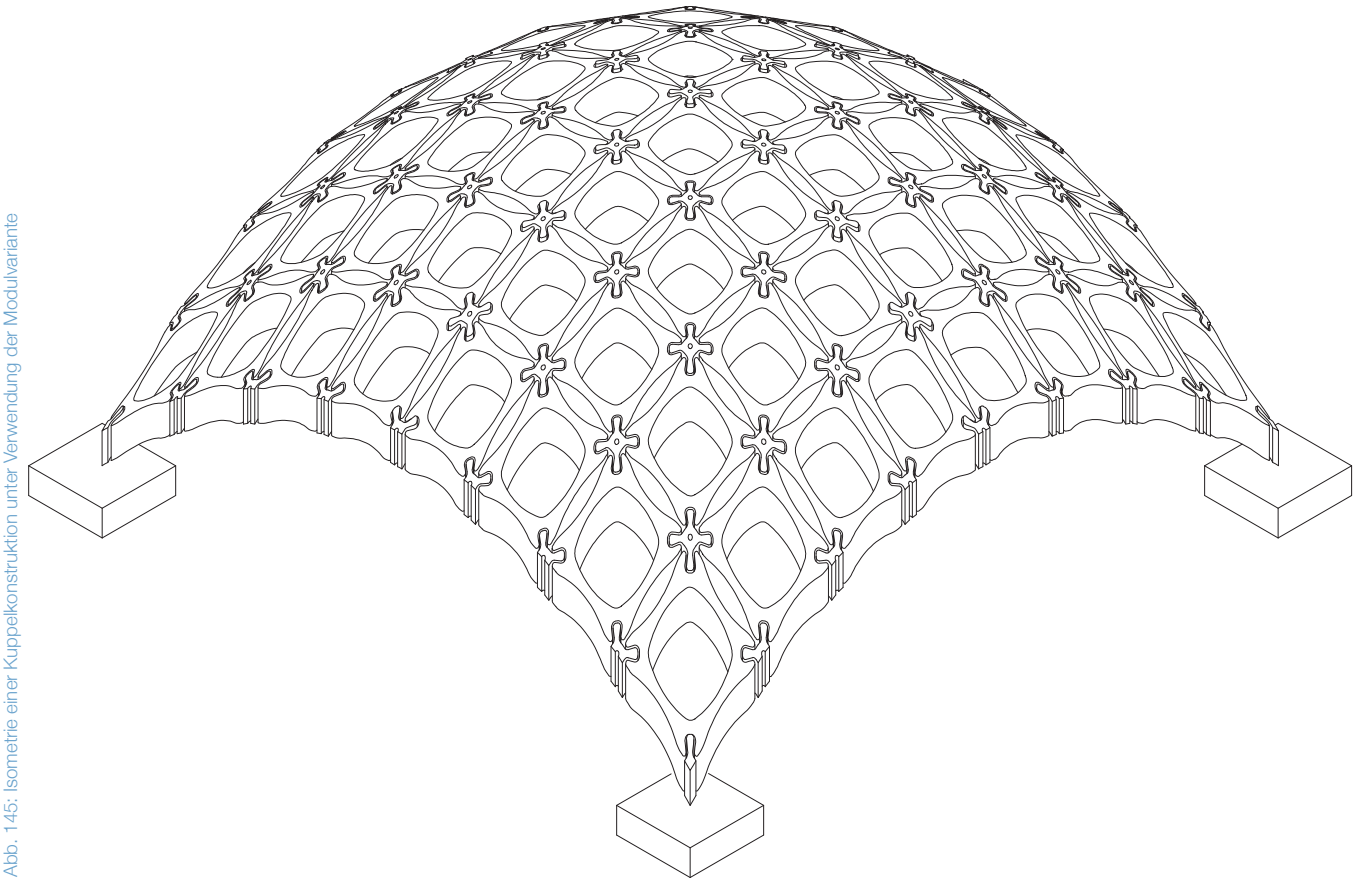


Abb. 145: Isometrie einer Kuppelkonstruktion unter Verwendung der Modulvariante

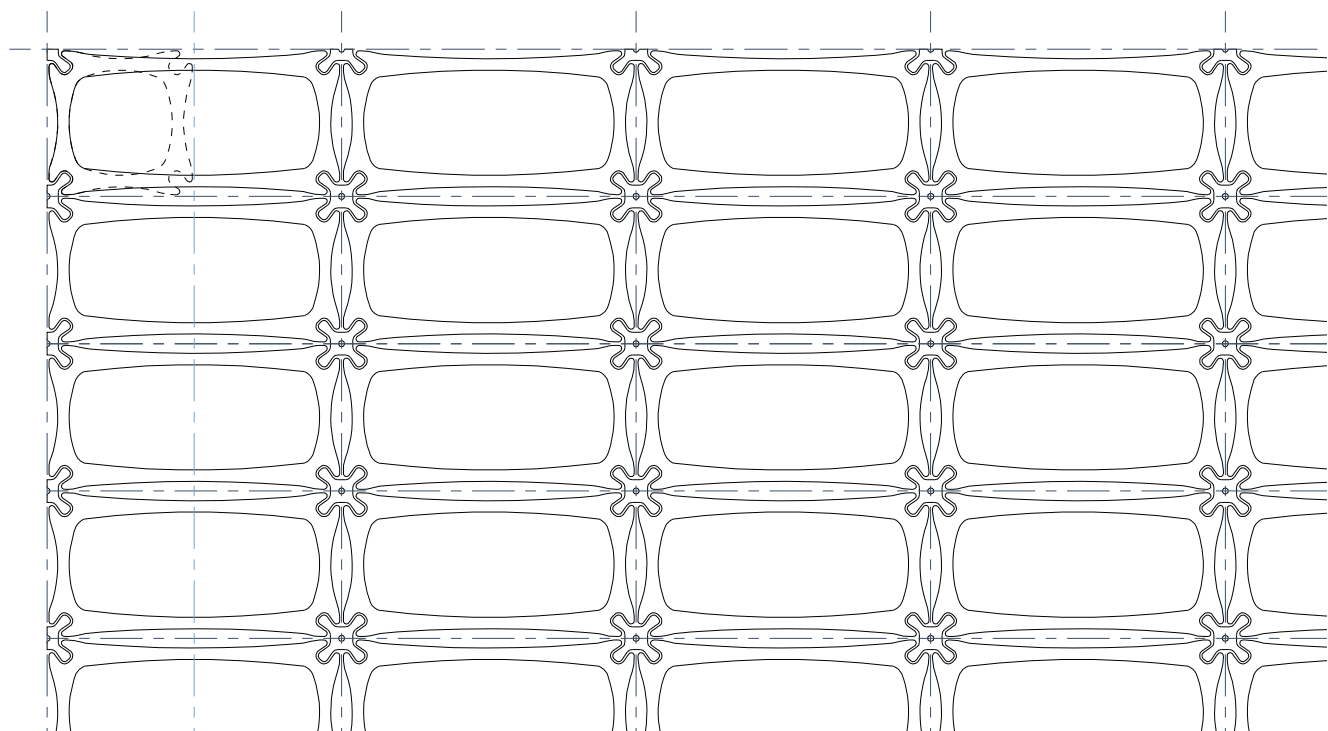


Abb. 146: Modul- und Knotenvariante im flächigen Verband

Veränderung des Modulrasters und der Steingröße

Abb.: 146 zeigt die Variante des weiterentwickelten Prototypensteins unter Verwendung eines rechteckigen Rasters. Das Prinzip der Verbindung über PVC - Knotenelemente, sowie der Rahmenform des Moduls bleibt jedoch bestehen. Wie bereits in Kapitel 3 unter Raster- und Modulgröße erwähnt, kann die Steingröße im Querschnitt in einem Bereich von 20cm bis 50cm liegen. Die dargestellten Modul- und Knotenvarianten

weisen meist einen quadratischen Querschnitt auf. Die Modulgeometrien und Verbindungsprinzipien sind aber auch auf einen rechteckigen Raster übertragbar.

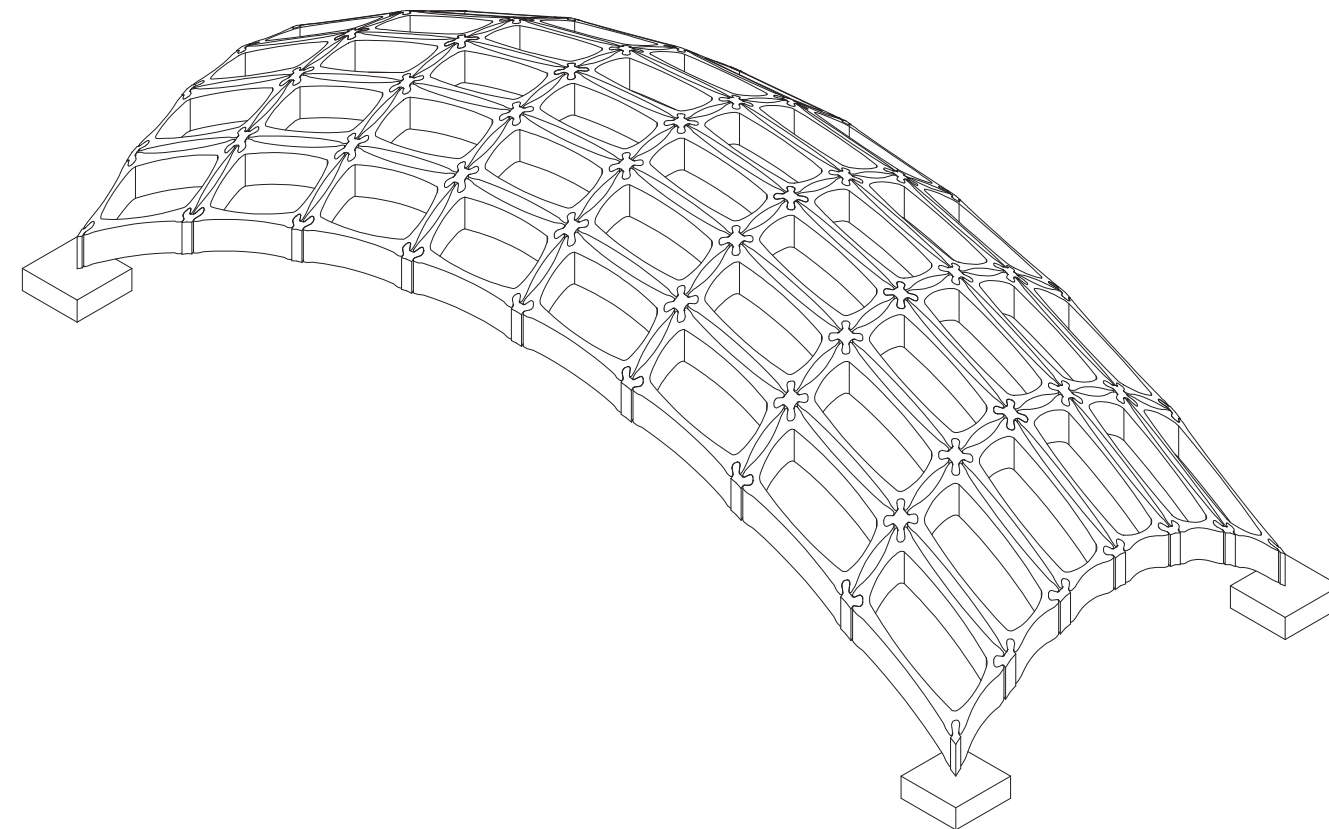


Abb. 147: Isometrie einer länglichen Schale unter Verwendung der rechteckigen Modulgeometrie

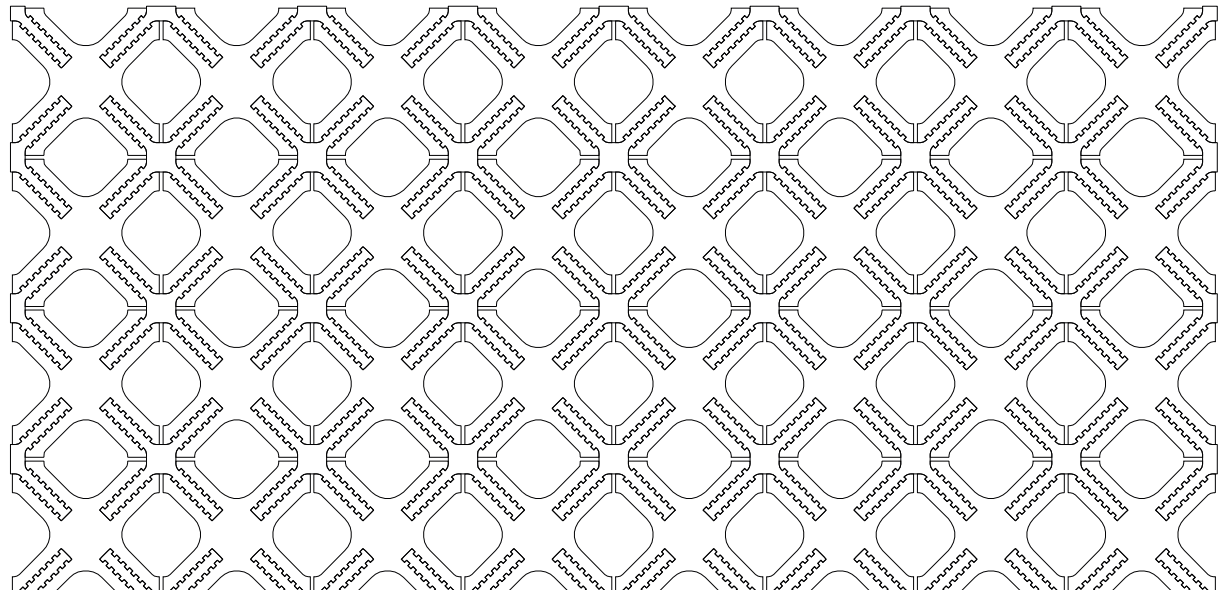


Abb. 148: Modul- und Knotenvariante im flächigen Verband

Veränderung der Knotengeometrie

Das Tragverhalten von „Ceramic Translation“ - Tragstrukturen wird von der Kraftübertragung zwischen den Steinen stark beeinflusst. Das Verbindungsprinzip und die Ausformung des Knotenpunktes sind dabei maßgebend für die Kraftübertragung von Stein zu Stein verantwortlich. In dieser Modul- und Knotenvariante soll die Kraftübertragung durch das tiefe Eindringen der Knotenelemente in die Modulsteine im Vergleich zur Modulgeometrie des Prototypen verbessert werden. Die Belastung wird somit nicht nur punktuell vom Knoten auf das Modul übertragen, sondern kann über

einen größeren Bereich verteilt, von der Keramik aufgenommen werden. Die Modulgeometrie in dieser Variante ergibt sich hauptsächlich aus den Anforderungen an den Knotenpunkt. Jeweils vier Steine bilden einen kreuzförmigen Knoten, welcher mit Mörtel ausgegossen wird. Um Zugkräfte aufnehmen zu können, wird vor dem Vergießen Bewehrungsstahl eingelegt. Um eine starke, kraftschlüssige Verbindung zwischen Stein und Mörtel zu erreichen, sind die knotenbildenden Wände des Moduls mit eckigen Zähnen versehen.

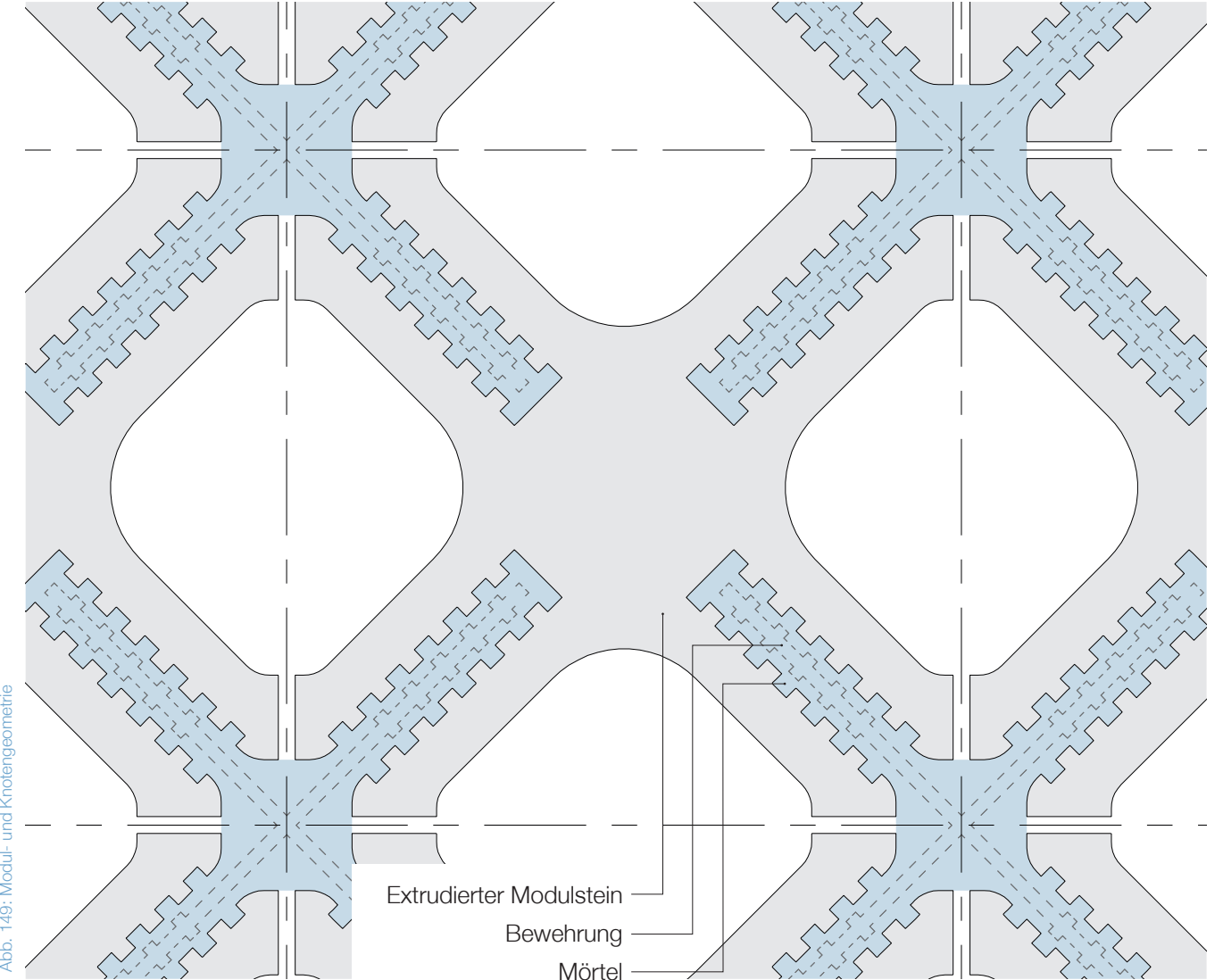


Abb. 149: Modul- und Knotengeometrie

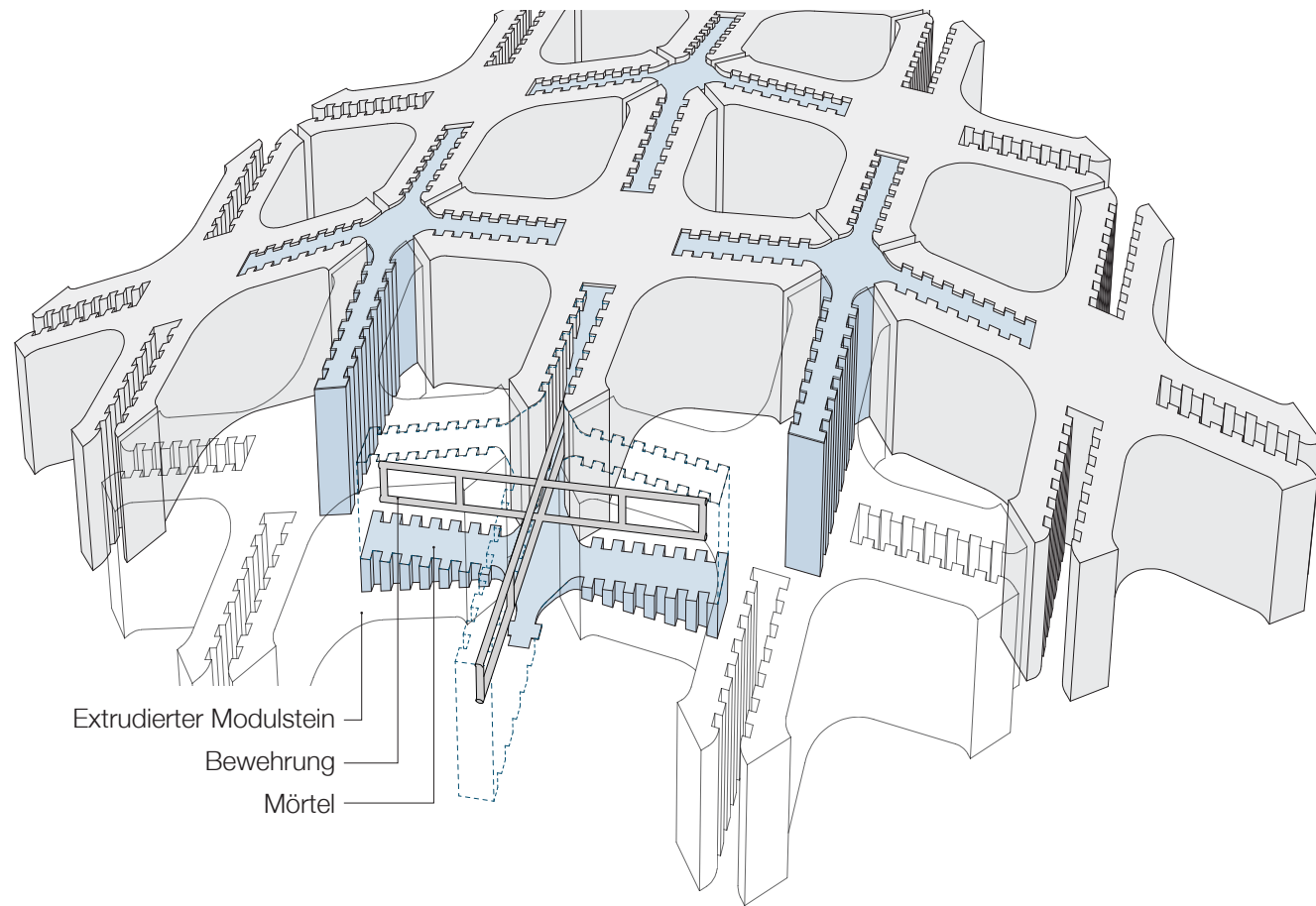


Abb. 150: Verbindungsprinzip

Verbindungsprinzip

Auch in dieser Variante werden die Steine auf eine Schalung aufgelegt. Je nach statischen Anforderungen wird die Bewehrung in Form von Bewehrungsstahl eingelegt. Danach wird der gesamte Knotenpunkt mit Mörtel ausgegossen. Daraus ergeben sich hohe Anfor-

derungen an den Schalungsbau. Dieser muss die Steine in der gewünschten Position halten und gleichzeitig den Knotenbereich abdichten, um ein optisch ansprechendes Ergebnis zu erreichen.

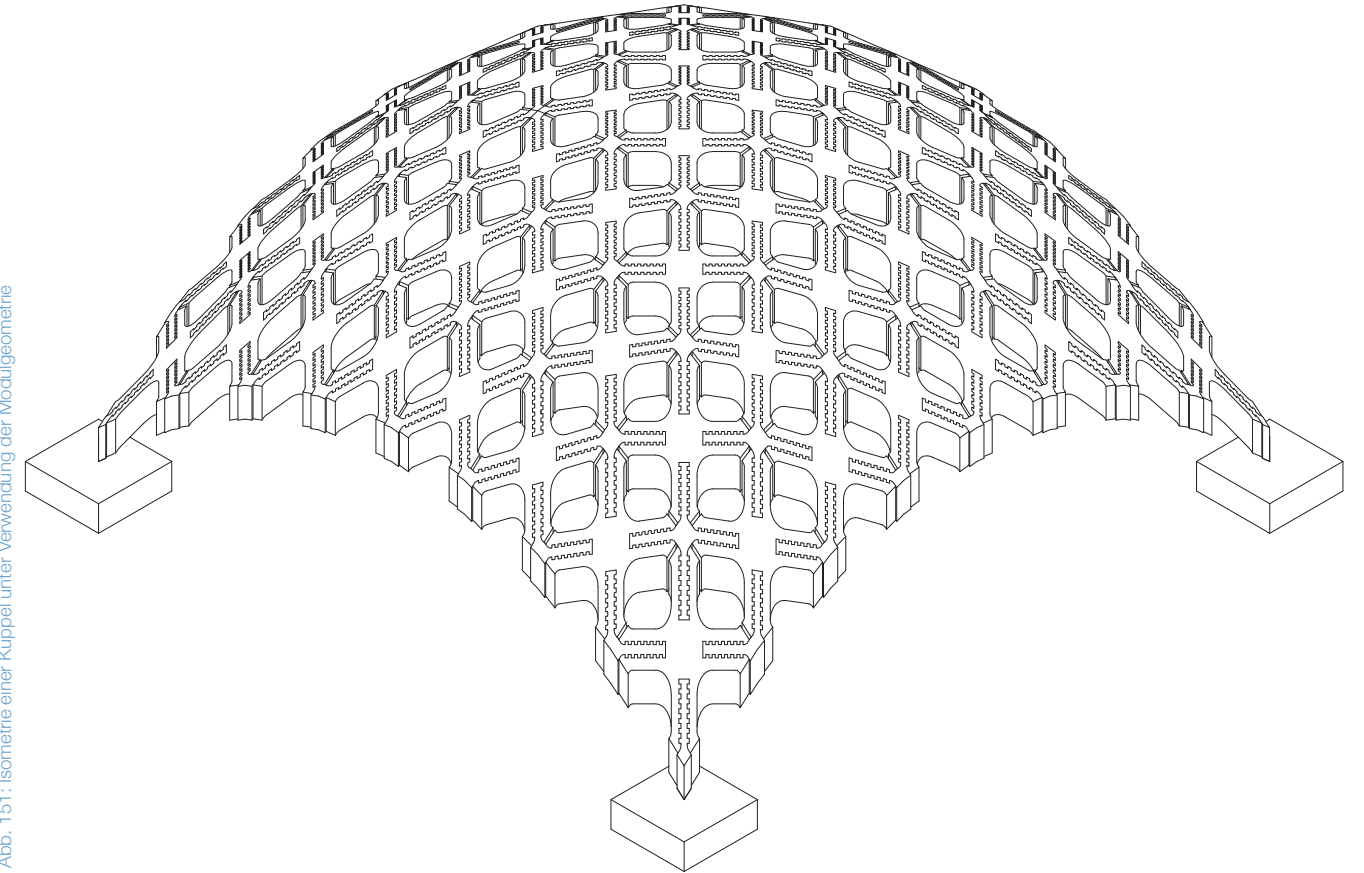


Abb. 151: Isometrie einer Kuppel unter Verwendung der Modulgeometrie

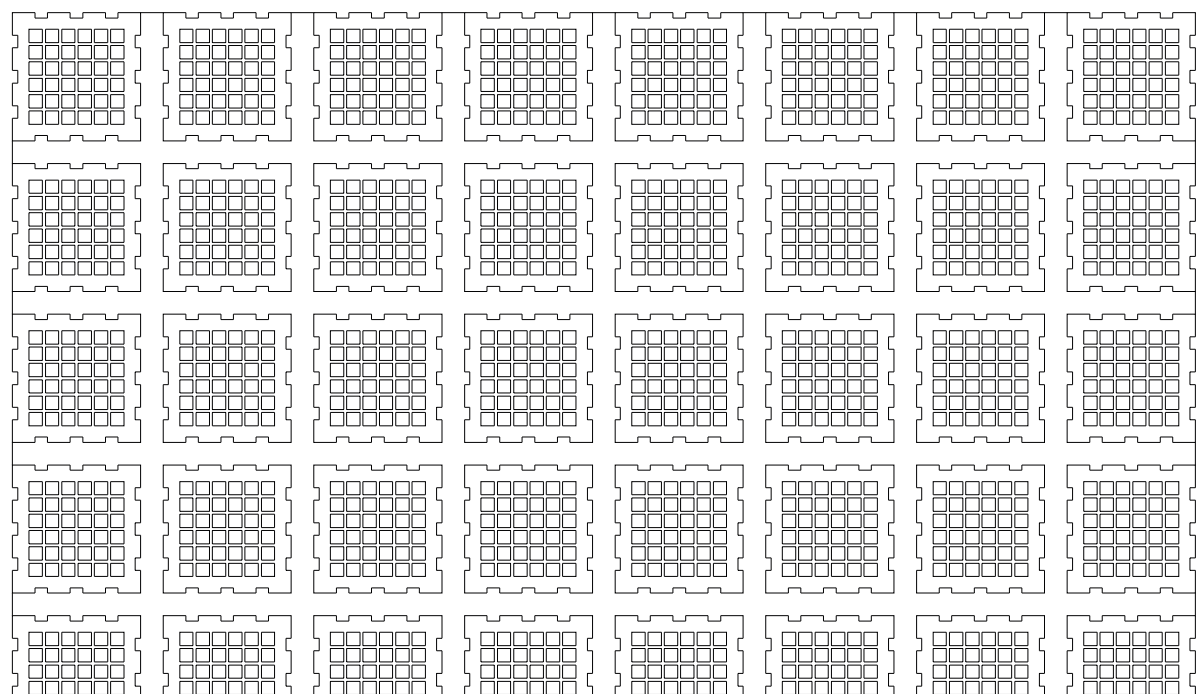


Abb. 152: Modul- und Knotenvariante im flächigen Verband

Verbessertes Tragverhalten aufgrund durchlaufender Bewehrung und Ausmörtelung

In dieser Variante lösen sich die Knotenpunkte in ein durchgehend ausgemörteltes Gitternetz auf. Dadurch kann eine durchlaufende Bewehrung in das System eingebracht werden. Das Gitternetz aus Mörtel und Stahl kann die Zugkräfte im Tragwerk aufnehmen, die zwischenliegenden Keramik - Module die Druckkräfte. Diese Variante verwendet das selbe Konstruktionsprinzip wie Eladio Diestes bewehrtes Ziegelmauerwerk. Auch hier werden die Steine so angeordnet, dass in

beide Richtungen durchlaufende Fugen entstehen. Somit können Stahldrähte kreuzweise in den Fugen verlaufen. Um Gewicht zu sparen, sind die Modulplatten perforiert, wodurch eine Hochlochziegeloptik entsteht. Auch in dieser Variante sind die vertikalen Außenflächen der Steine mit eckigen Zähnen versehen, um eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Keramik und Mörtel zu erreichen.

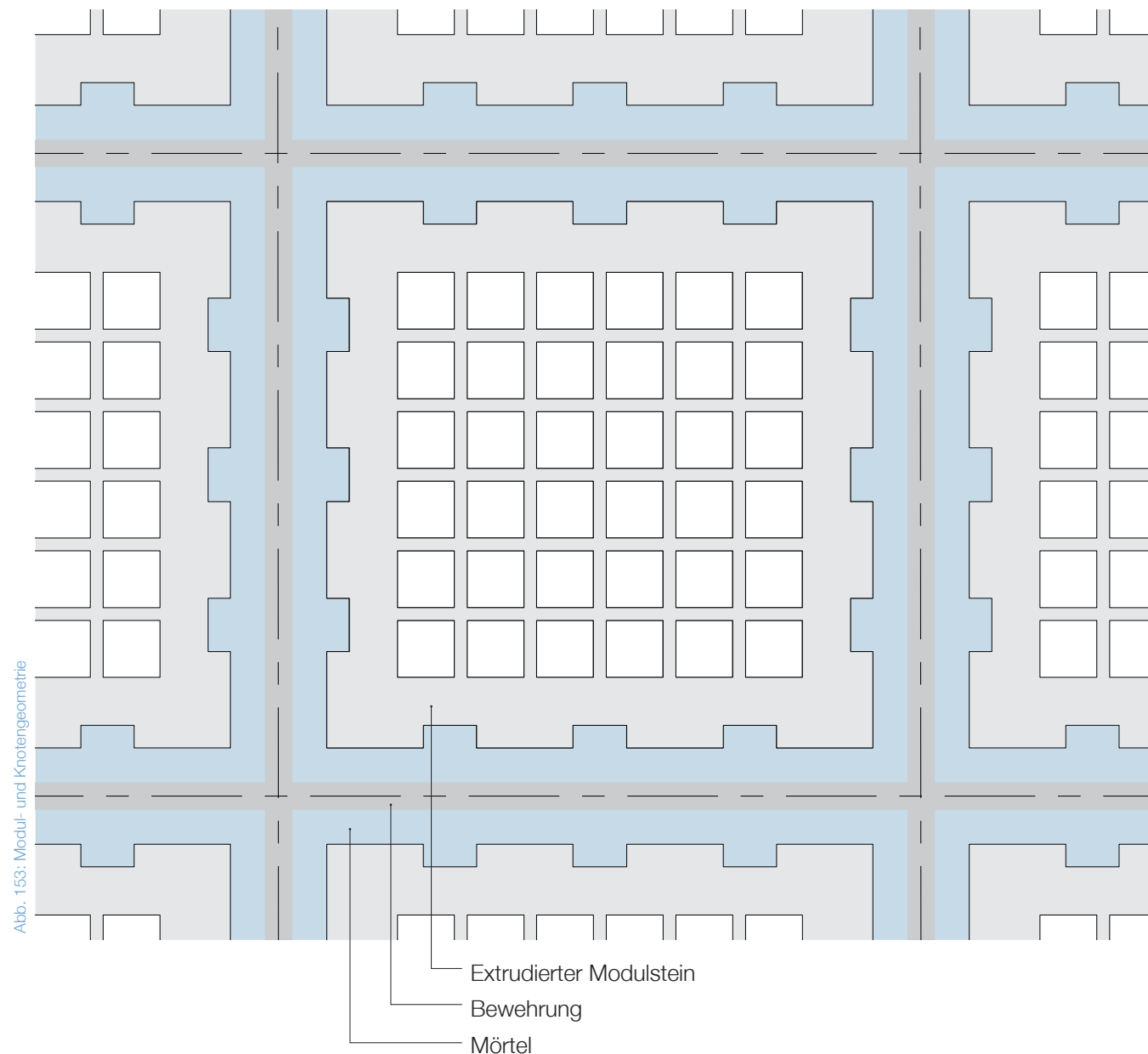


Abb. 153: Modul- und Knotengeometrie

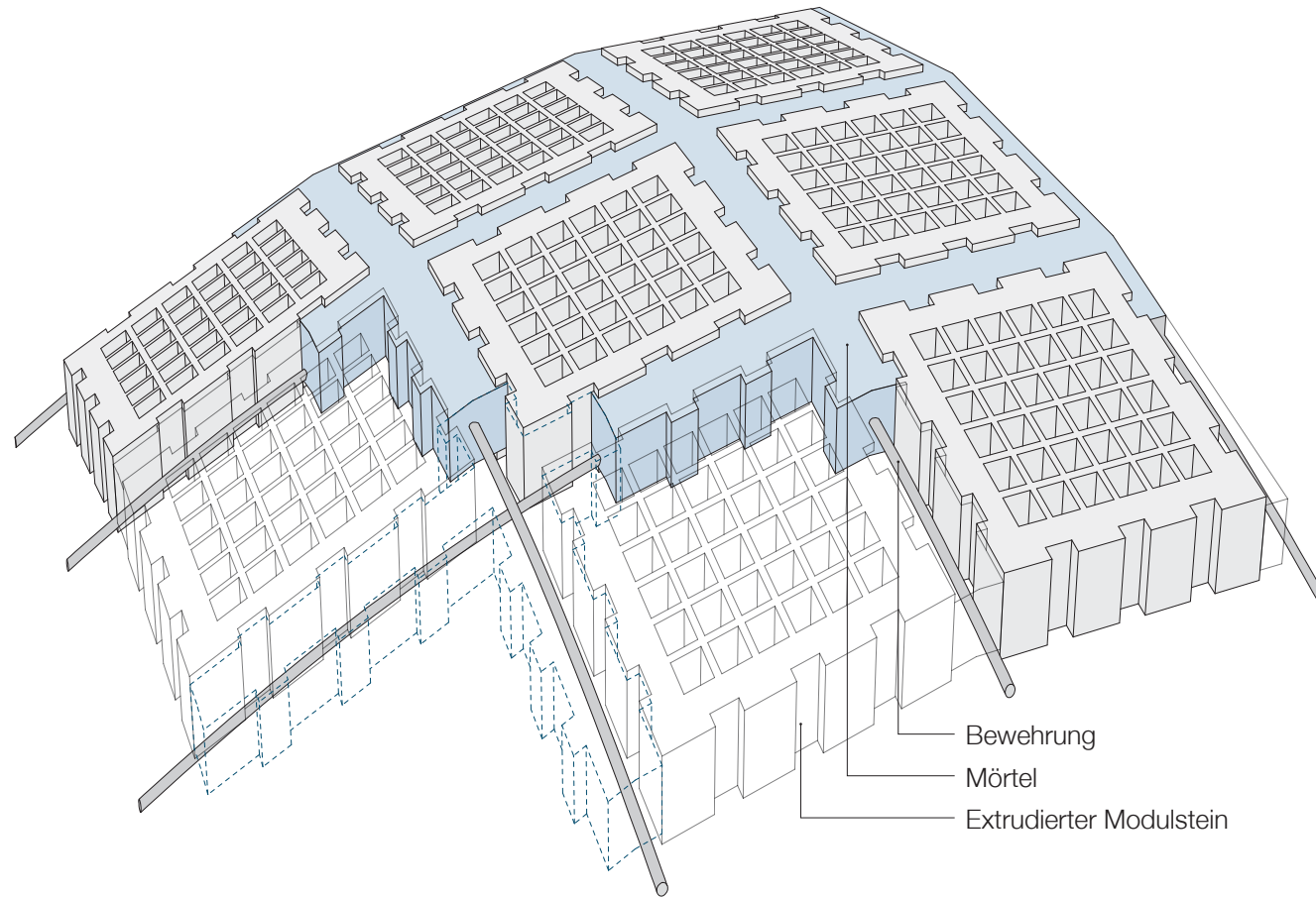


Abb. 154: Verbindungsprinzip

Verbindungsprinzip

Um eine gewünschte Geometrie zu erreichen, werden auch in dieser Variante die Steine auf eine Schalung aufgelegt. Je nach statischen Anforderungen wird die Bewehrung in Form von Bewehrungsstahl zwischen den Steinen verlegt. Die Bewehrung verläuft in

zwei Richtungen und überkreuzt sich an den Modulecken. Danach werden die Bereiche zwischen den Steinen vollständig ausgegossen, wodurch sich ein Stahl - Mörtel Gitternetz um die Module bildet. Auch in dieser Variante ergeben sich hohe Anforderungen

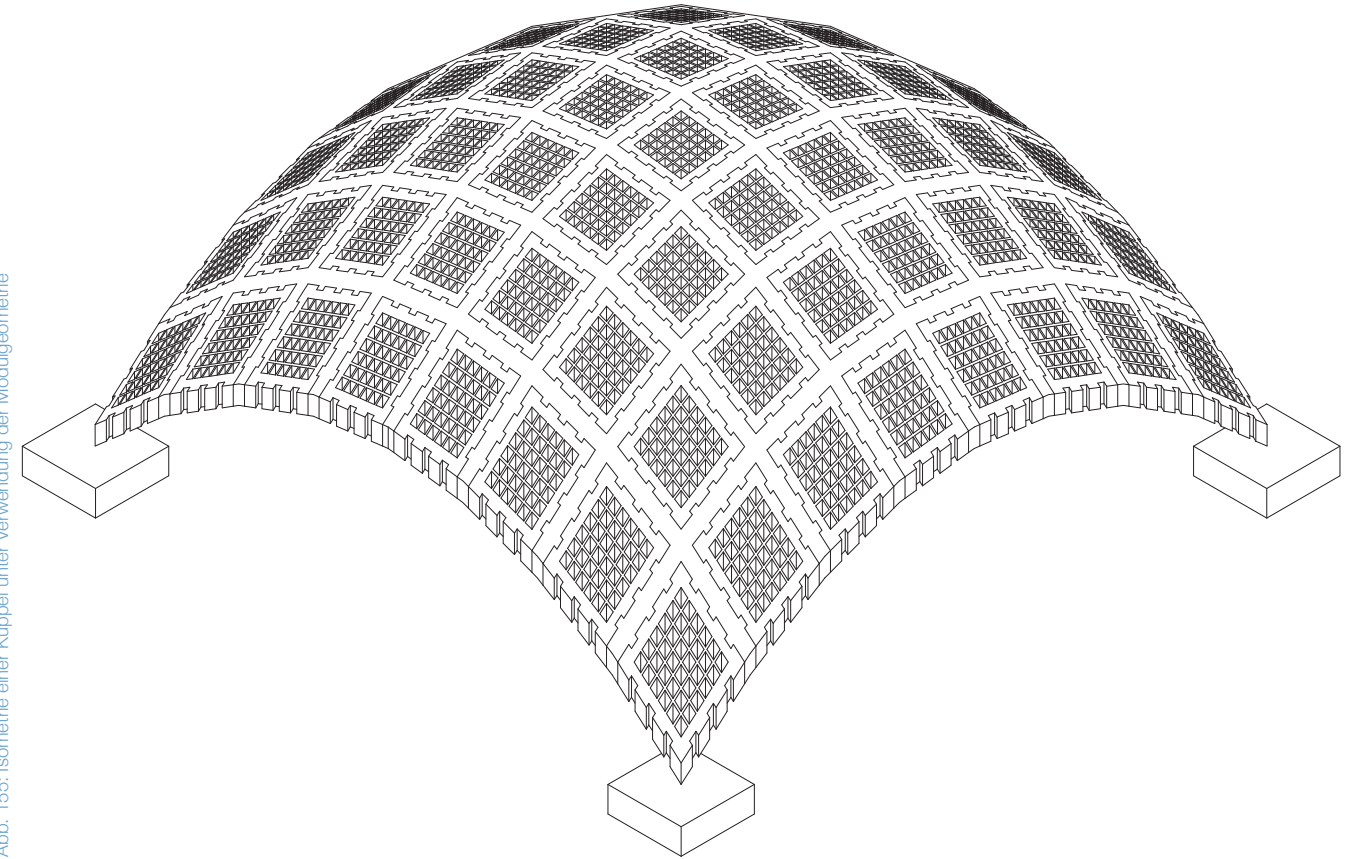


Abb. 155: Isometrie einer Kuppel unter Verwendung der Modulgeometrie

an den Schalungsbau. Dieser muss die Steine in der gewünschten Position halten und gleichzeitig die zu füllenden Bereiche abdichten.

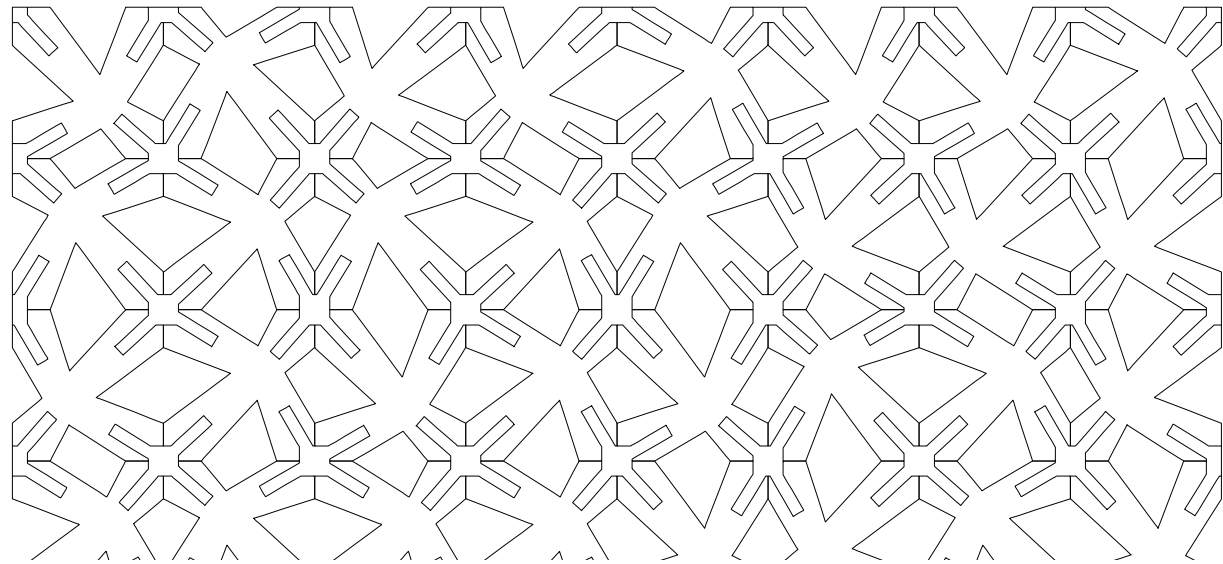


Abb. 156: Gestaltungsvariante im flächigen Verband

Optisches Auflösen der Modularität

Durch die Ausformungen der Modulsteine in den zuvor gezeigten Varianten entstanden Gitterschalen, in denen die Modularität des Systems klar sichtbar ist. Es entstanden additive Strukturen, deren Erscheinen vom strengen Rasterprinzip geprägt werden. Die Wiederholung der grundlegenden Querschnittsgeometrie ist das bestimmende gestalterische Element. In dieser Variante wird diese optische Modularität aufgelöst. Als Grundlage dient ein kreuzförmiger Profilquerschnitt. Diese Form entsteht durch die Verbreiterung der Diagonalen eines Rasterfeldes um den nötigen Materialquerschnitt. An

jeder Seite werden zwei doppelt symmetrische Punkte festgelegt, an denen die Module aneinander stoßen. Nun wird der Schnittpunkt der Diagonalen in zwei Richtungen verschoben. Dadurch wird die Kreuzform verzerrt und es entsteht eine Asymmetrie. Die Stoßpunkte behalten ihre Position, um die Module untereinander ohne Versatz verbinden zu können. Werden die Steine einzeln verdreht angeordnet, verschwindet durch die Asymmetrie der Form die Modularität in der Struktur und die einzelne, immer gleiche Querschnittsfläche ist nicht mehr zu erkennen.

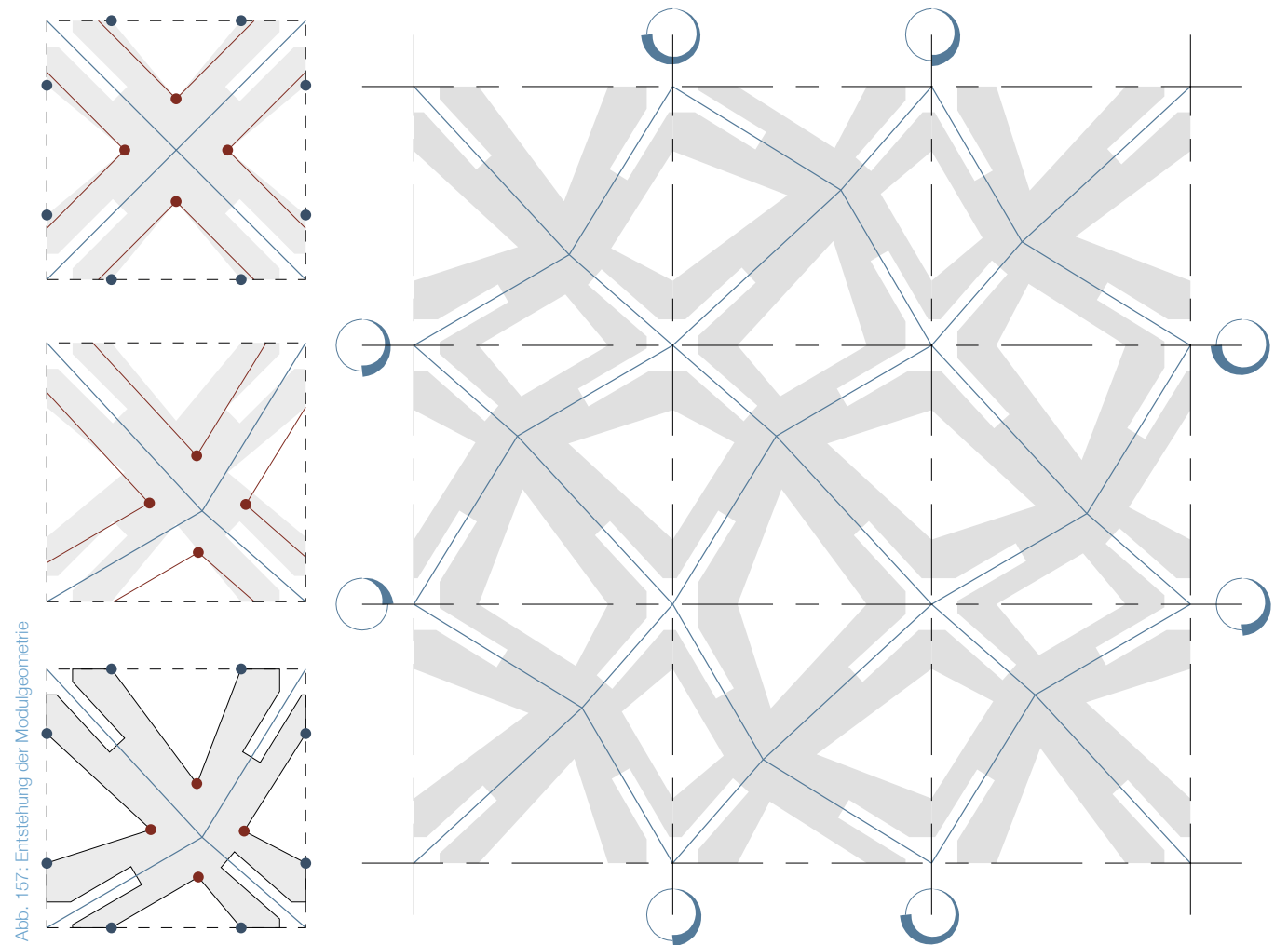


Abb. 157: Entstehung der Modulgeometrie

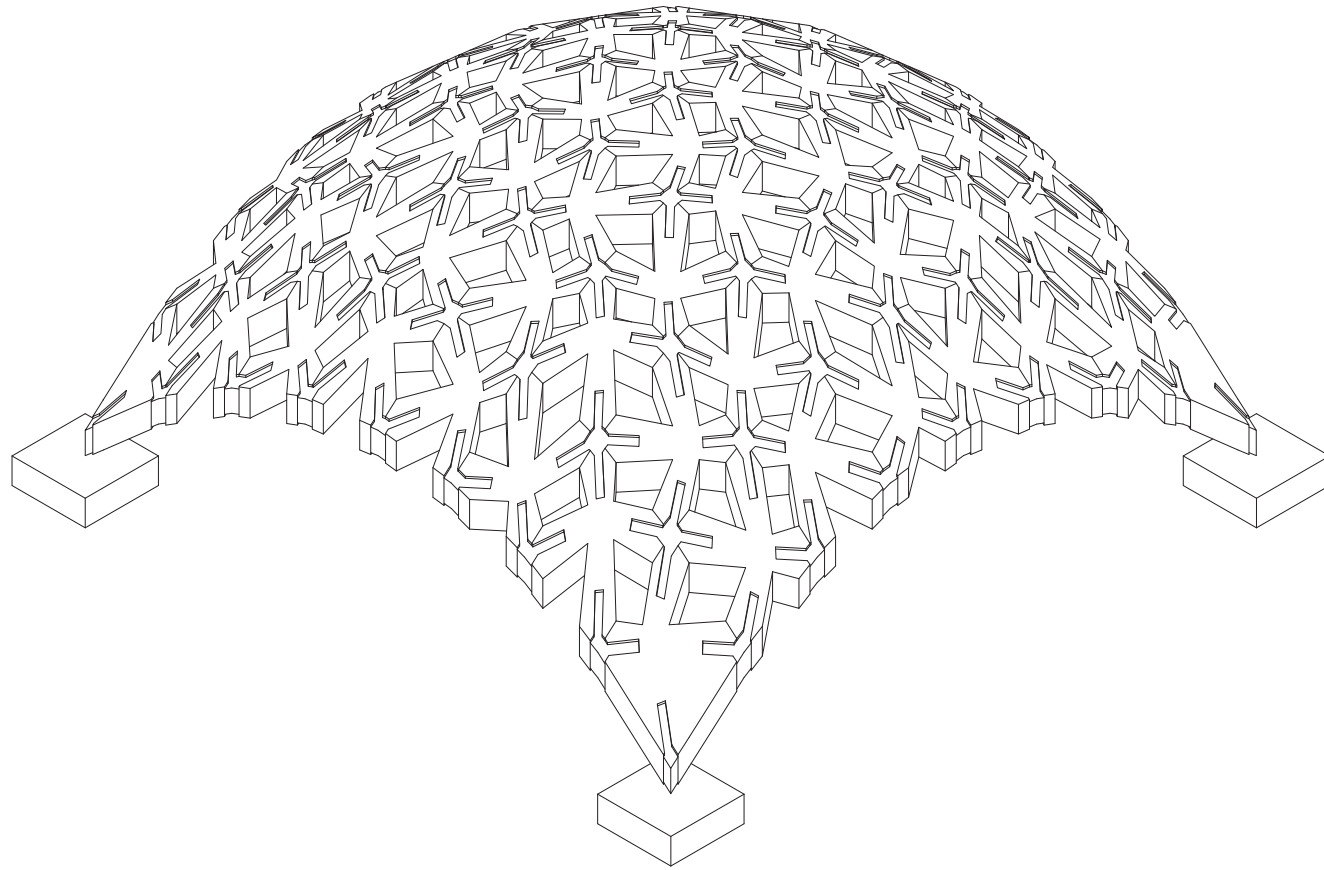


Abb. 158: Isometrie einer Kuppel unter Verwendung der Modulgeometrie

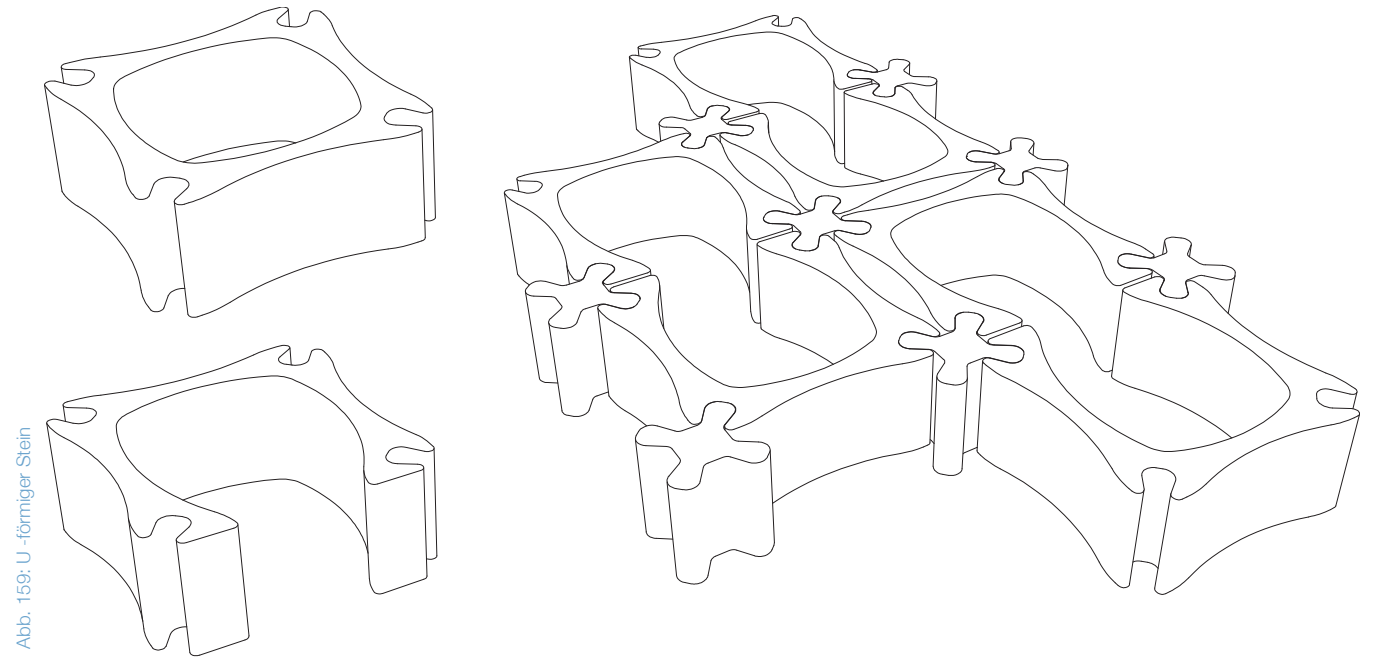


Abb. 159: U-förmiger Stein

Verwendung mehrerer Modulformen

Eine „Ceramic Translation“ - Tragstruktur kann auch mehrere verschiedene Modulgeometrien beinhalten, wodurch statische, formale oder gestalterische Anforderungen erfüllt werden können. In dieser Variante wird das System mit einem zweiten, U-förmigen, Stein erweitert, welcher aus dem Grundmodul entwickelt wurde. Werden zwei U-Module gespiegelt miteinander verbunden, entsteht optisch ein Grundmodul mit doppelter Länge. Durch diesen Vorgang können Tragstruk-

turen in Form verschiedener Verlegemuster entworfen werden. Das Einführen dieses zweiten Steines kann auch zur optischen Auflösung von Modularität und Rasterung führen, ist jedoch nur sinnvoll, wenn es keine statischen Nachteile mit sich bringt. Das Bausystem funktioniert natürlich auch mit mehreren verschiedenen Modulformen, solange diese dem Raster zugrundeliegen. Mit steigender Anzahl der Steinformen steigt jedoch auch der Aufwand in der Herstellung.

Abb. 160: Verlegemuster als Draufsicht und Isometrie

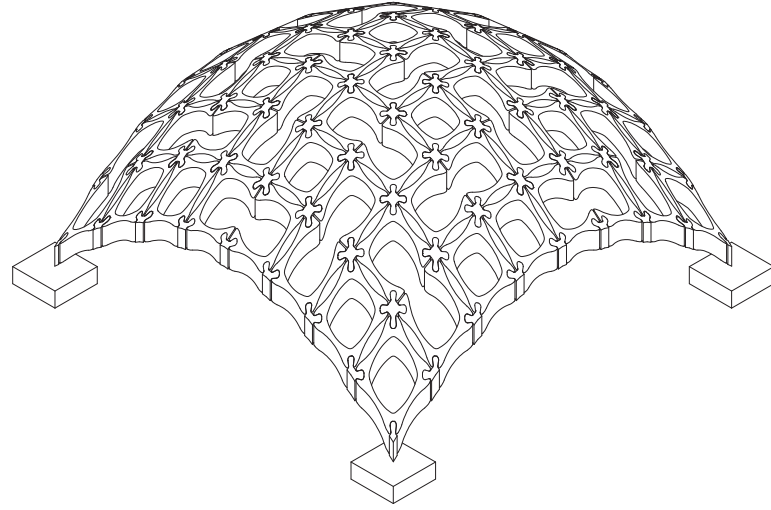
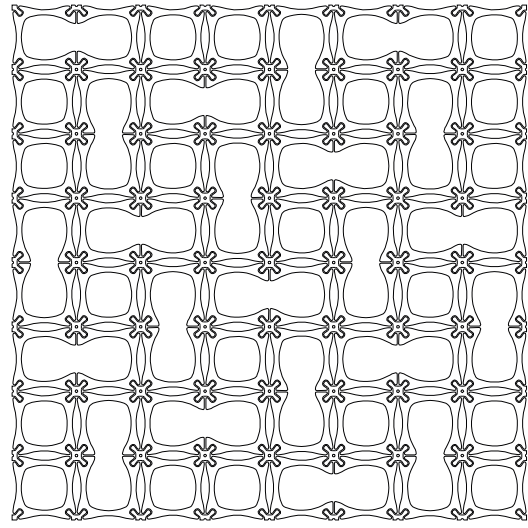


Abb. 161: Läuferverband als Draufsicht und Isometrie

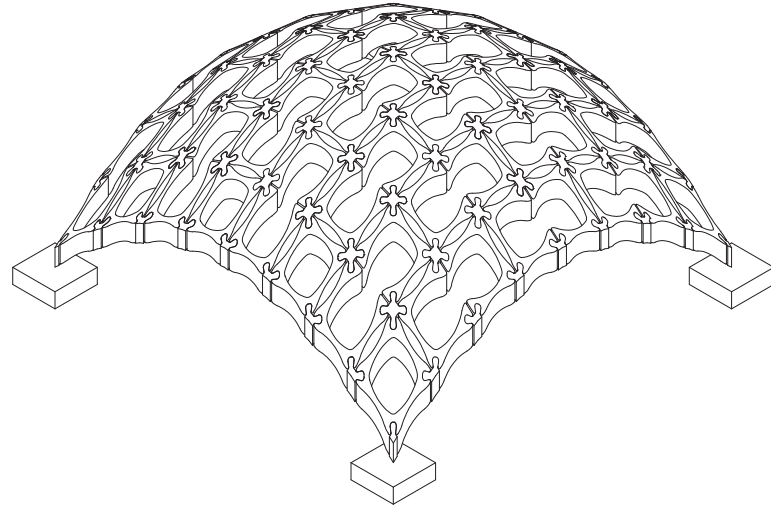
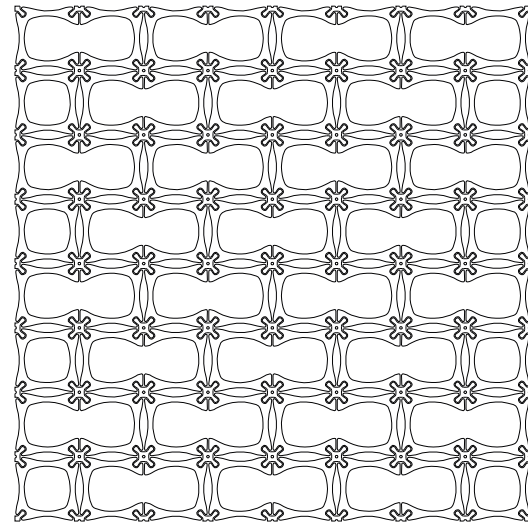


Abb. 162: Parkettverband als Draufsicht und Isometrie

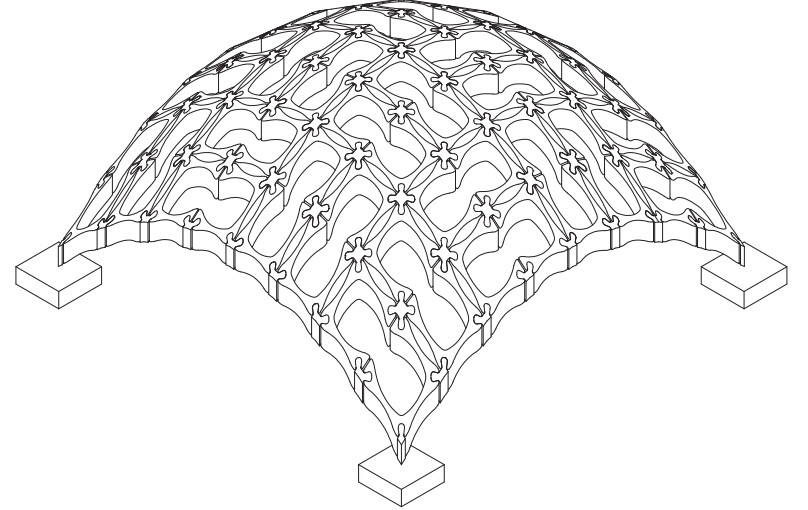
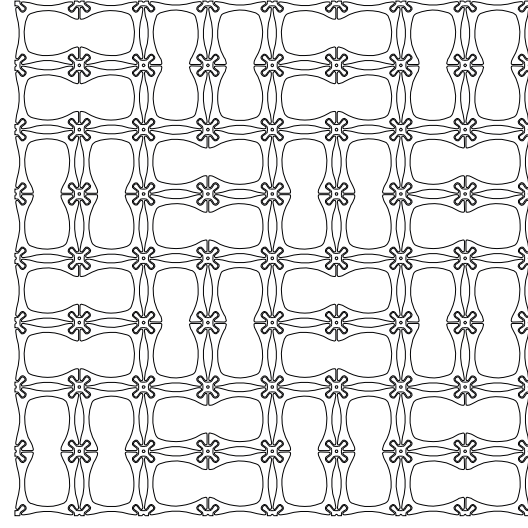
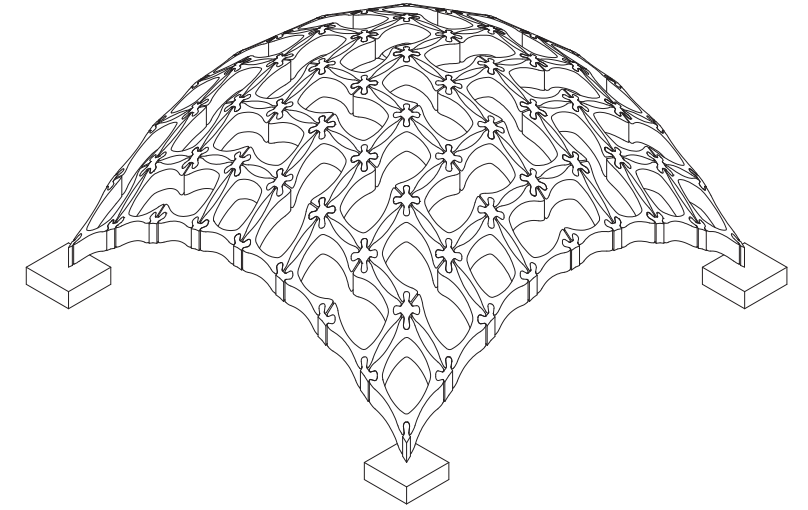
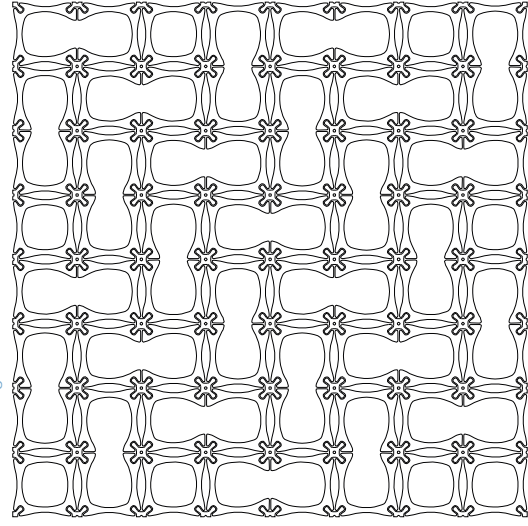


Abb. 163: Ellbogenverband als Draufsicht und Isometrie



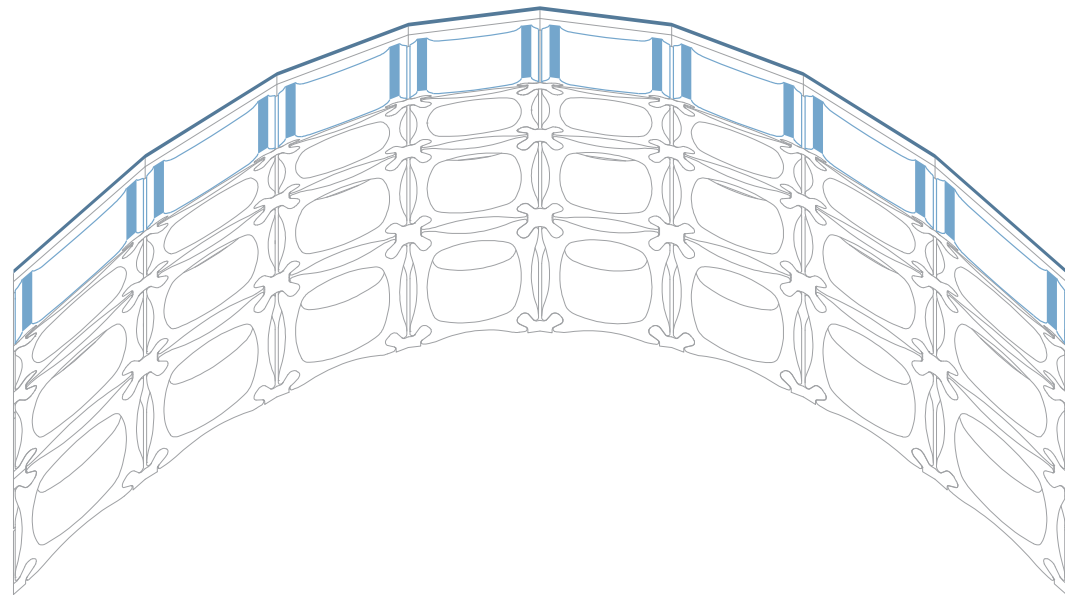


Abb. 164: Positionierung der Hülle über der Tragstruktur

Verwendung von Plattenwerkstoffen

Translationsgeometrien besitzen die Eigenschaft der Unterteilung in viereckige planare Flächen. Dies ermöglicht die Verwendung von Plattenwerkstoffen in der Hüllkonstruktion von Translationsschalen. Somit stellt dieses Prinzip eine geeignete Möglichkeit der Eindeckung von „Ceramic Translation“ - Tragstrukturen dar.

Hüllkonstruktion

Die Hülle eines Bauwerks kann verschiedene Aufgaben, wie thermische Trennung oder Witterungsschutz, übernehmen. Sie stellt die Trennebene zwischen innen und außen dar. Abhängig von diesen Aufgaben ergeben sich verschiedene Anforderungen an die Hüllkonstruktion. Diese ist aber auch abhängig von der Lage der Trennebene. Im Rahmen der Masterarbeit wurden Hüllkonstruktionen entwickelt die in ihrer Position über der Tragwerksebene liegen.

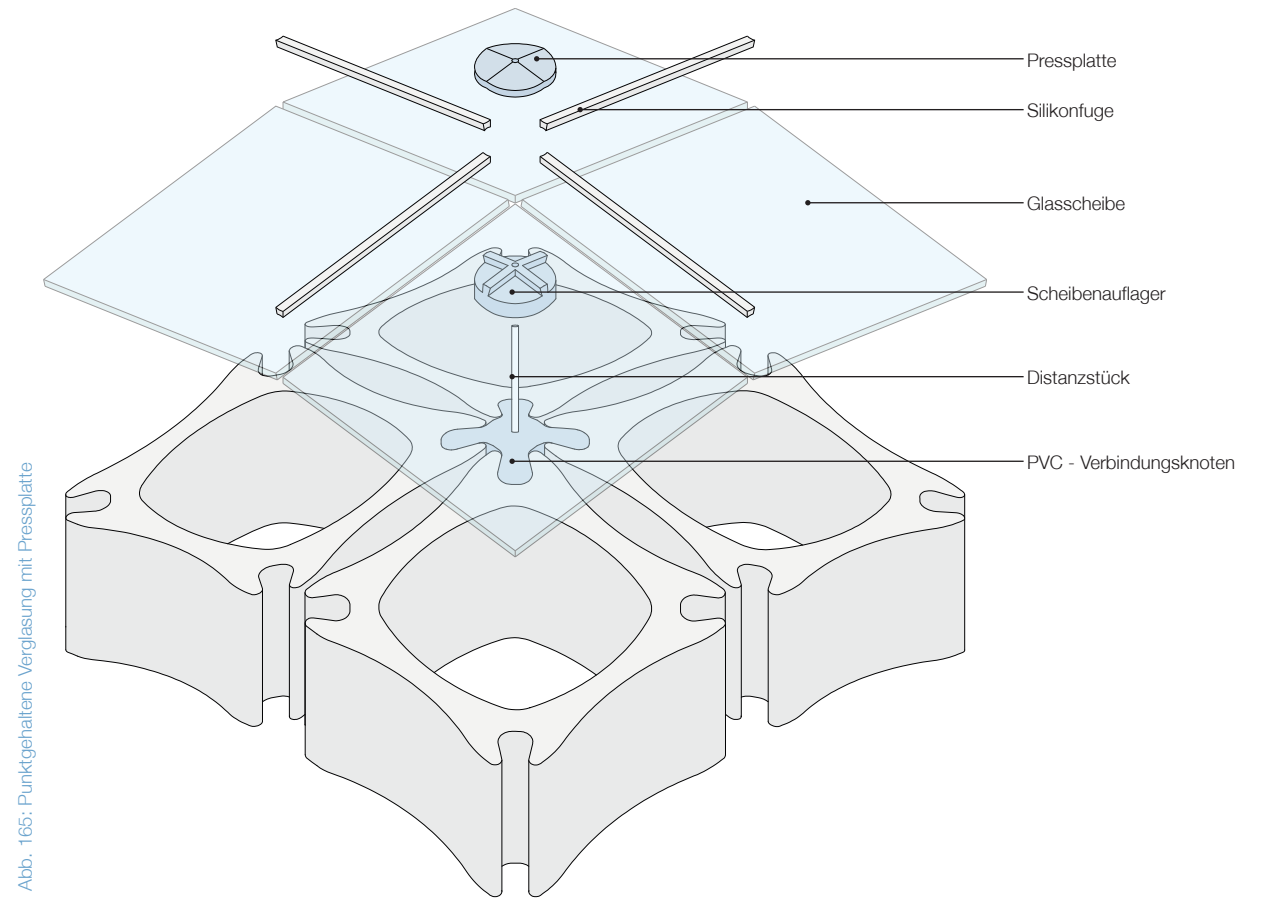
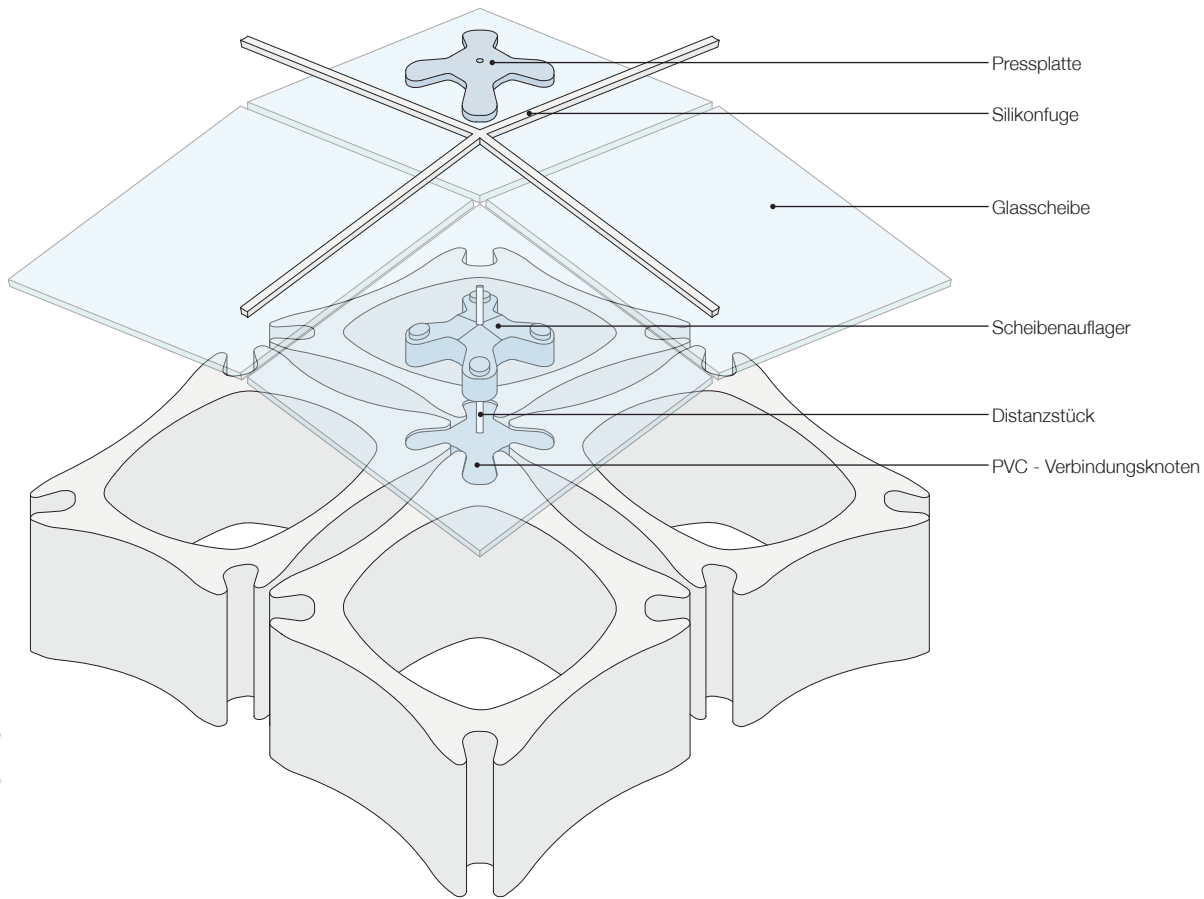


Abb. 165: Punktgehaltene Verglasung mit Pressplatte

Punktgehaltene Verglasung mit Pressplatten

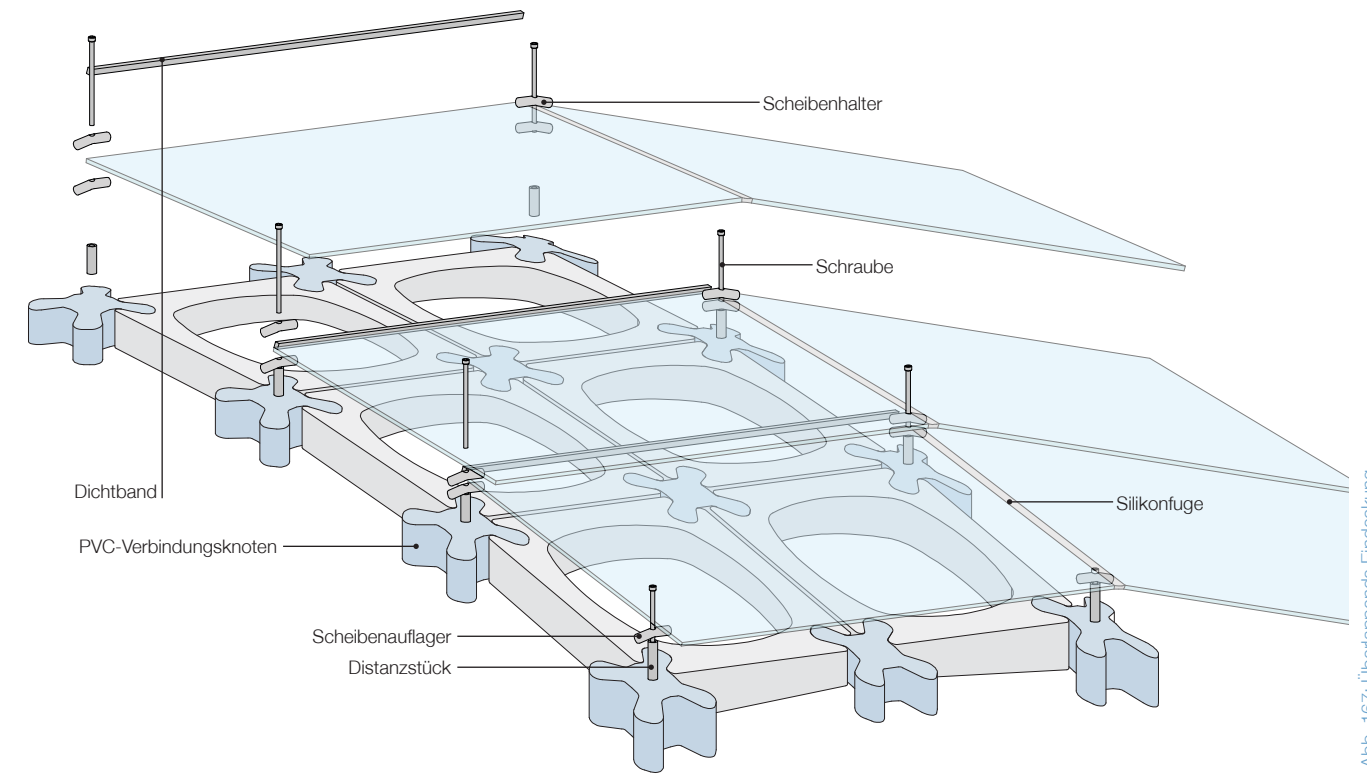
Eine Variante der Scheibenthalterung wäre die Befestigung mittels Pressplatten. Dabei werden die Scheiben an den Ecken nach unten gepresst und mit der Unterkonstruktion durch die Fugen verschraubt. Zuerst wird das Scheibenaufleger über ein Distanzstück am

PVC - Verbinder montiert. Bei der Montage kann das Knotenelement in seiner Position an mögliche Ungenauigkeiten angepasst werden. Danach können die Glasscheiben positioniert werden. Die Auflagerflächen des Knotenpunktes sind an die verschiedenen Winkel



der Scheiben angepasst. Zuletzt werden die Pressplatten aufgesetzt und die Fugen zwischen den Scheiben abgedichtet. Die Gläser können auch über Kreuzhalter gelagert werden. In Abb. 166 übernimmt der Kreuzhalter die Querschnittsform des PVC - Verbinders, was

sich konstruktiv wie formal anbietet. Da die Auflagerelemente in ihrer Geometrie sehr komplex sind, müssen diese gefräst oder 3D - gedruckt werden. Außerdem können je nach Form der Tragstruktur viele verschiedene Knotengeometrien auftreten.



Überlappende Eindeckung

In der darüber liegenden Abbildung besteht die Eindeckung aus Glasbändern die in eine Richtung überlappen. Die Platten sind an 2 Punkten fixiert und liegen an 2 Punkten auf der darunter liegenden Halterung der nächsten Scheiben auf. Die Fugen zwischen den Platten einzelner Glasbänder werden mit Silikon abgedichtet. Dieses Überlappungsprinzip funktioniert nur, wenn

die Geometrie der Dachfläche eine Entwässerung in Überlappungsrichtung zulässt. Durch die Anforderungen an die Glasformate verlässt man mit dieser Variante das geometrische Prinzip von „Ceramic Translation“ wodurch die Komplexität im Bausystem steigt.

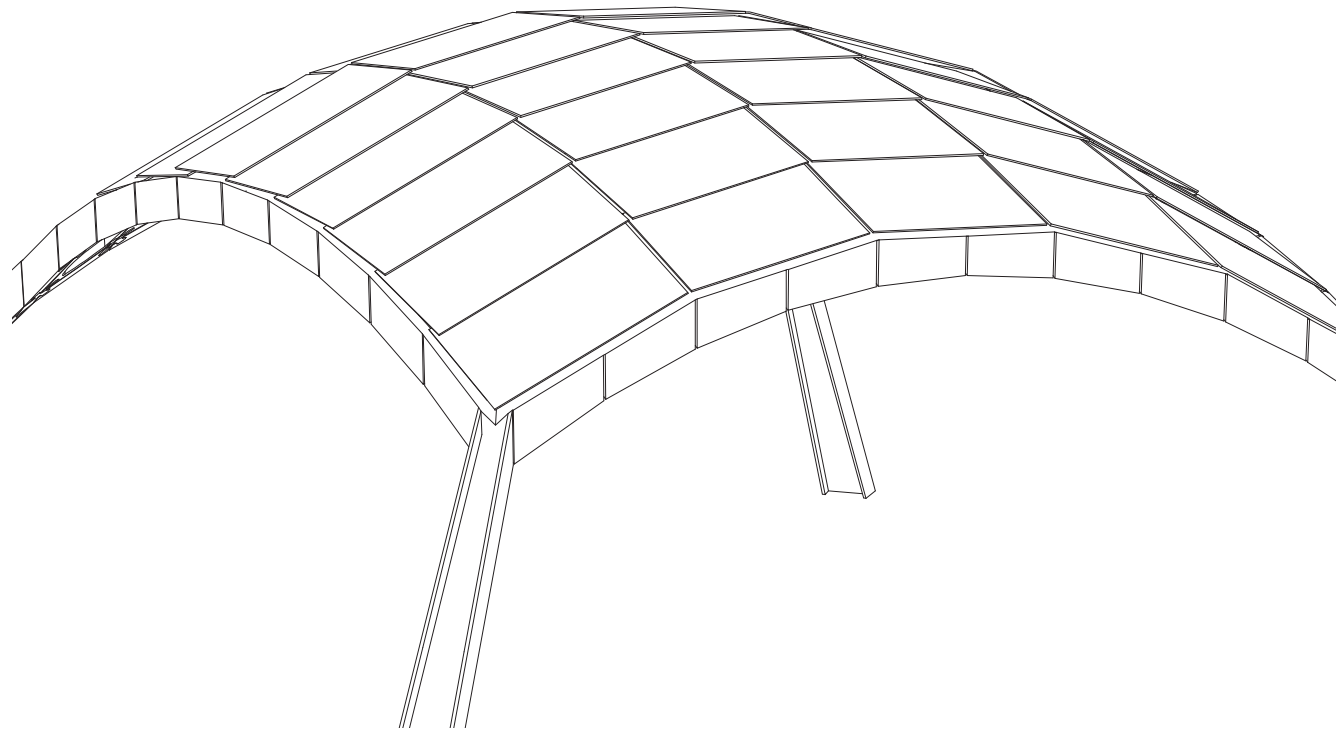


Abb. 168: Überlappende Eindeckung

Mit der überlappenden Eindeckung verändert sich auch das äußere Erscheinungsbild eines Bauwerks. Es entsteht eine schuppenartige kantige Oberfläche die sich vom höchsten Punkt der Struktur nach unten ausbreitet. Im Gegensatz zur Pressplattenkonstruktion sind bei dieser Variante keine Konstruktionselemente von außen sichtbar. Die Ausformung von Dachflächen wird

in ihrer Geometrie durch das Ablaufprinzip bestimmt und muss ein gewisses Mindestgefälle aufweisen um wasserdicht zu sein.

5

Um dem „Ceramic Translation“ - Bausystem den nötigen Realitätsbezug zu verleihen, wurde ein architektonischer Entwurf in Form eines Forschungspavillons entwickelt. An diesem wurden die Erkenntnisse der Untersuchungen des Systems überprüft und dargestellt. Die konstruktive Ausformung wichtiger Detailpunkte sowie die statische Untersuchung von „Ceramic Translation“ hinsichtlich praktischer Anwendung standen dabei im Vordergrund.

Abb. 169: Visualisierung des Forschungspavillons

Forschungspavillon

Um die gewonnenen Erkenntnisse aus den Untersuchungen beider Masterarbeiten zu überprüfen, wurde ein Pavillon entwickelt, welcher die praktische Anwendung von „Ceramic Translation“ in Form eines architektonischen Entwurfs darstellt. Der Forschungspavillon bietet die Möglichkeit, an einem realitätsnahen Beispiel wichtige konstruktive Detailpunkte zu lösen und auszuformen. Vor allem die Verbindung des keramischen Systems mit anderen Bauteilen, wie Stützen oder Eindeckung, konnte durch den Entwurf überprüft und detailliert werden. Folgende Punkte wurden bei der Entwicklung des Forschungspavillons untersucht und überprüft:

- Optische Erscheinung
- Tragfähigkeit
- Art der Gründung
- Ausformung der Fundamente
- Ausformung, Platzierung und Anschluss von Stützen
- Hüllenkonstruktion
- Entwässerung

Architektonischer Entwurf



Abb. 170: Blick auf den Bauplatz mit Uhrturm



Abb. 171: Blick vom Uhrturm auf das Oberschloss

Schloss Seggau

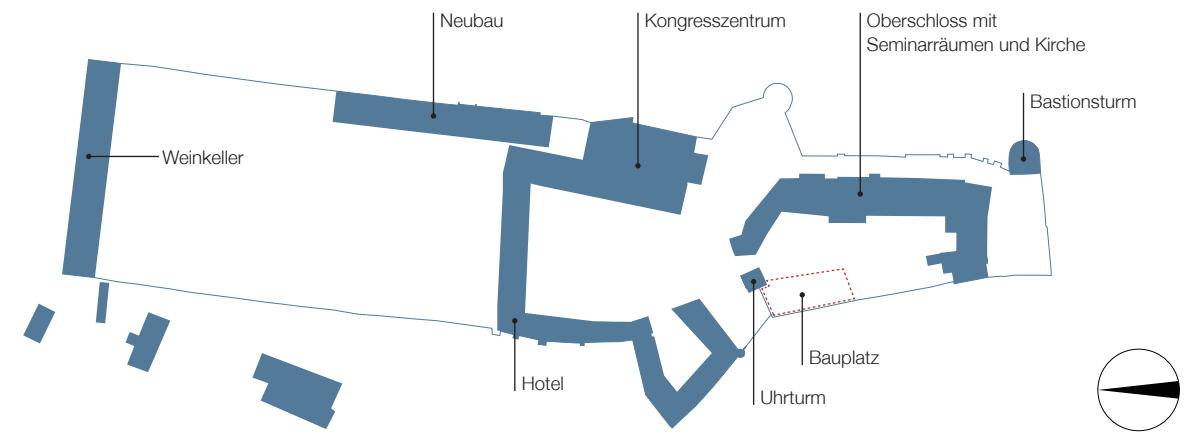
Schloss Seggau war bis 1786 Repräsentationssitz der steirischen Bischöfe und bis ins 20. Jahrhundert Sommerresidenz derselben. Ab 1954 wurden die alten Gebäude umgebaut und als Bildungsstätte verwendet. Anfang der neunziger Jahre wurden erste Baumaßnahmen in Richtung eines modernen Kongress- und Tagungszentrums getätigt. Dieser Umbau wurde 2009 abgeschlossen, so dass sich heute neben dem zeitgemäßen Kongress- und Tagungszentrum ein modernes neu gestaltetes Hotel befindet. Durch die alten gemauerten Gewölbekeller und Arkaden besitzt das Schloss Seggau einen starken Bezug zum Wölbungsbau und dem Baustoff Keramik.

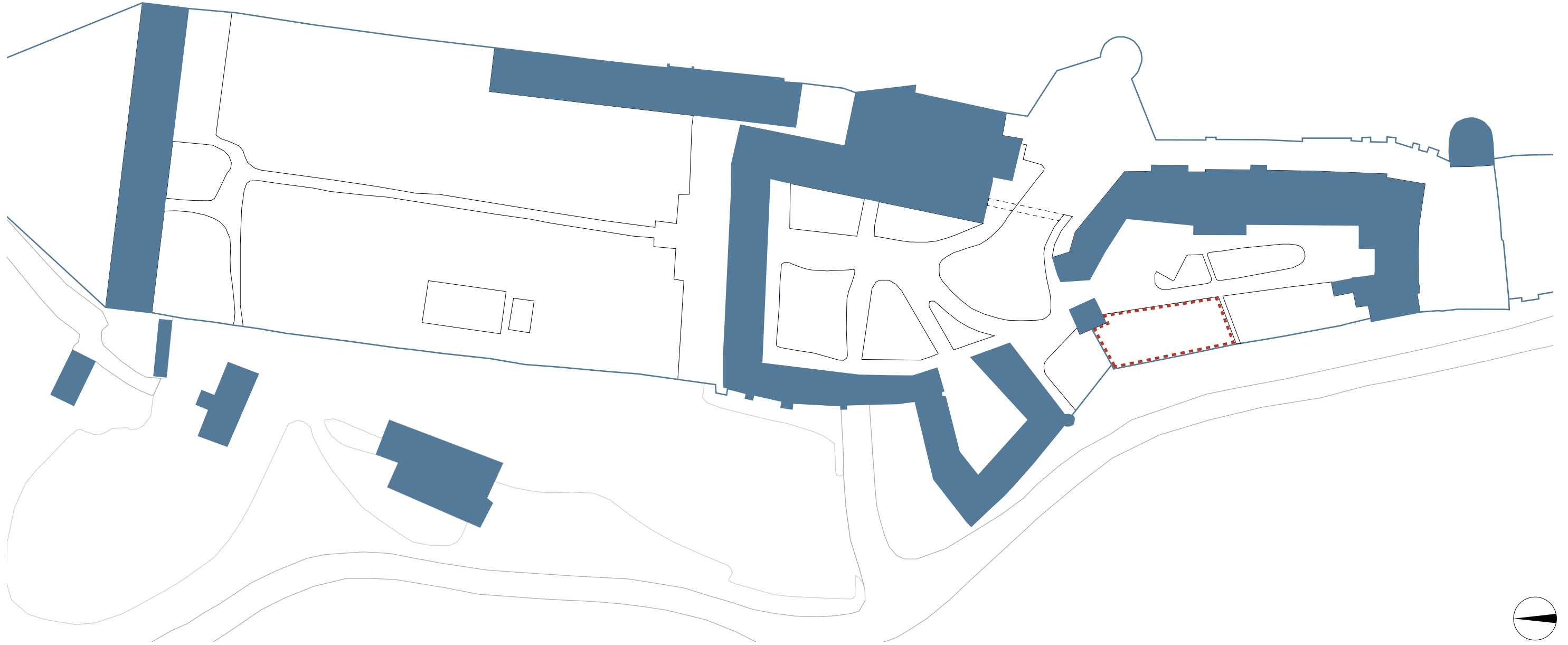
Der Bauplatz des Pavillons befindet sich in der Parkanlage des Oberschlusses in unmittelbarer Nähe zum Uhrturm. Von dieser Grünfläche aus erschließt sich ein wunderbarer Ausblick über das Sulmtal, wodurch der Platz eine hohe Aufenthaltsqualität aufweist. Die historischen Gemäuer des Oberschlusses beinhalten auch Seminarräume. Dadurch wird dieser Bereich des Schlosses sowohl durch Seminar-, Hotel- als auch Tagungsgäste stark frequentiert. Diese Eigenschaften machen den gewählten Bauplatz zum idealen Ort des Verweilens und somit zum perfekten Standort eines Gartenpavillons.



Abb. 172: Orthofoto Gesamtanlage | M 1:2500

Abb. 173: Schwarzplan Gesamtanlage | M 1:2500





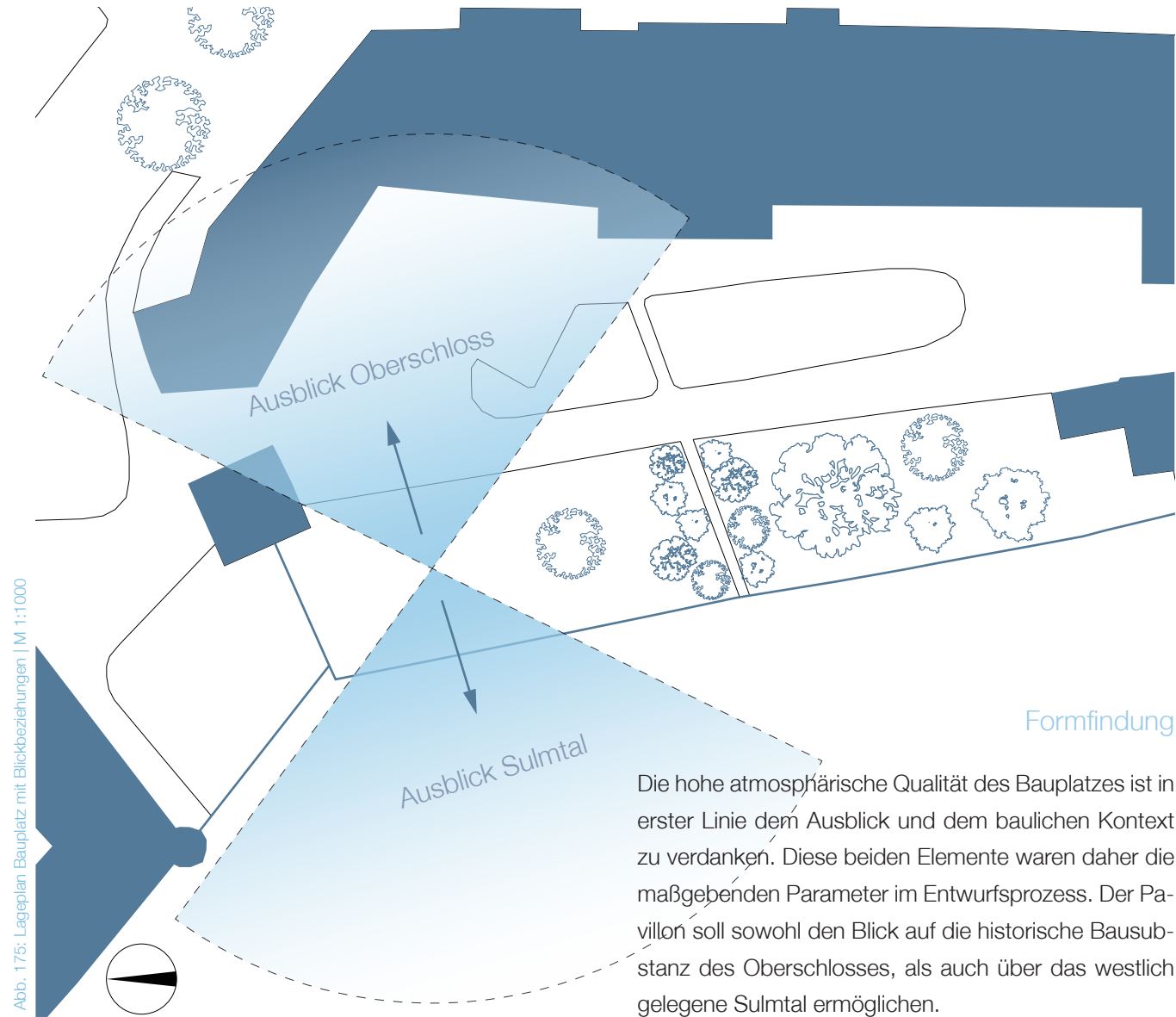


Abb. 175: Lageplan Bauplatz mit Blickbeziehungen | M 1:1000

Formfindung

Die hohe atmosphärische Qualität des Bauplatzes ist in erster Linie dem Ausblick und dem baulichen Kontext zu verdanken. Diese beiden Elemente waren daher die maßgebenden Parameter im Entwurfsprozess. Der Pavillon soll sowohl den Blick auf die historische Bausubstanz des Oberschlusses, als auch über das westlich gelegene Sulmtal ermöglichen.

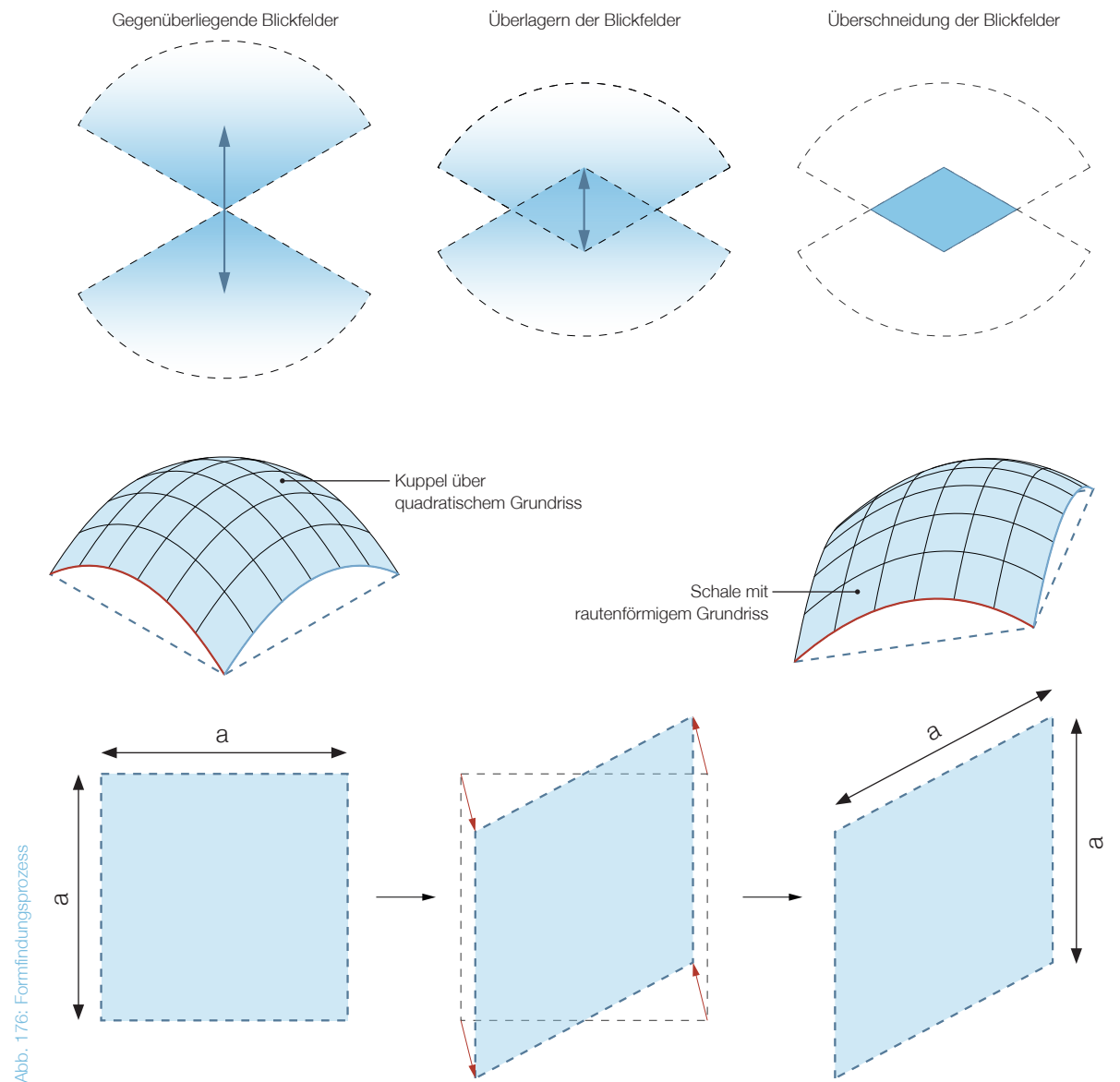


Abb. 176: Formfindungsprozess

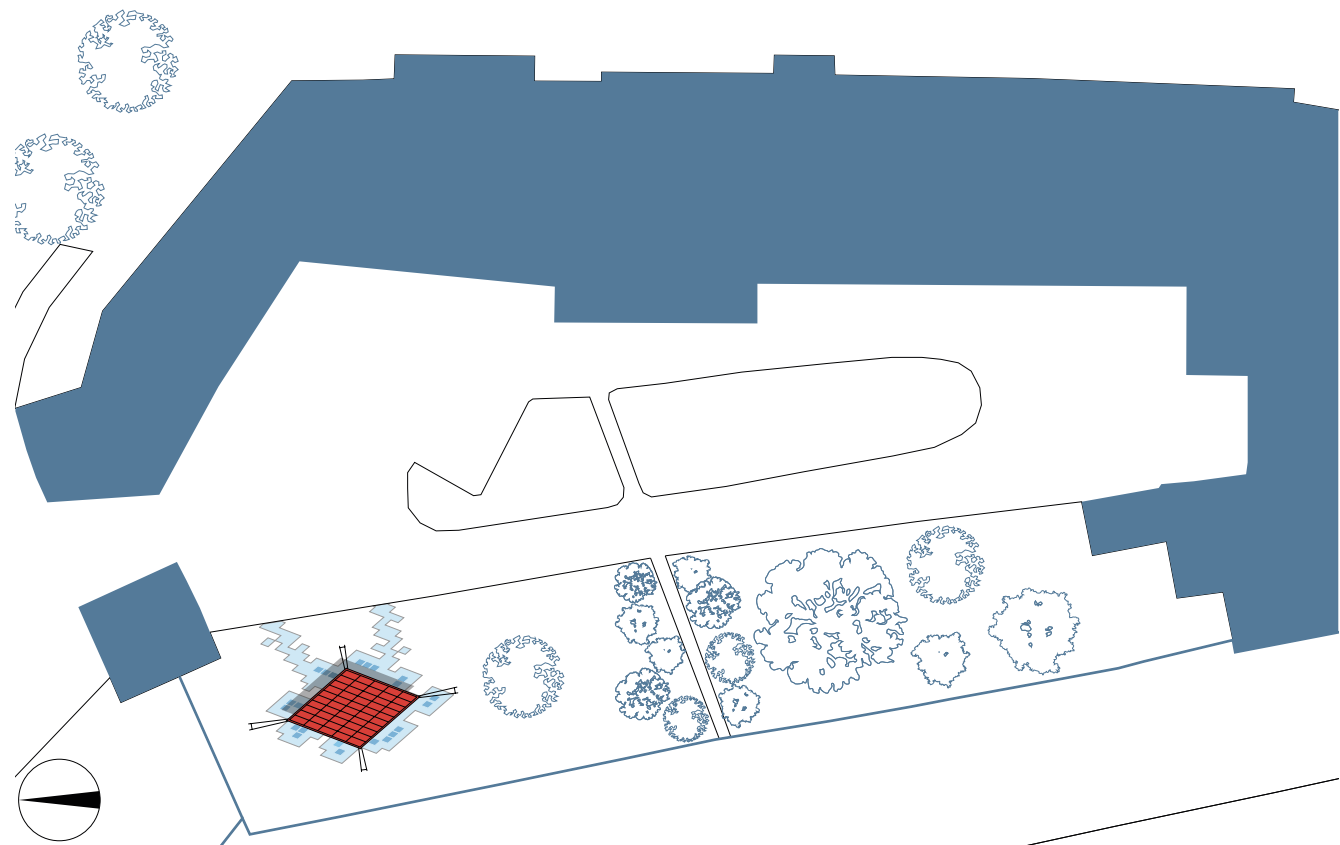


Abb. 177: Lageplan Bauplatz Umgebung | M 1:500

Schloss Seggau

Der Pavillon erstreckt sich über einem rautenförmigen Grundriss und ist entlang der Mittelachse des Grünstreifens ausgerichtet. Durch die Rautenform entsteht eine dynamische Schalen-geometrie, die in den Ecken spitz zusammenläuft. In diesen Ecken wird das Tragwerk von vier Stützen getragen, welche die Schalen-

form des Entwurfs aufnehmen und zu Boden führen. Das Tragwerk nimmt im Grundriss die Rautenform der Schale auf, wodurch auch die Keramik-Module einen Rautenquerschnitt besitzen. Alle Module weisen eine ovale Öffnung auf, sodass eine stark gerasterte, additive Optik des Tragwerks entsteht. Dieser Eindruck

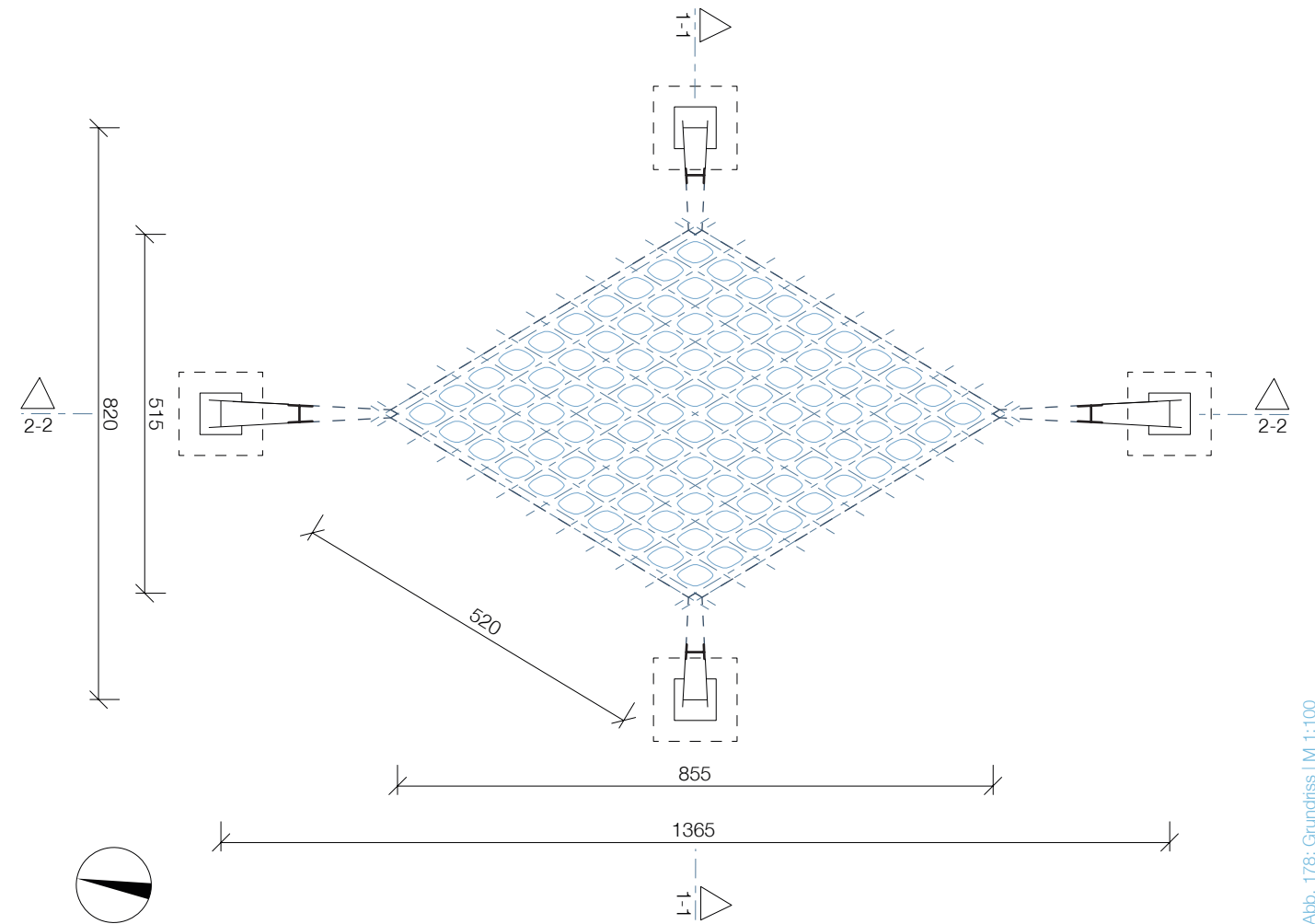


Abb. 178: Grundriss | M 1:100

wird auch durch die kreuzförmigen Knotenelemente verstärkt, die jeweils 4 Modulsteine miteinander verbinden. Die wetterfeste Hülle des Pavillons besteht aus Glasplatten. Diese länglichen Scheiben erstrecken sich jeweils über zwei Rasterfelder und betonen somit eine Richtung des Pavillons. Die Glasscheiben werden an

ihrer Oberseite von sichtbaren Pressplatten fixiert. Um formal und konstruktiv dem Bausystem treu zu bleiben, folgen diese in ihrer geometrischen Ausbildung den Verbindungsknoten und werden somit zu einem gestalterischen Element.

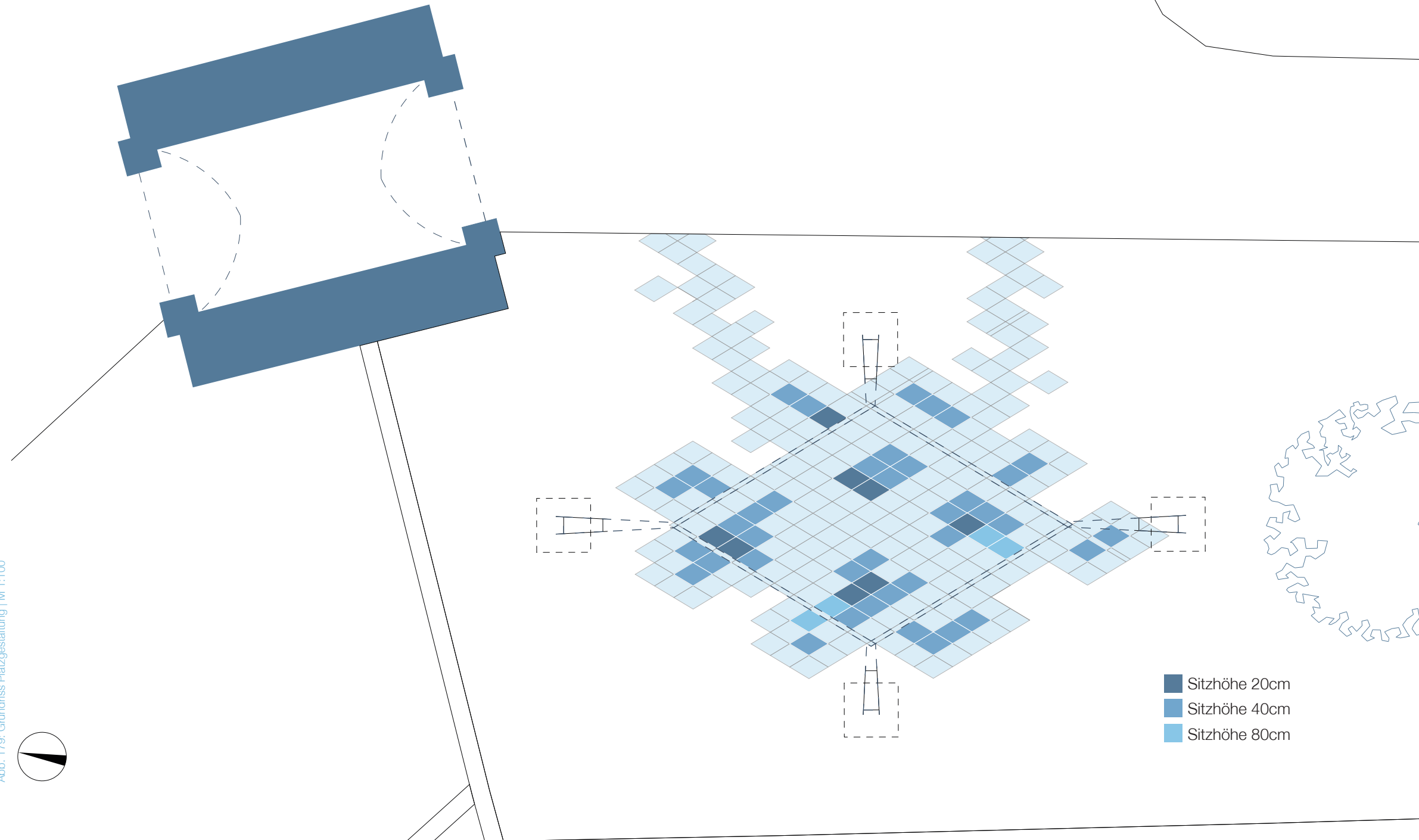
Platzgestaltung

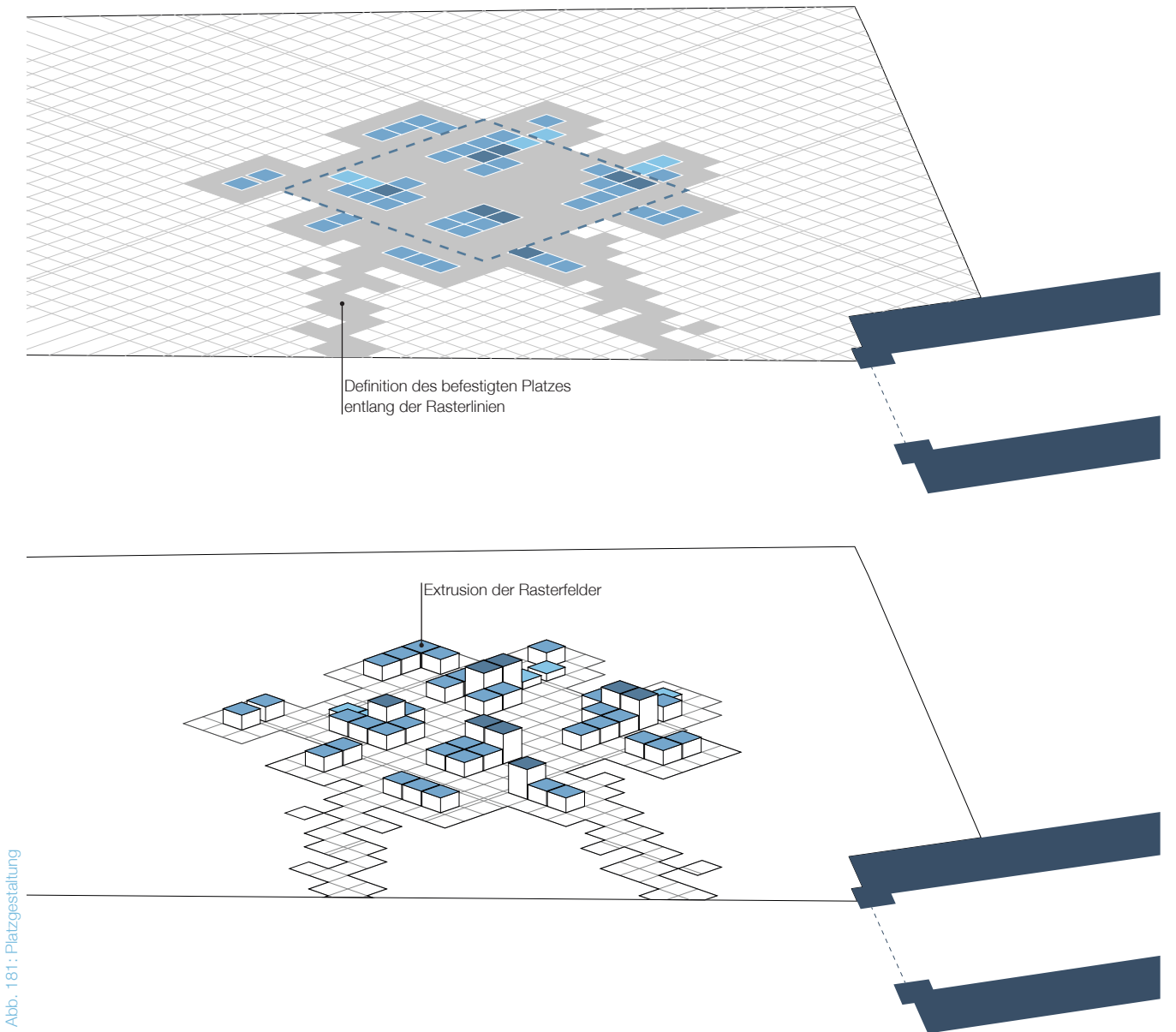
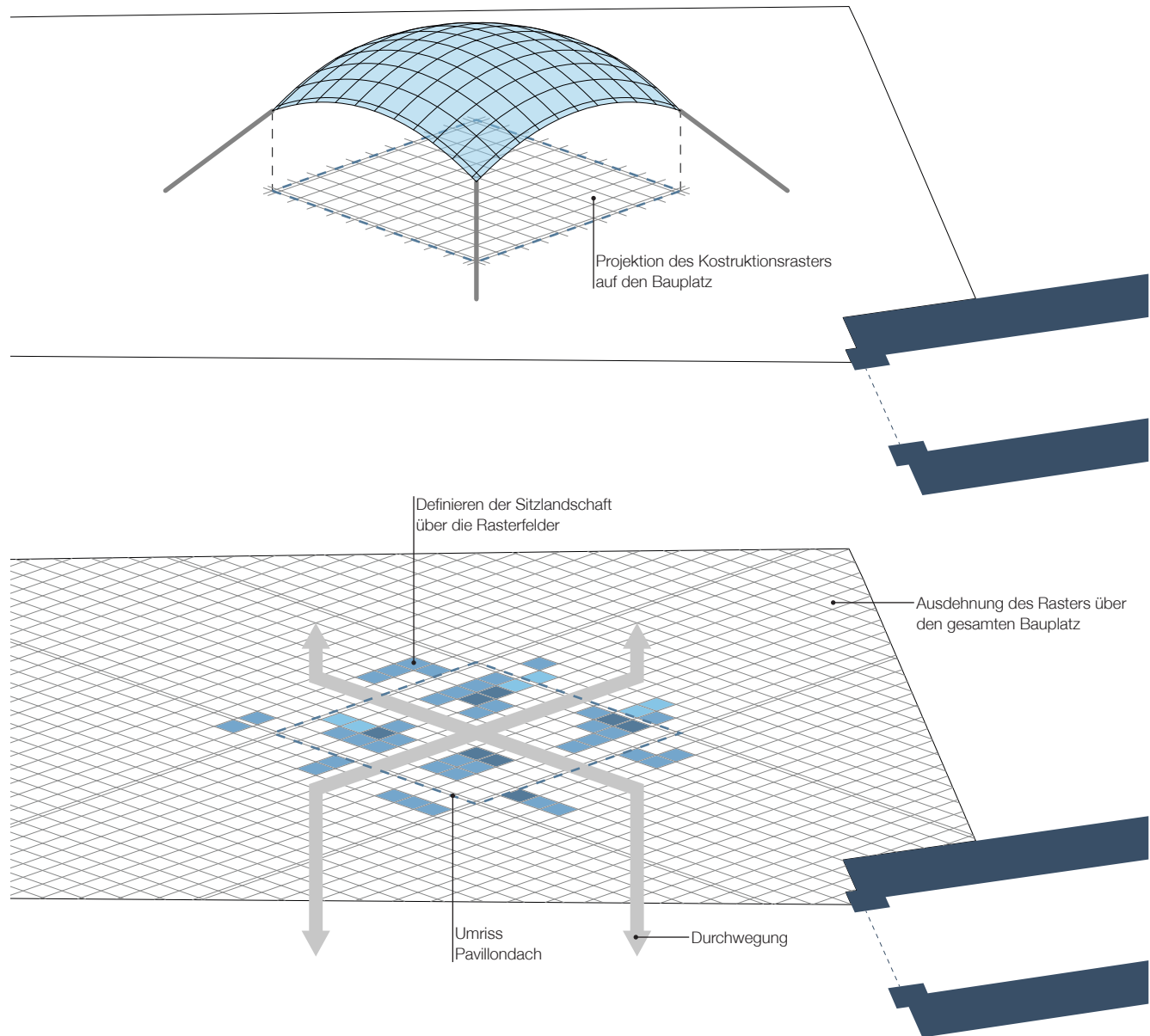
Der entworfene Gartenpavillon definiert einen Platz zum Verweilen und Beobachten. Dieser Funktion entsprechend wurde der Platz gestaltet und mit Sitzmöglichkeiten ausgestattet. Das Prinzip der Platzgestaltung entspricht dem der „Ceramic Translation“ - Tragstruktur: Die Rasterung einer Grundfläche und die vertikale Extrusion einer sich wiederholenden Form.

Die Ausformung der Sitzmöglichkeiten sollte eine Orientierung in mehrere Richtungen ermöglichen, damit sowohl der Blick in Richtung Sulmtal als auch zum Ober Schloss möglich ist. Dazu wurde eine Sitzlandschaft aus rautenförmigen Steinen entworfen, die durch ihre verschiedenen Höhen unterschiedliche Sitzmöglichkeiten anbietet, welche auf mehrere Arten genutzt werden können.

Bei der Platzgestaltung wurde das Konstruktionsraster der Tragstruktur über den gesamten Bauplatz ausgeweitet. Danach wurden einzelne Rasterfelder in Abhängigkeit einer festgelegten Durchwegung ausgewählt, aus welchen die Sitzlandschaft entstehen sollte. Um diese Rasterfelder wurde die Begrenzung des befestigten Platzes definiert. Weiters wurden zwei Verbindungen zur Straße hergestellt. Alle Elemente der Platzgestaltung folgen dem Modulraster der „Ceramic Translation“ - Tragstruktur. Schließlich wurden die ausgewählten Rasterfelder zu verschiedenen hohen Sitzmöglichkeiten vertikal extrudiert.

Abb. 179: Grundriss Platzgestaltung | M 1:100





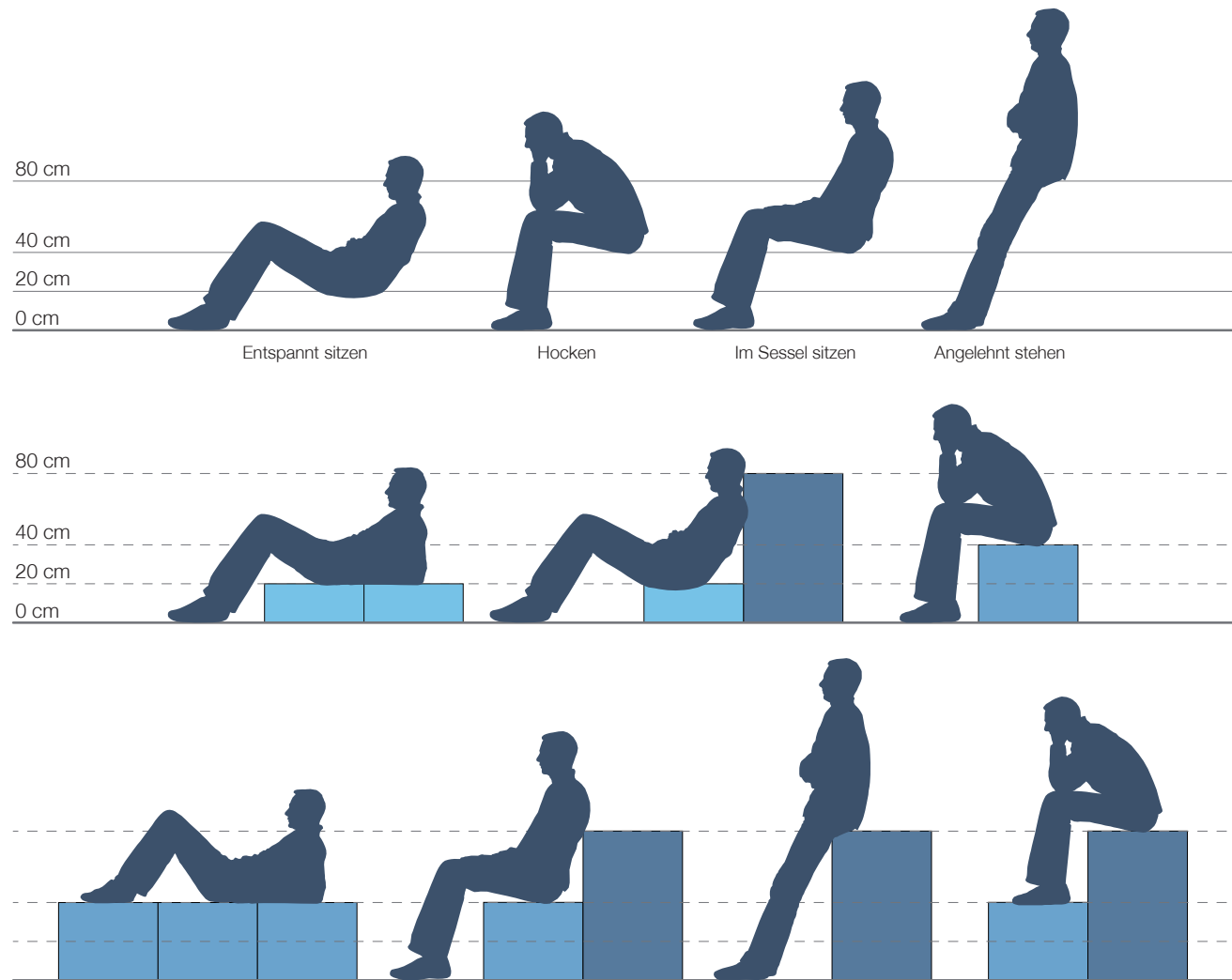


Abb. 182: Unterschiedliche Sitzhöhen und Kombination von Sitzsteinen

Sitzhöhen

Die Steine der Sitzlandschaft verfügen über drei verschiedene Höhen: 20cm, 40cm und 80cm. Diese Höhen entsprechen den Sitzhöhen bei entspanntem sitzen, Hocken / im Sessel sitzen, angelehnt stehen / an der Bar sitzen.

Diese drei Steine mit unterschiedlichen Höhen können jeweils einzeln verwendet werden oder miteinander kombiniert werden. So können z.B. Liegeflächen, Sitzgelegenheiten mit Lehne oder erhöhte Sitzpositionen geschaffen werden. Mit diesem Prinzip kann eine Sitzlandschaft generiert werden, die unterschiedlichste Sitzmöglichkeiten bietet welche auf verschiedene Weise genutzt werden können.

Abb. 183: Schnitt 1-1 | M 1:100

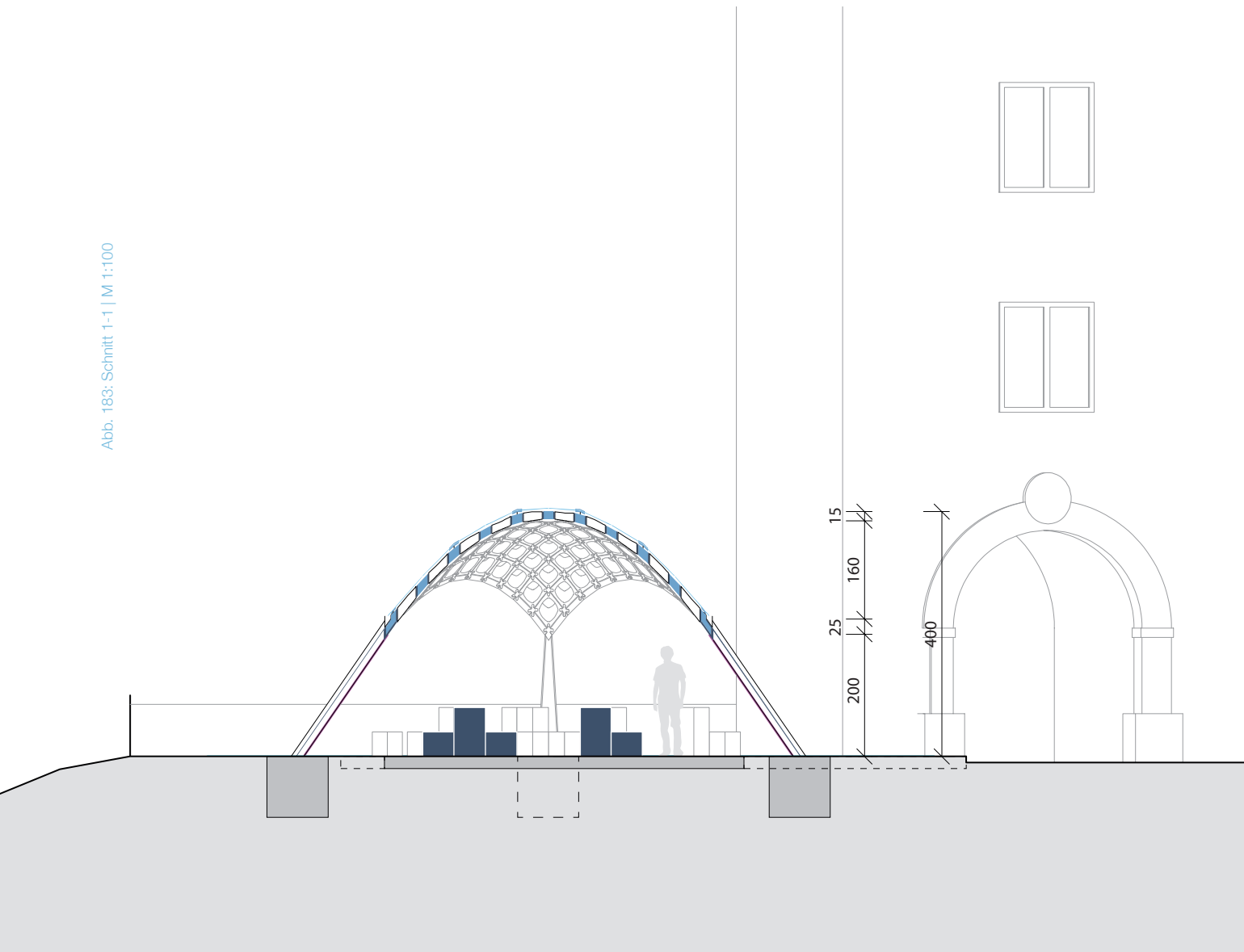


Abb. 184: Schnitt 2-2 | M 1:100

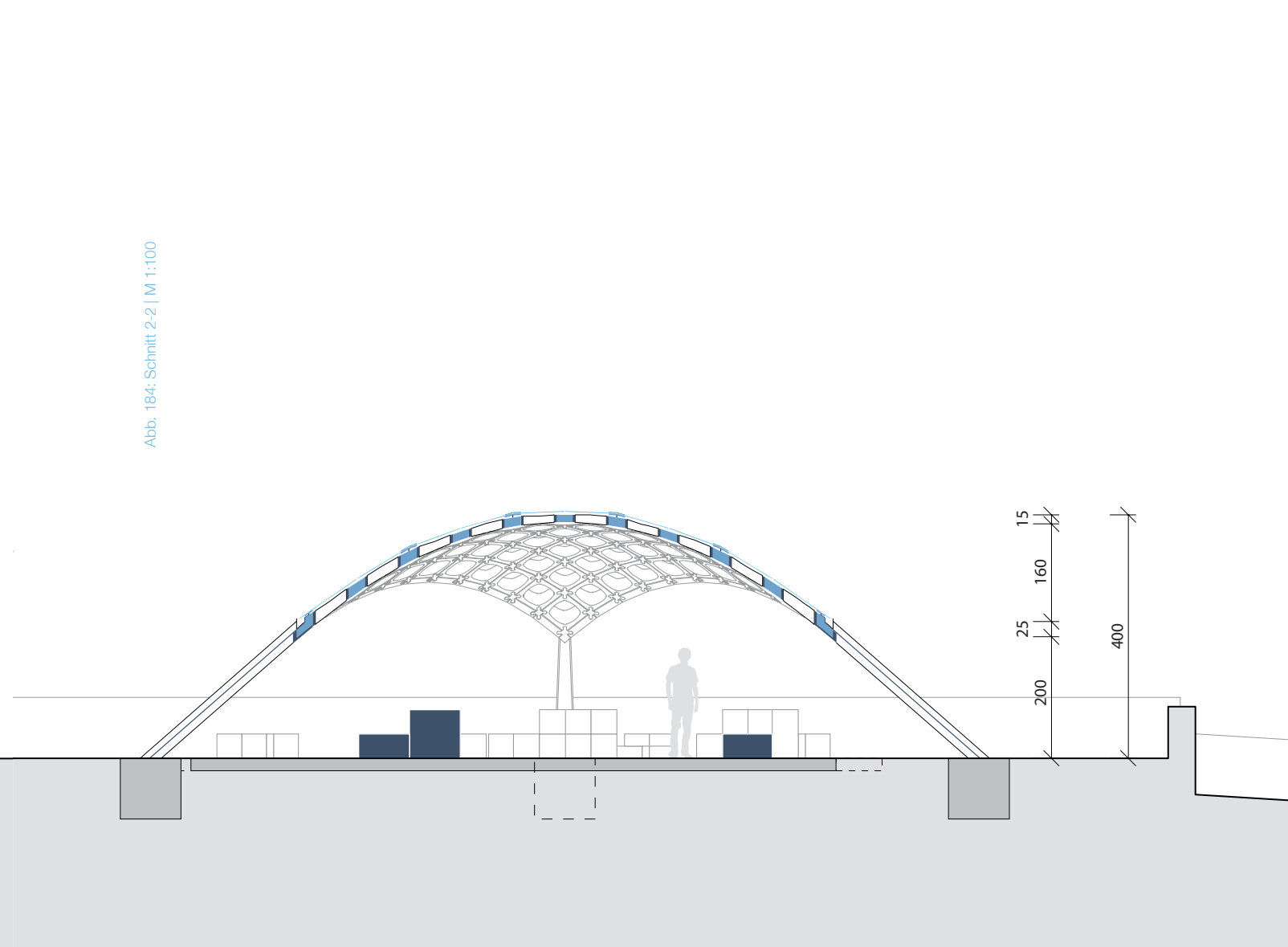
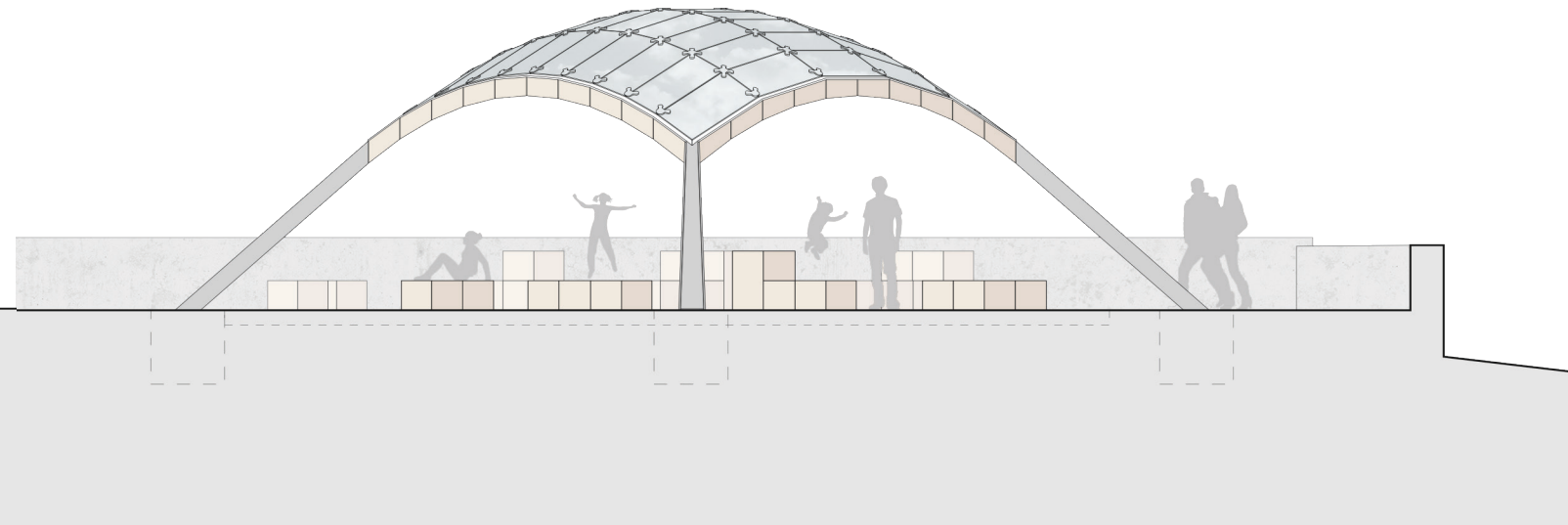


Abb. 185: Ansicht Süd | M 1:100



Abb. 186: Ansicht Ost | M 1:100



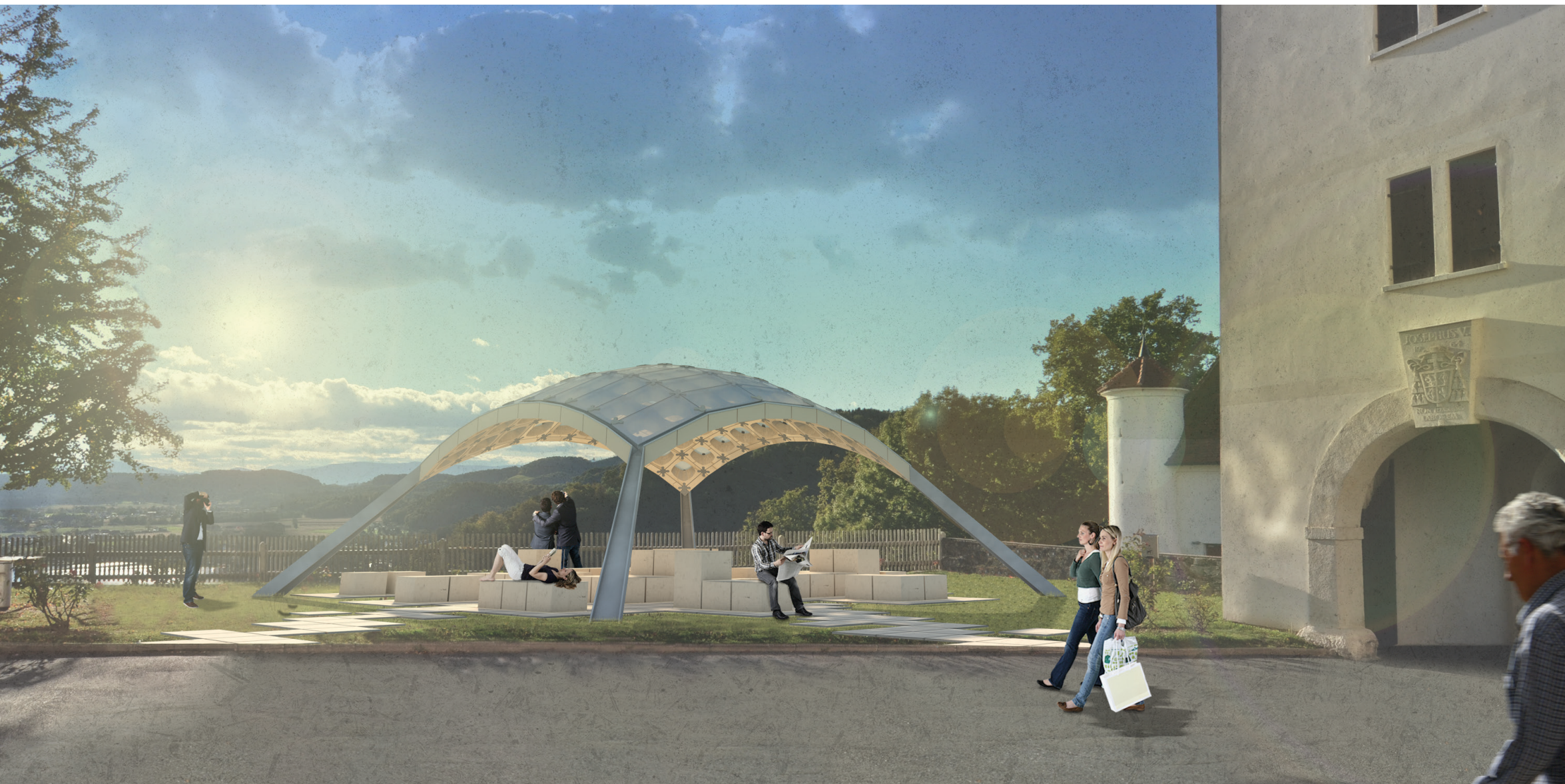


Abb. 187: Visualisierung

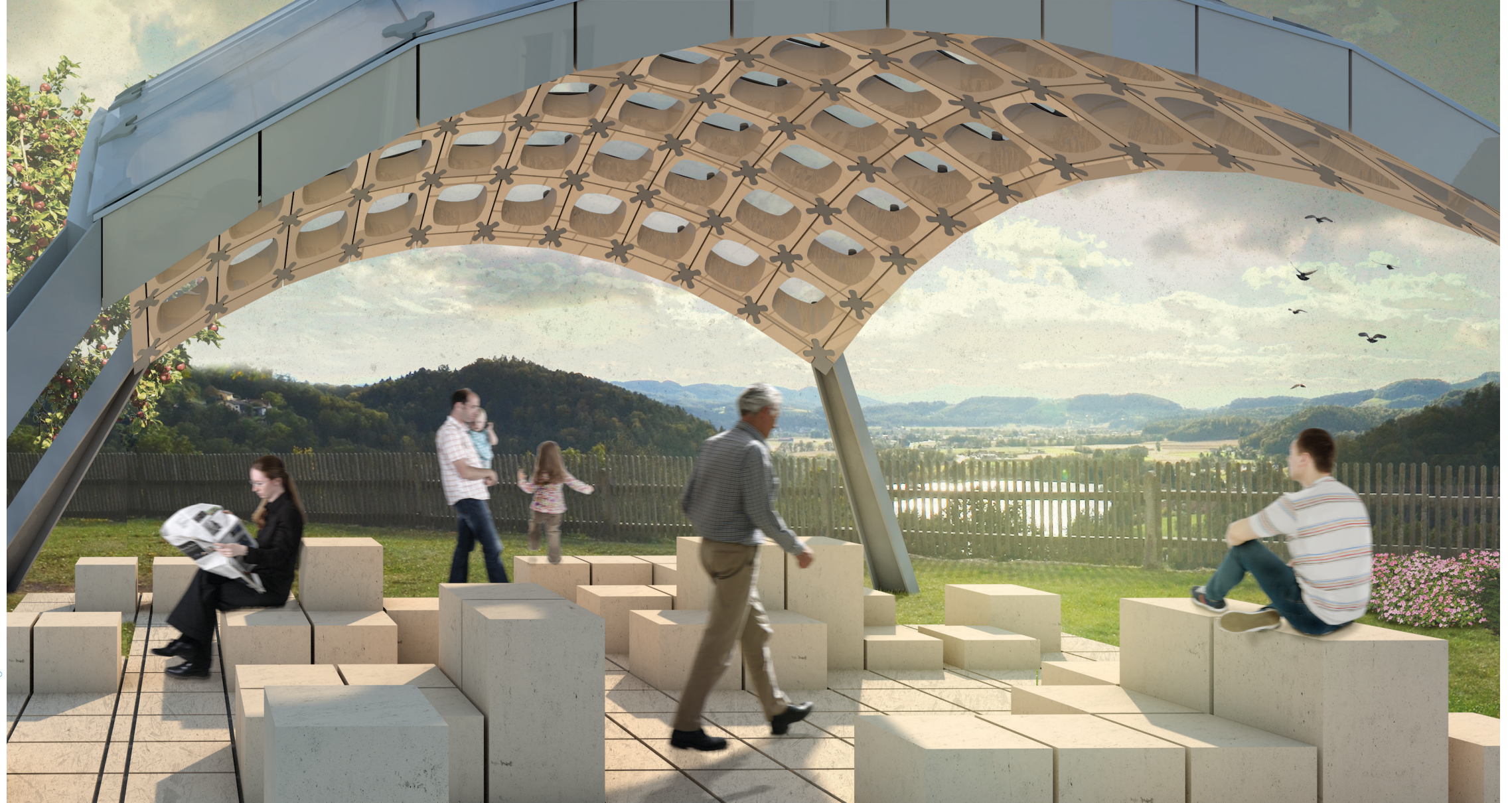


Abb. 188: Visualisierung

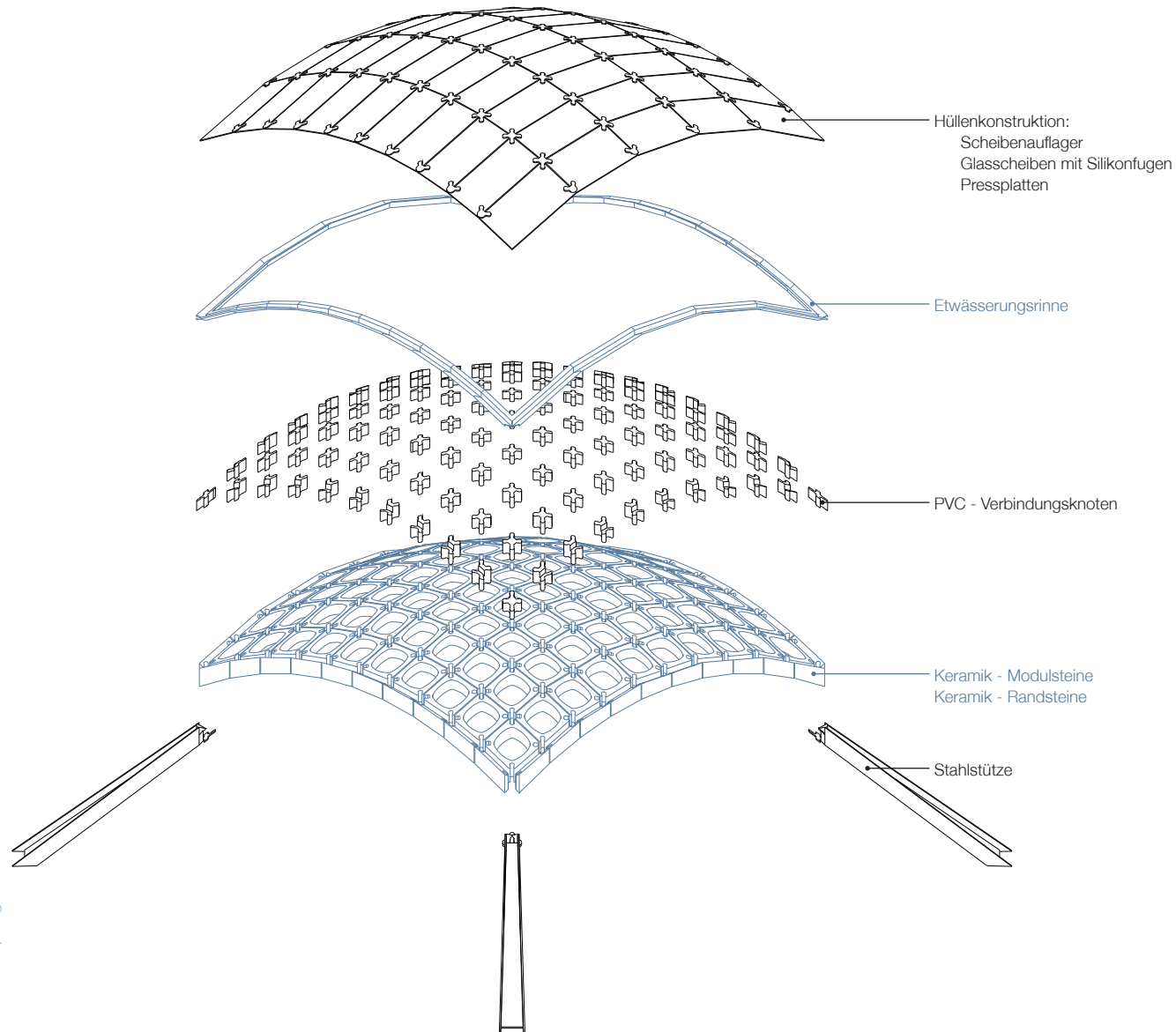


Abb. 189: Sprengaxonomie der Pavillonkonstruktion

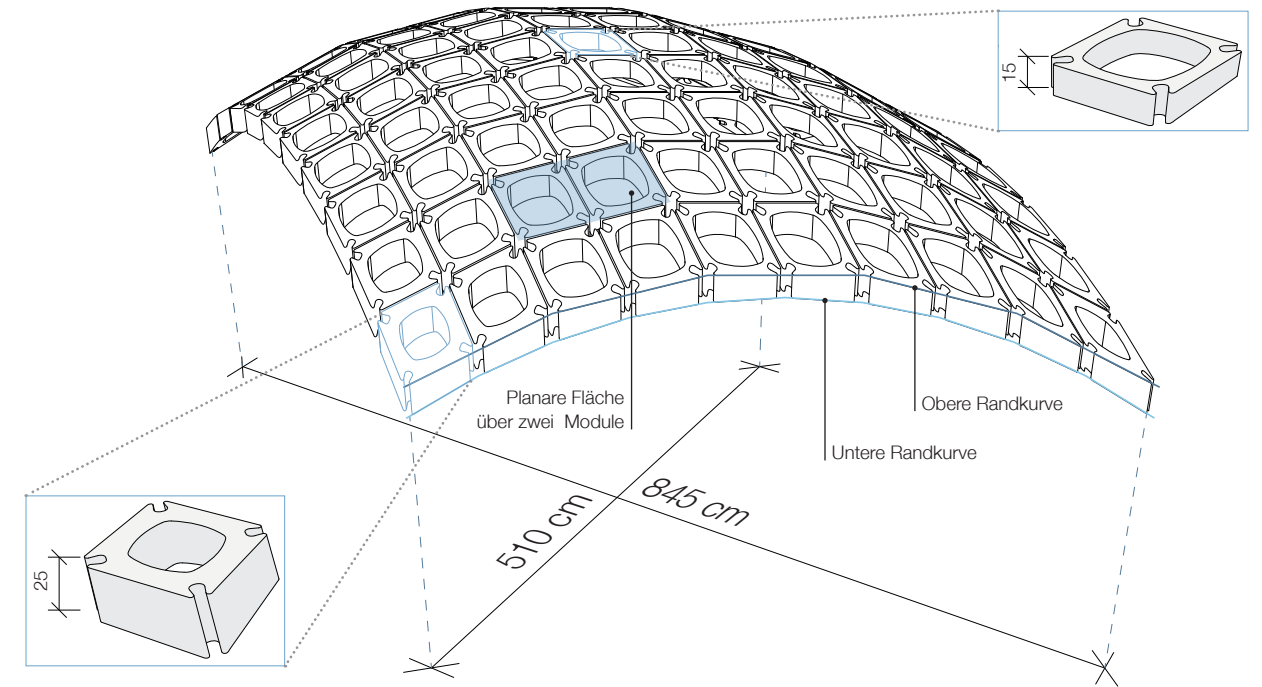
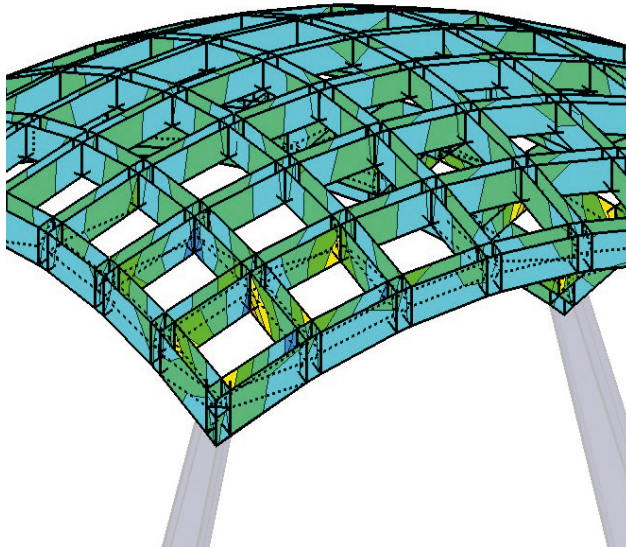


Abb. 190: Keramische Struktur des Pavillons

Keramik - Module

Die keramische Tragstruktur des Pavillons besteht aus 100 Modulsteinen, die über PVC - Verbinder und Injektionsmörtel miteinander verbunden werden. Durch den rautenförmigen Raster des Tragwerks, weist auch der Extrusionsstrang, aus dem die Steine geschnitten werden, einen Rautenquerschnitt auf. Zwischen den Modulen befindet sich eine ca. 1 cm breite Fuge um mögliche Ungenauigkeiten in der Herstellung oder der Konstruktion auszugleichen. Die Randkurven sind als Parabeln ausgeformt, um die Schale in ihrer Form sta-

tisch zu optimieren. Weiters wurden sie so gewählt, dass sich die Schalendicke von den Ecken zur Mitte verringert. Die oberen und unteren Randkurven des Tragwerks weisen einen unterschiedlichen Linearisierungsgrad auf. Die obere Randkurve ist in eine Richtung über zwei Rasterfelder linear, wodurch jeweils zwei Modulsteine eine gemeinsame planare Fläche aufweisen. Dieser geometrische Eingriff in die Tragstruktur bringt Vorteile in der Eindeckung des Bauwerks.



Öffnungsgröße der Keramik - Module

Am statischen Modell der keramischen Tragstruktur wurde sichtbar, dass die Belastung der Keramik - Module in den Ecken, im Vergleich zu den restlichen Bausteinen, um ein Vielfaches höher ist. Durch die Kraftabtragung in Richtung der Stützen, werden vor allem die Eckbereiche dieser Module stark beansprucht. Um diesen statischen Anforderungen gerecht zu werden, wurden dem Tragwerk zwei zusätzliche Keramik - Eckmodule hinzugefügt. Diese besitzen kleinere Öffnungen als die Standard - Module, wodurch sich die Stegbreite vergrößert, und die Bausteine höhere Lasten abtragen

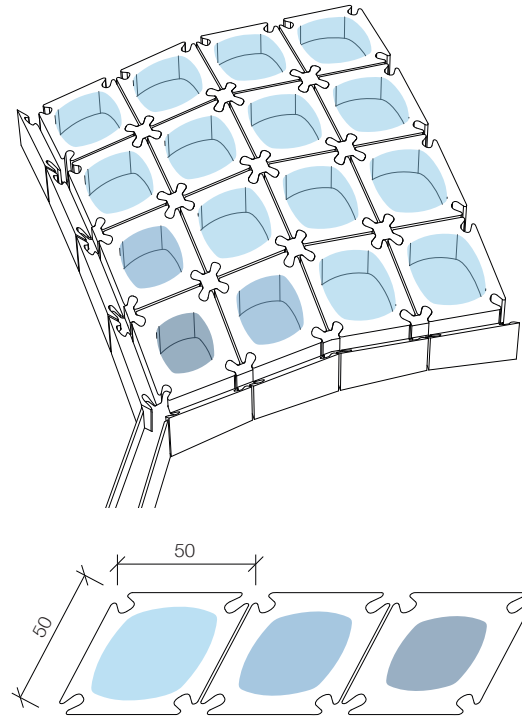
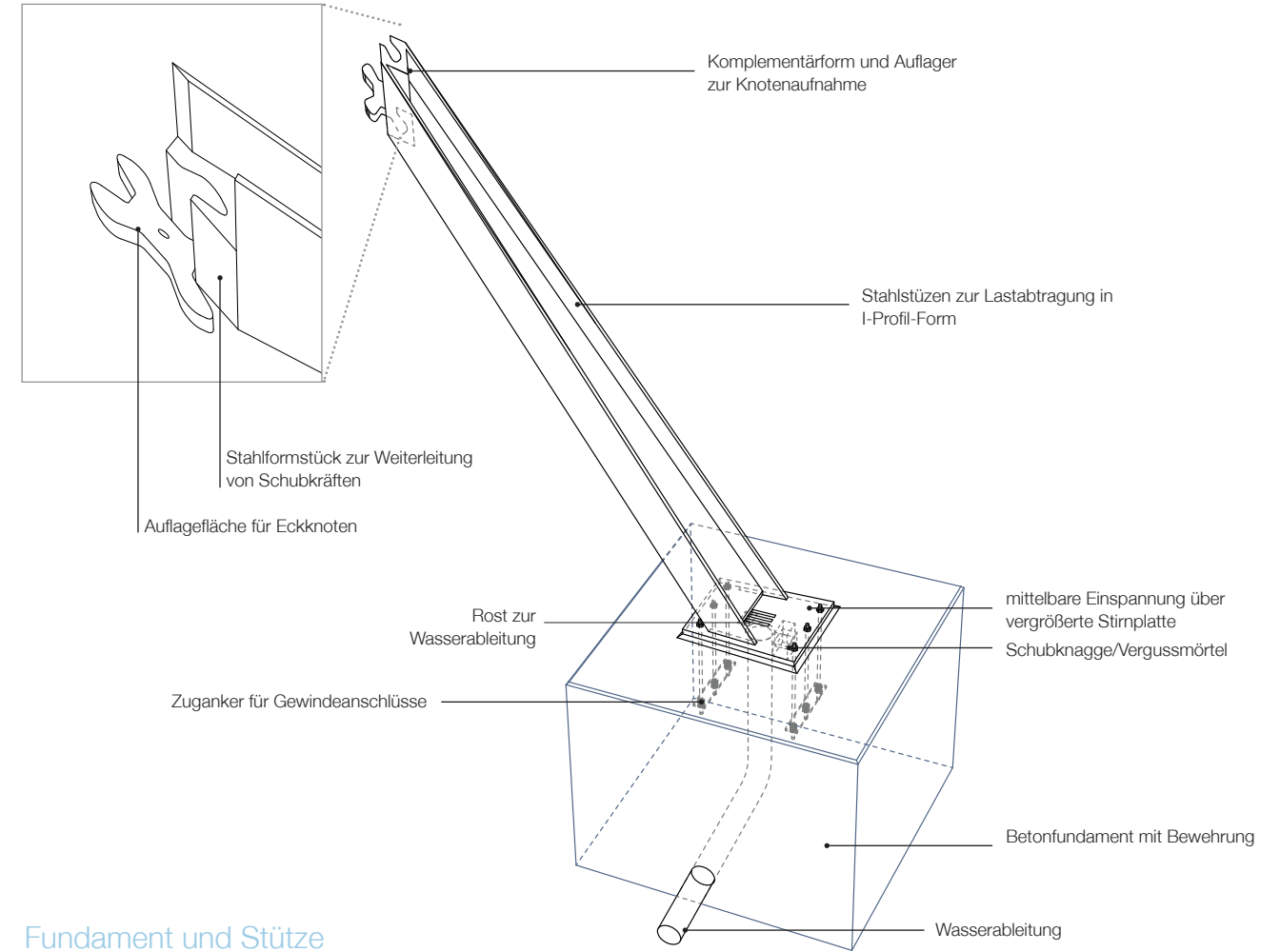


Abb. 192: Eckmodule mit verkleinerten Öffnungen

können. Da in den Ecken der Schale die größte Belastung auftritt, besitzen die Ecksteine die kleinste Öffnung. Über diesen befinden sich jeweils zwei weitere Module mit verkleinerten Öffnungen. Die Öffnungsgröße der Bausteine verringert sich vom Standard - Modul jeweils um 10 %. Der Eckstein weist somit eine Stegstärke von 8,5 cm auf.

Weitere statische Betrachtungen des Forschungspavillons befinden sich in der Masterarbeit „Ceramic Translation - Teil I - Tragwerksentwurf und Konstruktion.“

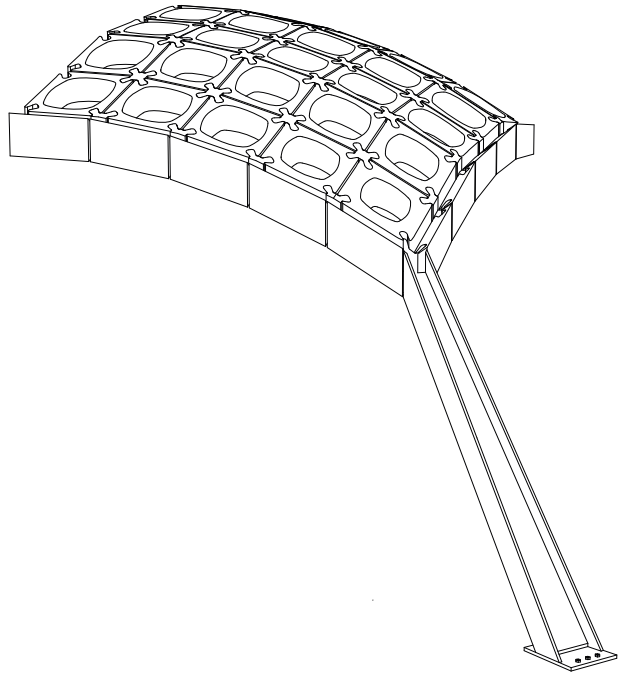


Fundament und Stütze

Die vier Stützen des Forschungspavillons tragen die Lasten der Schale in die Fundamente ab. Der Stützenkopf bildet eine Komplementärform und ein Auflager zur Knotenaufnahme aus. Die Stahlstütze besitzt eine

I - Profil Form und verbreitert sich zum Stützenfuß hin. Über eine Stirnplatte ist die Stütze im Fundament mittelbar eingespannt. Die Stegplatte des I - Profils dient zusätzlich der Entwässerung.

Abb. 193: Stützenkopf, Einspannung und Fundament



Hüllenkonstruktion

Im Entwurf des Forschungspavillons werden die Lasten über vier Stützen an den Ecken der Schale abgetragen. Diese folgen der Schalenform und können somit die Schubkräfte der Schale aufnehmen. Das Gewicht der Keramik - Konstruktion drückt jedoch auch vertikal nach unten, wodurch hohe statische Anforderungen an die Stütze und deren Einspannung im Fundament entstehen. Dies führt zu einer wuchtigen Ausformung der Stützen, womit auch das optische Erscheinungs-

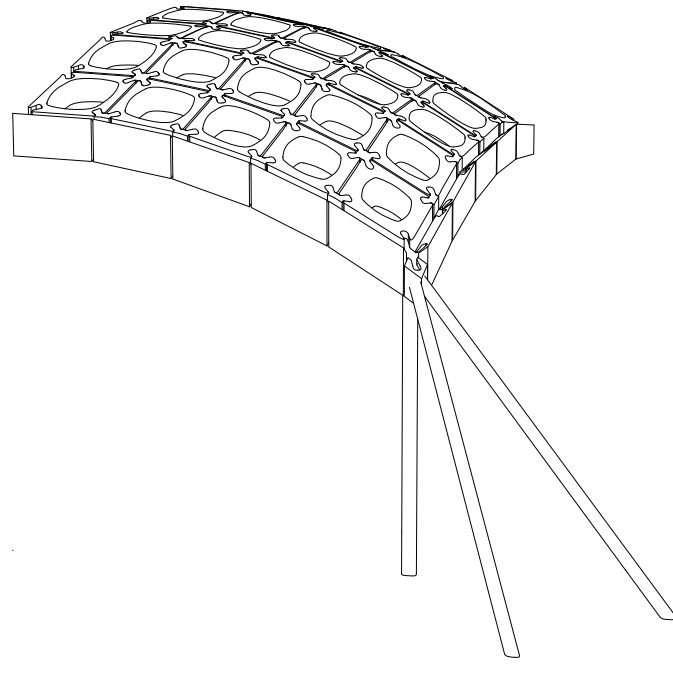
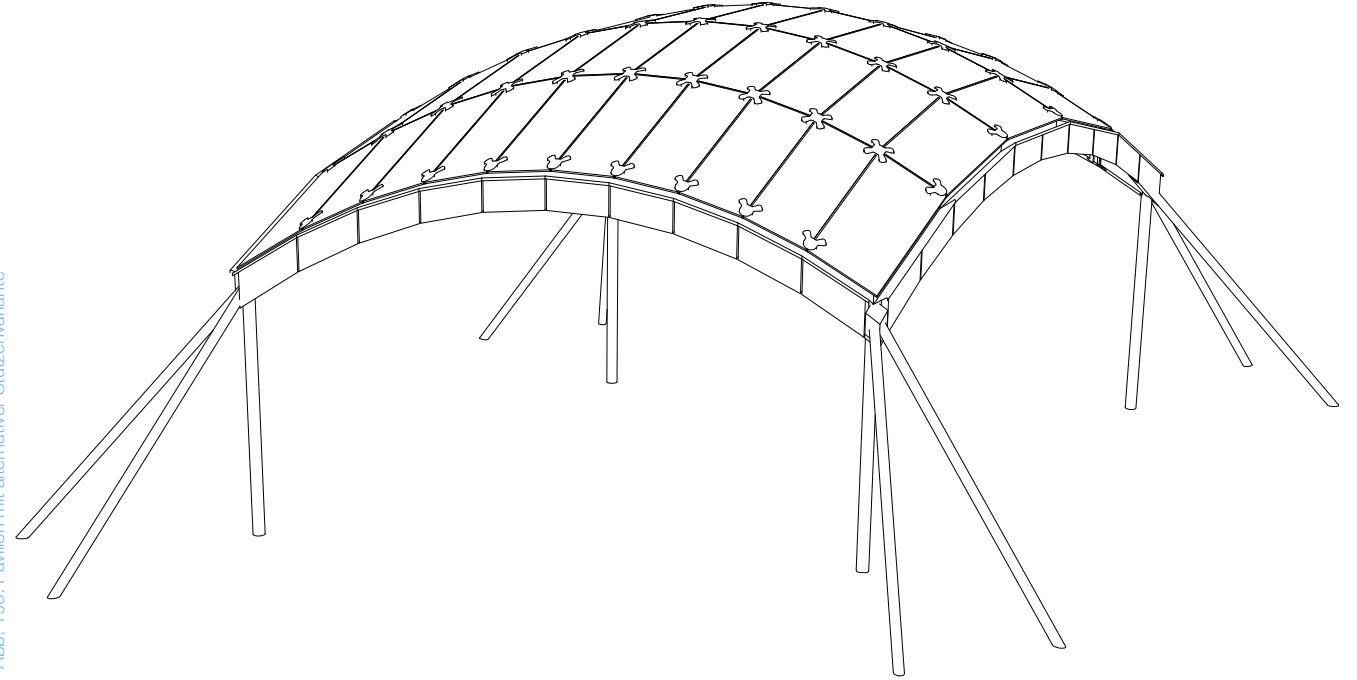


bild des Pavillons stark geprägt wird. Um die starke Präsenz der Stützen im Entwurf zu verringern, können diese auch anders ausgeführt werden. Dazu wird die Stützenkonstruktion in drei dünne Stäbe aufgelöst, welche horizontale und vertikale Kräfte aufnehmen können.



Optische Wirkung

Durch das Auflösen der massiven Stütze in drei dünne Stäbe, wirkt die Konstruktion zurückhaltender und die Keramik - Schale steht im Vordergrund. Andererseits bricht die dreibeinige Ausformung optisch mit der Dynamik der Schalenform. Durch die vertikale Stütze wird die geschwungene Form des Tragwerks nicht weitergeführt. Dadurch wirkt diese alternative Variante der Stützenkonstruktion als zurückhaltendes, aber eigenständiges Element im Pavillonentwurf.

Variante der Stützenform

Die Hülle des Pavillons sollte die Verweilenden vor Witterung schützen, aber trotzdem Licht und Sonne durch das Tragwerk hindurch scheinen lassen. Die gewählte Glaseindeckung erfüllt diese Anforderungen und verleiht dem Gartenpavillon ein elegantes Äußeres. Die Hüllenkonstruktion besteht aus Auflager-Elementen in Form der PVC-Verbindungsknoten. Auf einem dieser kreuzförmigen Elemente lagern jeweils vier Glasscheiben. Die Scheibenformate folgen der Form der oberen Randkurve der Schale und reichen somit über zwei Rasterfelder. Somit kann die Plattenanzahl von 100 auf 50 Stück reduziert werden. Die Fugen zwischen den

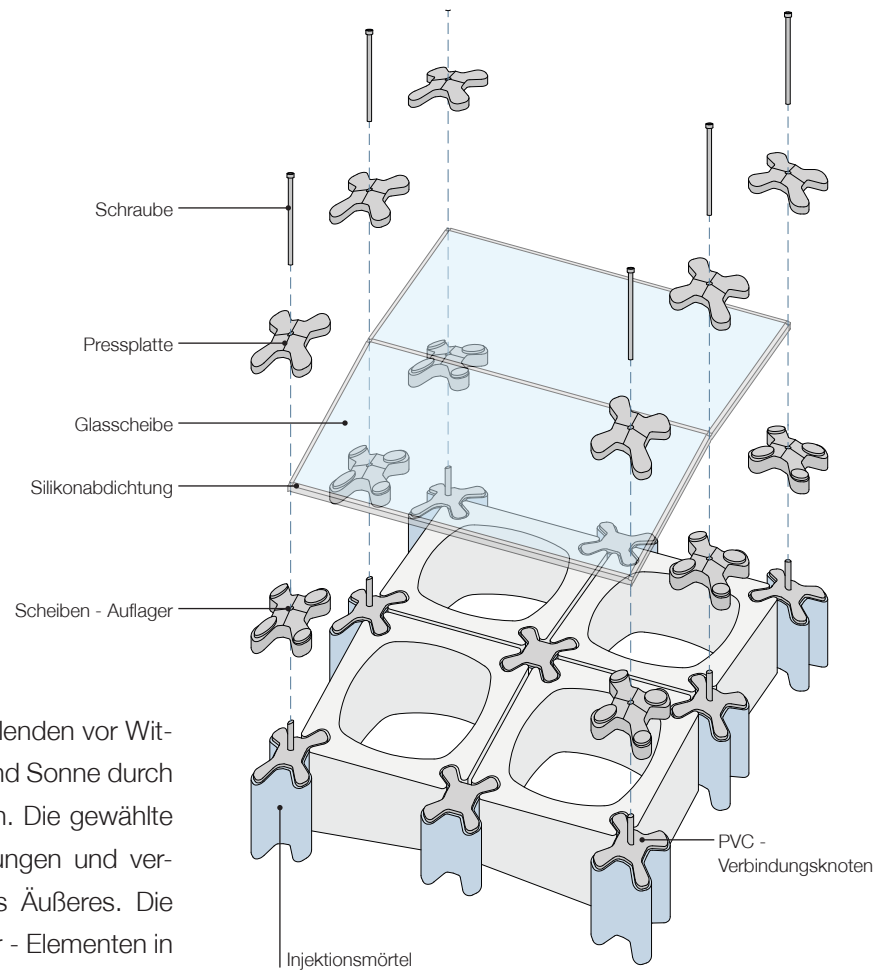


Abb. 197: Sprengaxonomie der Hüllenkonstruktion

Scheiben werden mit Silikon abgedichtet. Die Fixierung der Patten erfolgt über Pressplatten, welche ebenfalls formal an den PVC-Knoten angepasst sind.

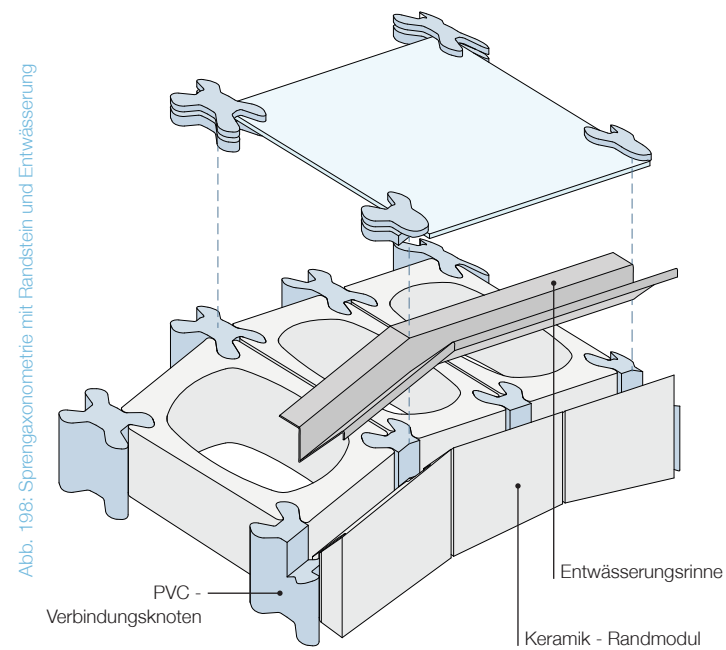


Abb. 198: Sprengaxonomie mit Randstein und Entwässerung

Randstein und Entwässerung

Um den Randbereich der Keramik-Schale optisch anspruchsvoll und elegant zu gestalten, verläuft um diesen Bereich ein Keramik-Randstein als abschließendes Element. Dieser dient jedoch nicht nur der Gestaltung, sondern auch der Entwässerung des Pavillons. Durch das Schrägschneiden dieser Randmodule bilden sie eine Vertiefung aus, in welche eine Entwässerungsrinne eingebracht werden kann, ohne von außen sichtbar zu sein. Die Rinne leitet das Wasser zu den Eckpunkten, wo es an den Stützen nach unten geführt wird, und durch das Fundament ins Erdreich abläuft.

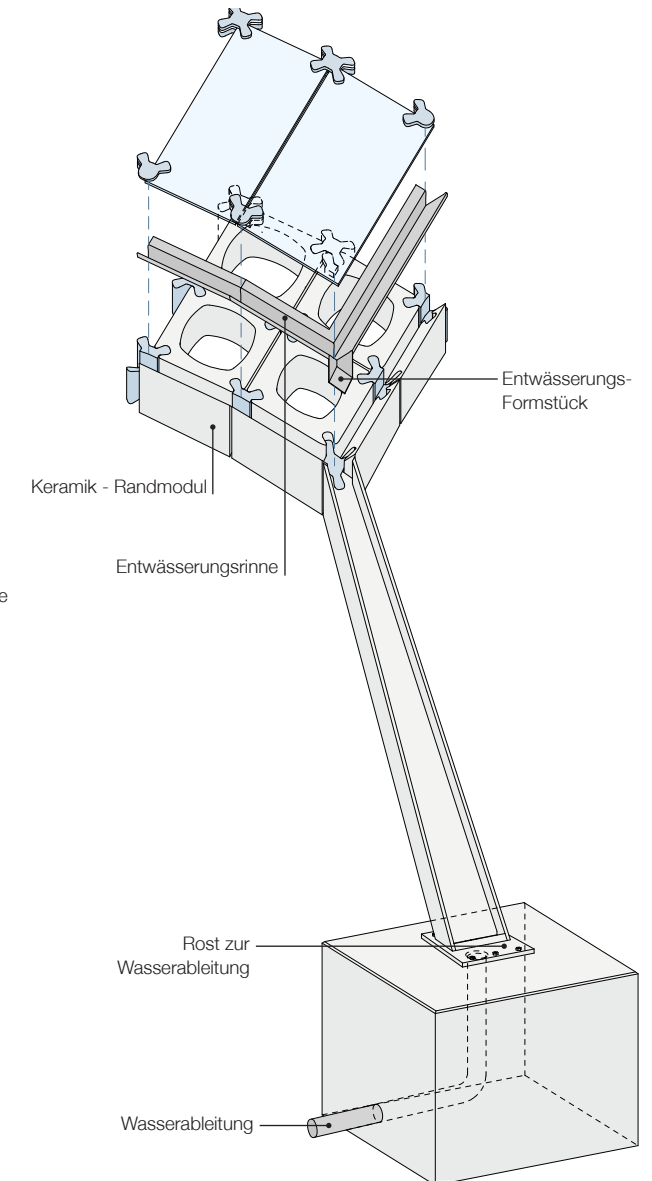


Abb. 199: Entwässerung über Rinne und Stütze

5.5 Fazit und Ausblick

Fazit

Mit dem „Ceramic Translation“ Bausystem ist es möglich, keramische Tragstrukturen für komplexe bautechnische und gestalterische Anforderungen herzustellen. Mit der Tonextrusion nutzt es ein einfaches, erprobtes und kostengünstiges Herstellungsverfahren, welches gleichzeitig einen hohen Individualitäts- und Komplexitätsgrad zulässt. Darüber hinaus konnten folgende Kenntnisse gewonnen werden:

Die entwickelten Systemvarianten von „Ceramic Translation“ zeigen, dass durch die Veränderung von Raster, Modul- und Schnittgeometrie das Bausystem an vielseitige statische und gestalterische Anforderungen angepasst werden kann.

Durch die Formgebung von Tragstrukturen über Randkurven deckt „Ceramic Translation“ eine große Bandbreite an möglichen geometrischen Ausformungen ab. Es ist jedoch zu beachten, dass die Wahl der Tragwerksgeometrie das Tragverhalten der Keramikstrukturen stark beeinflusst. Daher sind bei der Formfindung von „Ceramic Translation“ - Bauwerken statisch günstige Formen zu bevorzugen. Somit ist das Bausystem vor allem zur Errichtung von einfach und doppelt gekrümmten Schalenstrukturen geeignet.

Durch die freie Wahl von Matrizenform und Verbindungsprinzip ist es möglich, die Modulsteine in ihrer Tragfähigkeit hinsichtlich bautechnischer Gegebenheiten individuell anzupassen. „Ceramic Translation“ deckt ein breites Spektrum formaler und struktureller Gestaltungsmöglichkeiten ab. Durch die Herstellung mittels Strangpressverfahren können bei vergleichsweise niedrigem Aufwand hochkomplexe Formen erzeugt werden. Dazu sollte auch die Anzahl verschiedener Modulgeometrien gering gehalten werden, und die Steingröße über den Raster so gewählt werden, dass die Menge von Modulen und Konstruktionselementen minimiert werden kann.

Mit dem Entwurf des Pavillons konnten die gewonnenen Erkenntnisse aus den Untersuchungen an einem praktischen Beispiel überprüft werden. Dies hat gezeigt, dass die entwickelten statischen, gestalterischen oder konstruktiven Systemvarianten am Beispiel eines architektonischen Entwurfs eingesetzt werden können, um gegebene Anforderungen zu erfüllen. Statisch bewegt sich die verwendete Systemvariante des Entwurfs im Grenzbereich ihrer Leistungsfähigkeit. Weiters wurden Lösungen für konstruktive Detailpunkte wie Entwässerung und Hüllenkonstruktion erarbeitet.

Ausblick

Der bauliche Ablauf bei der Errichtung einer „Ceramic Translation“ Tragstruktur wurde in dieser Masterarbeit nur wenig thematisiert.

Aufgrund der voraussichtlich hohen Anforderungen stellt vor allem das Prinzip der Schalungskonstruktion ein wesentliches Thema bei der Ausführung von keramischen Tragwerken dar. Das Schalungssystem sollte die Module in der gewünschten Position stabilisieren und gleichzeitig eine Verfüllung der Knotenpunkte ermöglichen. Um der Effizienz der Steinherstellung gerecht zu werden sollte die Schalung außerdem einfach in der Fertigung und möglichst sparsam im Materialverbrauch sein. Um die Modulsteine in Position zu bringen könnte eine Rüstungskonstruktion aus Rippen verwendet werden, welche der Form der Randkurven folgen.

Auch die Verfüllung der Knotenpunkte bzw. das Verbindungsprinzip selbst könnten weiter untersucht werden, um alternative Möglichkeiten zu entwickeln. Um die Nachhaltigkeit des Bausystems zu verbessern wäre eine lösbare Fügung anzustreben, um eine Demontage und Wiederverwendbarkeit der Module erreichen zu können.

Untersuchungen zum Langzeitverhalten von keramischen Tragstrukturen könnten eine Aussage über die Witterungsbeständigkeit des Bausystems und die Auswirkungen von Frost auf Keramik und Fügungsprinzip liefern.

6

Verwendete Quellen

Mislin, Miron: Geschichte der Baukonstruktion und Bautechnik, Bd 1 Antike bis Renaissance, Düsseldorf 2 1997

Plumridge, Andrew / Meulenkamp, Wim: Ziegel in der Architektur, Stuttgart 1996

Bechthold, Martin/Kane, Anthony/King, Nathan: Keramische Bausysteme. In Architektur und Innenarchitektur, Basel 2015

Mainstone, Rowland J.: Development in Structural Form, Cambridge 1975

Pfeifer, Günter u.a.: Mauerwerk Atlas, München 2001

Sandaker, Bjørn N./Eggen, Arne P./Cruvellier, Mark R.: The Structural Basis of Architecture, Abingdon 2 2011

Hart, Franz: Kunst und Technik der Wölbung, München 1965

Bender, Wille: Lexikon der Ziegel. Vom Antikziegel bis zum Zellenblockziegel in Wort und Bild, Wiesbaden-Berlin 1991

Mango, Cyril: Byzantinische Architektur, Stuttgart-Mailand 1975

Jesberg, Paulgerd: Die Geschichte der Ingenieurbaukunst. Aus dem Geist des Humanismus, Stuttgart 1996

Nußbaum, Norbert/Lepsky, Sabine: Das gotische Gewölbe. Eine Geschichte seiner Form und Konstruktion, München-Berlin 1999

Pfefferkorn, Rudolf: Norddeutsche Backsteingotik, Hamburg 1984

Kamphausen, Alfred: Backsteingotik, München 1978

Krämer, Thomas: Die große Kuppel von Florenz. Ein Führer zu dem architektonischen Meisterwerk des Filippo Brunelleschi, Stuttgart 2001

Ochsendorf, John: Guastavino Vaulting. The art of structural tile, New York 2010

Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía: Eladio Dieste. 1943-1996, Sevilla-Montevideo 1996

Block, Philippe/Rippmann, Matthias: Das katalanische Gewölbe. Ein Konstruktionsprinzip mit Geschichte und Zukunft, in: Detail 5 (2013), 528-536

Diehl, Karl-Ludwig: Die katalanischen Wölbungen der Guastavinos in den USA, in: Bautechnik 83 (2006), H. 4, 290-296

Bosshard, Walter/Mäder, Hubert: Bloss ein Schuppenbauer? Zu den Arbeiten von Eladio Dieste von 1943 bis 1996, in: Schweizer Ingenieur und Architekt 117 (1999), H. 16, 10-16

Jaeger, Falk: Wie eine fliegende Möwe. Ingenieurporträt: Eladio Dieste (1917-2000) und seine Schalenträgerwerke, in: Deutsche Bauzeitschrift 10 (2011), 50-54

6.3 Abbildungsverzeichnis

Abb.	Seite	
1	14	Caputto Fruit Plant, Salto, Uruguay Quelle: http://archleague.org/2014/06/material-tour-de-force-the-work-of-eladio-dieste/ Abgerufen am: 01.03.2016
2	16	Altägyptisches Lehmziegelgebäude, Amarna Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c4/Amarna_North_Palace_08.JPG Abgerufen am: 20.01.2016
3	17	Zikkurat von Ur, Rekonstruktion, Irak Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/Reconstructed_Babylon_-1.jpg Abgerufen am: 20.01.2016
4	18	Kragbogen in der Maya - Ruinenstadt Tonina, Mexiko Quelle: https://www.flickr.com/photos/22887580@N06/3972533912 Abgerufen am: 20.01.2016
5	18	Schema einer nubischen Gewölbekonstruktion Quelle: http://www.solidaritaet.com/images7/heu4-11.jpg Abgerufen am: 20.01.2016
6	19	Taq-e Kisra, Irak Quelle: https://dome.mit.edu/bitstream/handle/1721.3/73610/165690_sv.jpg?sequence=2 Abgerufen am: 20.01.2016
7	19	Getreidespeicher Ramesseum, Ägypten Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/63/Egyptian_vignettes_luxor.jpg Abgerufen am: 20.01.2016
8	20	Pont du Gard, Frankreich Quelle: http://www.provence-info.de/wp-content/uploads/pont-du-gard2.jpg Abgerufen am: 20.01.2016
9	21	Mauerwerk mit Ziegeldurchschuss, Kaiserthermen Trier Quelle: http://www.imagebroker.com/static/3/2007/10/29/kfs/552932/552932-3C.jpg Abgerufen am: 20.01.2016

Abb.	Seite	
10	22	Scheitrechte Bögen, Entlastungsbögen, Rom Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/93/Domus_Augustana_wall.jpg Abgerufen am: 20.01.2016
11	22	Schematische Darstellung Gussmauerwerk Quelle: Mislin 1997, 121. In: Mislin, Miron: Geschichte der Baukonstruktion und Bautechnik, Bd 1 Antike bis Renaissance, Düsseldorf 2 1997
12	23	Gussmauerwerk nach Choisy, Palatin, Rom Quelle: http://www.augustechoisy2009.net/laminas/Choisy_1873_01.jpg Abgerufen am: 20.01.2016
13	24	Gussmauerwerk mit Flachziegeln nach Choisy Quelle: http://www.augustechoisy2009.net/laminas/Choisy_1873_05.jpg Abgerufen am: 20.01.2016
14	24	Maxentiusbasilika, Rom Quelle: https://nिल्skueper.files.wordpress.com/2009/11/forum_04.jpg Abgerufen am: 20.01.2016
15	25	Schematische Darstellung Amphorengewölbe Quelle: Koch, Wilfried: Baustilkunde. Das Standardwerk zur europäischen Baukunst von der Antike bis zur Gegenwart, Gütersloh-München 29(Hochgestellt)2009 Seite 41
16	25	San Vitale, Ravenna Quelle: https://classconnection.s3.amazonaws.com/987/flashcards/732987/jpg/san_vitale1323027342513.jpg Abgerufen am: 20.01.2016
17	26	Abb. 17: Verbundmauerwerk, Hagia Sophia, Iznik, Türkei Quelle: http://4.bp.blogspot.com/-_jsh4n-1PKvc/T1ziUof7vNI/AAAAAAAAAFbM/jt8IF8DJMyQ/s1600/Aya+Sofya+Iznik+(4).JPG Abgerufen am: 02.03.2016

Abb.	Seite	
18	27	Geometrie einer Pendentifkuppel Quelle: Eigene Abbildung
19	28	Geometrie einer Pendentifkuppel mit Tambour Quelle: Eigene Abbildung
20	28	Byzantinische Gewölbekonstruktion nach Choisy Quelle: http://www.augustechoisy2009.net/laminas/1883_PLANCHE_13.jpg Abgerufen am: 21.01.2016
21	29	Mauerwerk, Pendentifkuppel, Istanbul Quelle: http://shavethewhales.net/wp-content/uploads/2013/11/DSC_0141.jpg Abgerufen am: 03.03.2016
22	30	Rippenkuppel, Hagia Sophia, Istanbul Quelle: https://static.franks-travelbox.com/d/7/a/b/d7ab3785-d96307a17c945d182adeb751cc5cfe9d/die-hagia-sophia-in-istanbul-wurde-aufgrund-ihrer-raffiniert-konstruierten-scheinbar-schwebenden-kuppel-als-achtes-weltwunder-bezeichnet-tuerkei.jpg Abgerufen am: 03.03.2016
23	30	Hagia Sophia, Istanbul Quelle: http://1.bp.blogspot.com/-M-WA206O7xE/UaiN4Hn_dbl/AAAAAAAAA-Fkw/VrYK8l6lSyU/s1600/hagia_sophia.jpg Abgerufen am: 21.01.2016
24	31	Hagia Sophia, Pendentifkuppel auf Gurtbögen Quelle: http://4coffee2togo.com/wp-content/uploads/2012/09/2012-09-14-Hagia_Sofia_-_Kuppel.jpg Abgerufen am: 03.03.2016
25	31	Hagia Sophia, Grundriss Quelle: http://bauforschungonline.ch/sites/default/files/Abb._1_Hagia_Sophia.jpg Abgerufen am: 21.01.2016
26	32	Hagia Sophia, Schematische Darstellung nach Choisy Quelle: http://www.augustechoisy2009.net/laminas/1883_PLANCHE_25.jpg Abgerufen am: 21.01.2016

Abb.	Seite	
27	33	Hagia Sophia, Schematische Darstellung nach Choisy Quelle: http://www.augustechoisy2009.net/laminas/1883_PLANCHE_24.jpg Abgerufen am: 21.01.2016
28	33	Innenansicht, Hagia Sophia, Istanbul Quelle: http://missmillmag.com/wp-content/uploads/2014/03/-Hagia-Sofia-interior.jpg Abgerufen am: 21.01.2016
29	34	Kuppel der Capilla de Villaviciosa, Cordoba, Spanien Quelle: http://www.artencordoba.com/English/-MOSQUE-CATHEDRAL/PHOTOS/INSIDE/MOSQUE_CATHEDRAL_VILLAVICIOSA_CHAPEL_01.jpg Abgerufen am: 08.02.2016
30	35	Basilika San Ambrogio, Mailand Quelle: https://classconnection.s3.amazonaws.com/967/flashcards/427967/jpg/sant'ambrogio__milan_(italy)1353471284619.jpg Abgerufen am: 08.02.2016
31	35	Sechsteiliges Gewölbe, Kathedrale von St. Etienne Quelle: http://img.ev.mu/images/attractions/482-7/960x384/284450.jpg Abgerufen am: 08.02.2016
32	36	Abteikirche St. Denis, Frankreich Quelle: http://www.kathedralen.net/saint_denis/no/saint_denis08.-jpg Abgerufen am: 13.01.2016
33	36	Querhauskonche, Kathedrale Nyon, Frankreich Quelle: http://static.panoramio.com/photos/large/-56315625.jpg Abgerufen am: 08.02.2016
34	37	Gotische Lehrbogenkonstruktion nach Fitchen Quelle: Nußbaum, Norbert/Lepsky, Sabine: Das gotische Gewölbe. Eine Geschichte seiner Form und Konstruktion, München-Berlin 1999 Seite 59
35	38	Gestalt und Funktion des Kreuzgewölbes Quelle: Nußbaum, Norbert/Lepsky, Sabine: Das gotische Gewölbe. Eine Geschichte seiner Form und Konstruktion, München-Berlin 1999 Seite 12

Abb.	Seite	
36	39	Ziegelformstein Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/69/Formstein-1.JPG Abgerufen am: 08.02.2016
37	40	Marienkirche Lübeck, Deutschland Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1d/Germany_Luebeck_St_Mary_nave.jpg Abgerufen am: 08.02.2016
38	40	Backsteinfriese, Kathedrale Steffenshagen Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e2/2009_Kirche_Steffenshagen_Backsteinfriese_1.jpg Abgerufen am: 08.02.2016
39	41	Santa Maria del Fiore, Florenz Quelle: http://www.villeinitalia.de/de/wp-content/uploads/sites/4/2014/06/duomo-di-firenze.jpg Abgerufen am: 03.03.2016
40	42	Festgelegte Maße der Kuppel Quelle: Krämer, Thomas: Die große Kuppel von Florenz. Ein Führer zu dem architektonischen Meisterwerk des Filippo Brunelleschi, Stuttgart 2001 Seite: 29
41	43	Schnitt durch der Kuppel Quelle: http://www.museumsinflorence.com/foto/duomo/image/cupolag.-jpg Abgerufen am: 08.02.2016
42	43	Sprengaxometrie der Kuppel Quelle: Jesberg, Paulgerd: Die Geschichte der Ingenieurbaukunst. Aus dem Geist des Humanismus, Stuttgart 1996 Seite: 49
43	44	Kuppelaufbau im unteren Drittel Quelle: Jesberg, Paulgerd: Die Geschichte der Ingenieurbaukunst. Aus dem Geist des Humanismus, Stuttgart 1996 Seite:49
44	44	Abb. 46: Steinzuganker Quelle: Jesberg, Paulgerd: Die Geschichte der Ingenieurbaukunst. Aus dem Geist des Humanismus, Stuttgart 1996 Seite:47

Abb.	Seite	
45	45	Anordnung Horizontalbögen in Schnitt und Grundriss Quelle: Krämer, Thomas: Die große Kuppel von Florenz. Ein Führer zu dem architektonischen Meisterwerk des Filippo Brunelleschi, Stuttgart 2001 Seite: 61
46	46	Geometrische Struktur und prportionale Beziehungen Quelle: Pizzigoni, Attilio: Filippo Bruneleschi, Zürich-München 1991 Seite: 41
47	47	Bei einer waagrecht-geraden Schichtenlage entstehen in der Eckpfeilerzone potentielle Bruchzonen, „Buchwinkel“ Quelle: Krämer, Thomas: Die große Kuppel von Florenz. Ein Führer zu dem architektonischen Meisterwerk des Filippo Brunelleschi, Stuttgart 2001 Seite: 85
48	47	Brunelleschis Lösung, girlandenförmige Schichten Quelle: Krämer, Thomas: Die große Kuppel von Florenz. Ein Führer zu dem architektonischen Meisterwerk des Filippo Brunelleschi, Stuttgart 2001 Seite: 85
49	48	Keilförmige Anordnen des Mauerwerks Quelle: Krämer, Thomas: Die große Kuppel von Florenz. Ein Führer zu dem architektonischen Meisterwerk des Filippo Brunelleschi, Stuttgart 2001 Seite: 87
50	48	Keilförmige Strukturierung durch Fischgrätverband Quelle: Krämer, Thomas: Die große Kuppel von Florenz. Ein Führer zu dem architektonischen Meisterwerk des Filippo Brunelleschi, Stuttgart 2001 Seite: 87
51	48	Fischgrätenmuster im Inneren der Kuppel Quelle: https://theglobaltraveler.files.wordpress.com/2009/05/cupola_28.jpg Abgerufen am: 04.03.2016
52	49	Drei Arten traditioneller Mauergewölbe Quelle: Ochsendorf, John: Guastavino Vaulting. The art of structural tile, New York 2010 Seite: 21

Abb.	Seite	
53	50	Katalanisches Gewölbes, Mapungubwe Interpretation Center, Südafrika Quelle: http://krisdedecker.typepad.com/.a/6a00e0099229e8883301287670ca57970c-pi Abgerufen am: 04.03.2016
54	51	Dachgeschoß Casa Mila, Barcelona Quelle: http://www.gaudidesigner.com/data/file/224.jpg Abgerufen am: 04.03.2016
55	52	Gewölbekonstruktion auf Holzbalken, Batlló Fabrik Quelle: Ochsendorf, John: Guastavino Vaulting. The art of structural tile, New York 2010 Seite: 32
56	52	Gewölbe auf Stahlstützen im UG , Batlló Fabrik Quelle: Ochsendorf, John: Guastavino Vaulting. The art of structural tile, New York 2010 Seite: 33
57	53	Theater La Massa, Vilassar de Dalt Quelle: http://guastavinovaulting.com/wp-content/themes/carls-design/featured_3.jpg Abgerufen am: 04.03.2016
58	54	Im Schnitt wird die geringe Schalenstärke sichtbar Quelle: Ochsendorf, John: Guastavino Vaulting. The art of structural tile, New York 2010 Seite: 38
59	54	Bauarbeiten an der Public Library, Boston Quelle: http://s3.amazonaws.com/media.wbur.org/wordpress/1/files/2013/01/picGuastavinoBPLConstruction.jpg Abgerufen am: 24.02.2016
60	55	Belastungsversuch eines Mauerwerkbogens Quelle: Ochsendorf, John: Guastavino Vaulting. The art of structural tile, New York 2010 Seite: 152
61	55	Bar des Vanderbilt Hotels, New York Quelle: http://qe1pr67o4hj19lx494tvhiwf.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2014/05/08-guastavino-vault-exhibit-nyc-archpaper.jpg Abgerufen am: 24.02.2016

Abb.	Seite	
62	56	St. JohntheDivine, New York Quelle: http://cdn.cstatic.net/images/gridfs/534d6673f92ea12a1d02d8a-7/GuastavinoSlideshowA_04.JPG Abgerufen am: 24.02.2016
63	56	Untersicht mit Ringschichten Quelle: http://cdn.cstatic.net/images/gridfs/534d6a2ef92ea16451014-96a/GuastavinoSlideshowB_04.JPG Abgerufen am: 24.02.2016
64	57	Vergleich St. John the Divine und Dom Florenz Quelle: Ochsendorf, John: Guastavino Vaulting. The art of structural tile, New York 2010 Seite: 124
65	57	Schematische Darstellung, bewehrtes Mauerwerk Quelle: Ochsendorf, John: Guastavino Vaulting. The art of structural tile, New York 2010 Seite: 126
66	58	St. JohntheDivine, New York Quelle: http://cdn.cstatic.net/images/gridfs/534d6677f92ea12a1d02d8b-2/GuastavinoSlideshowA_03.JPG Abgerufen am: 24.02.2016
67	58	Vier Schritte der Guastavino Mauerwerkskonstruktion Quelle: Ochsendorf, John: Guastavino Vaulting. The art of structural tile, New York 2010 Seite: 127
68	59	Belastungstest einer Wendeltreppe Quelle: http://qe1pr67o4hj19lx494tvhiwf.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2014/05/24-guastavino-vault-exhibit-nyc-archpaper.jpg Abgerufen am: 24.02.2016
69	60	Markthalle, Porto Alegre Quelle: https://benhuser.files.wordpress.com/2012/01/birds-eye-view-from-s-w-hist1.jpg Abgerufen am: 05.03.2016

Abb.	Seite	
70	61	Baustellenfoto, bewehrtes Mauerwerk Quelle: https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/88/-de/52/88de5254e4643da5983505591a73285c.jpg Abgerufen am: 01.03.2016
71	61	Gauss'sche Schale Quelle: Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía: Eladio Dieste. 1943-1996, Sevilla-Montevideo 1996 Seite: 44
72	62	Längsschnitt, Gauss'sche Schale Quelle: Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía: Eladio Dieste. 1943-1996, Sevilla-Montevideo 1996 Seite: 45
73	62	Freistehendes Gewölbe, Busbahnhof Salto Quelle: http://c1038.r38.cf3.rackcdn.com/group4/-building39299/media/ndxf_bus1.gif Abgerufen am: 05.03.2016
74	63	Freistehendes Gewölbe, Vorspannungssystem Quelle: Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía: Eladio Dieste. 1943-1996, Sevilla-Montevideo 1996 Seite: 48
75	63	Tankstellendach, Salto Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/Homenaje_a_Eladio_Dieste_monumento_Salto_02.jpg Abgerufen am: 05.03.2016
76	64	Christo Obrero - Kirche, Atlántida Quelle: https://c1.staticflickr.com/5/4002/4315950186_75aea82-b9c_b.jpg Abgerufen am: 05.03.2016
77	64	Christo Obrero - Kirche, Baustellenfoto Quelle: https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x/07/9c/-14/079c14dc50d71e1d01e2d06e73400aac.jpg Abgerufen am: 05.03.2016
78	65	Christo Obrero - Kirche, Innenraum Quelle: https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/564x/3f/cd/84/3-fcd845011ce0a59e0b0b79de25cfbe0.jpg Abgerufen am: 05.03.2016

Abb.	Seite	
79	65	Christo Obrero - Querschnitt Quelle: http://c1038.r38.cf3.rackcdn.com/group5/building41935/me dia/bvgl_cortes_iglesia_de_atlantida.jpg Abgerufen am: 04.01.2017
80	65	Christo Obrero - Grundriss Quelle: http://images.adsttc.com/media/images/55e6/3761/8450/b539/a100/02c2/newsletter/800px-planta_iglesia_de_atlantida.jpg?1441150812 Abgerufen am: 06.01.2017
81	66	Caputto Fruit Plant, Salto, Uruguay Quelle: http://archleague.org/2014/06/material-tour-de-force-the-work-of-eladio-dieste/ Abgerufen am: 01.03.2016
82	67	Hochlochziegel in verschiedenen Formaten Quelle: http://www.ziegel-elemente.de/files/RZE2016/bilder/ziegel-vorteile/ziegel-rohstoff.png Abgerufen am: 23.11.2016
83	68	Geometrisches Prinzip von Ceramic Translation Quelle: Eigene Abbildung
84	71	Generieren der Schnittfläche in Abhängigkeit des Rasters Quelle: Eigene Abbildung
85	72	Generieren einer Schnittfläche und schneiden des Moduls Quelle: Eigene Abbildung
86	73	Extrudieren und schneiden des Moduls Quelle: Eigene Abbildung
87	74	Multicultural Center, Amsterdam, Marlies Rohmer Quelle: http://www.baunetzwissen.de/imgs/8/7/6/3/1/9/Drei-Wand-Deatl_MR-c53c37e4be7ea631.jpg Abgerufen am: 28.11.2016
88	76	Quadratisch gerasterte Flächen Quelle: Eigene Abbildung
89	77	Tragwerk mit rechteckigem Grundriss Quelle: Eigene Abbildung

Abb.	Seite	
90	77	Tragwerk mit rechteckigem Grundriss Quelle: Eigene Abbildung
91	77	Tragwerk mit quadratischem Grundriss Quelle: Eigene Abbildung
92	78	Rechteckiger Raster Quelle: Eigene Abbildung
93	79	Tragwerk über rechteckig gerasterter Grundfläche Quelle: Eigene Abbildung
94	80	Maximale und minimale Raster- bzw Modulgröße M=1:10 Quelle: Eigene Abbildung
95	81	Drei Kuppeln mit verschiedenen Rastermaßen Quelle: Eigene Abbildung
96	82	Addition der gerasterten Grundfläche Quelle: Eigene Abbildung
97	83	Addition einzelner Tragstrukturen Quelle: Eigene Abbildung
98	84	Festlegen der Grundrissfläche Quelle: Eigene Abbildung
99	84	Festlegen der Rasterfläche Quelle: Eigene Abbildung
100	85	Generieren der Schnittgeometrie Quelle: Eigene Abbildung
101	85	Trimmen der Schnittgeometrie Quelle: Eigene Abbildung
102	86	Tragstruktur mit achteckiger Grundfläche Quelle: Eigene Abbildung
103	86	Orthogonaler Raster Quelle: Eigene Abbildung

Abb.	Seite	
104	86	Translationsgeometrie mit orthogonalem Raster Quelle: Eigene Abbildung
105	86	Tragstruktur mit orthogonalem Raster Quelle: Eigene Abbildung
106	87	Raster aus Parallelogrammen Quelle: Eigene Abbildung
107	87	Dem Raster folgende Translationsgeometrie Quelle: Eigene Abbildung
108	87	Dem Raster folgende Tragstruktur Quelle: Eigene Abbildung
109	88	Auflösen einer Rasterachse in eine Kurve Quelle: Eigene Abbildung
110	88	Dem Raster folgende Translationsgeometrie Quelle: Eigene Abbildung
111	88	Dem Raster folgende Tragstruktur Quelle: Eigene Abbildung
112	89	Auflösen beider Rasterachsen in Kurven Quelle: Eigene Abbildung
113	89	Dem Raster folgende Translationsgeometrie Quelle: Eigene Abbildung
114	89	Dem Raster folgende Tragstruktur Quelle: Eigene Abbildung
115	90	Generieren einer Schnittfläche Quelle: Eigene Abbildung
116	90	Geometriestudie mit zwei identen Schnittflächen Quelle: Eigene Abbildung
117	91	Ausformungsvarianten von Schnittflächen Quelle: Eigene Abbildung

Abb.	Seite	
118	92	Anwendung der Geometrien am Bausystem Quelle: Eigene Abbildung
119	93	Doppelt gekrümmte Kuppel Quelle: Eigene Abbildung
120	93	Einfach gekrümmte Tonnenschale Quelle: Eigene Abbildung
121	94	Linearisierungsvarianten von Schnittflächen Quelle: Eigene Abbildung
122	95	Gleichmäßige Linearisierung in Rasterabständen Quelle: Eigene Abbildung
123	95	Gleichmäßige Linearisierung in doppelten Rasterabständen Quelle: Eigene Abbildung
124	96	Mit Hilfe von Kangaroo simulierte Kettenlinien Quelle: Eigene Abbildung
125	97	Translationsschale mit Rand- und Leitkurve in Form von Stützlinsen Quelle: Eigene Abbildung
126	97	Übertragung der Geometrie auf das Bausystem Quelle: Eigene Abbildung
127	98	Abstufen der Randkurve Quelle: Eigene Abbildung
128	98	Abstufung der Module in eine Richtung Quelle: Eigene Abbildung
129	99	Schuppenartige Abstufung der Module in beide Richtungen Quelle: Eigene Abbildung
130	100	Abstufen der Randkurve Quelle: Eigene Abbildung
131	100	Abtreppung der Module in eine Richtung Quelle: Eigene Abbildung

Abb.	Seite	
132	101	Abtreppung der Module in beide Richtungen Quelle: Eigene Abbildung
133	102	Tragstruktur mit unterschiedlichen Schnittflächen Quelle: Eigene Abbildung
134	102	Obere und untere Schnittfläche Quelle: Eigene Abbildung
135	103	Kuppel mit verschiedenen Schnittflächen Quelle: Eigene Abbildung
136	103	Die Schalenstärke verringert sich zur Mitte hin Quelle: Eigene Abbildung
137	104	Keine Vereinfachung der Deckflächen Quelle: Eigene Abbildung
138	104	Vereinfachung von 64 auf 16 Deckflächen Quelle: Eigene Abbildung
139	105	Vereinfachung von 64 auf 4 Deckflächen Quelle: Eigene Abbildung
140	105	Vereinfachung von 64 auf 1 Deckfläche Quelle: Eigene Abbildung
141	107	Kunstinstitution von Yusuke Seki Quelle: http://assets.inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2015/07/repurposed-Hasami-ceramics-installation-by-Yusuke-Seki-7.jpg Abgerufen am: 16.06.2016
142	108	Modul- und Knotenvariante im flächigen Verband Quelle: Eigene Abbildung
143	109	Modul- und Knotengeometrie Quelle: Eigene Abbildung
144	110	Verbindungsprinzip Quelle: Eigene Abbildung

Abb.	Seite	
145	111	Isometrie einer Kuppelkonstruktion unter Verwendung der Modulvariante Quelle: Eigene Abbildung
146	112	Modul- und Knotenvariante im flächigen Verband Quelle: Eigene Abbildung
147	113	Isometrie einer länglichen Schale unter Verwendung der rechteckigen Modulgeometrie Quelle: Eigene Abbildung
148	114	Modul- und Knotenvariante im flächigen Verband Quelle: Eigene Abbildung
149	115	Modul- und Knotengeometrie Quelle: Eigene Abbildung
150	116	Verbindungsprinzip Quelle: Eigene Abbildung
151	117	Isometrie einer Kuppel unter Verwendung der Modulgeometrie Quelle: Eigene Abbildung
152	118	Modul- und Knotenvariante im flächigen Verband Quelle: Digitaler Atlas, GIS Steiermark
153	119	Modul- und Knotengeometrie Quelle: Eigene Abbildung
154	120	Verbindungsprinzip Quelle: Eigene Abbildung
155	121	Isometrie einer Kuppel unter Verwendung der Modulgeometrie Quelle: Eigene Abbildung
156	122	Gestaltungsvariante im flächigen Verband Quelle: Eigene Abbildung
157	123	Entstehung der Modulgeometrie Quelle: Eigene Abbildung

Abb.	Seite	
158	124	Isometrie einer Kuppel unter Verwendung der Modulgeometrie Quelle: Eigene Abbildung
159	125	U -förmiger Stein Quelle: Eigene Abbildung
160	126	Verlegemuster als Draufsicht und Isometrie Quelle: Eigene Abbildung
161	126	Läuferverband als Draufsicht und Isometrie Quelle: Eigene Abbildung
162	127	Parkettverband als Draufsicht und Isometrie Quelle: Eigene Abbildung
163	127	Ellbogenverband als Draufsicht und Isometrie Quelle: Eigene Abbildung
164	128	Positionierung der Hülle über der Tragstruktur Quelle: Eigene Abbildung
165	129	Punktgehaltene Verglasung mit Pressplatte Quelle: Eigene Abbildung
166	130	Lagerung der Scheiben auf Kreuzhalter in Form der PVC - Verbinder Quelle: Eigene Abbildung
167	131	Überlappende Eindeckung Quelle: Eigene Abbildung
168	132	Überlappende Eindeckung Quelle: Eigene Abbildung
169	134	Visualisierung des Forschungspavillons Quelle: Eigene Abbildung
170	136	Blick auf den Bauplatz mit Uhrturm Quelle: Eigene Abbildung
171	136	Blick vom Uhrturm auf das Oberschloss Quelle: Eigene Abbildung

Abb.	Seite	
172	137	Orthofoto Gesamtanlage M 1:2500 Quelle: Digitaler Atlas Steiermark Abgerufen am: 06.10.2016
173	137	Schwarzplan Gesamtanlage M 1:2500 Quelle: Eigene Abbildung
174	138	Lageplan Gesamtanlage M 1:1000 Quelle: Eigene Abbildung
175	140	Lageplan Bauplatz mit Blickbeziehungen M 1:1000 Quelle: Eigene Abbildung
176	141	Formfindungsprozess Quelle: Eigene Abbildung
177	142	Lageplan Bauplatzumgebung M 1:500 Quelle: Eigene Abbildung
178	143	Grundriss M 1:100 Quelle: Eigene Abbildung
179	144	Grundriss Platzgestaltung M 1:100 Quelle: Eigene Abbildung
180	146	Platzgestaltung Quelle: Eigene Abbildung
181	147	Platzgestaltung Quelle: Eigene Abbildung
182	148	Unterschiedliche Sitzhöhen und Kombination von Sitzsteinen Quelle: Eigene Abbildung
183	150	Schnitt 1-1 M 1:100 Quelle: Eigene Abbildung
184	151	Schnitt 2-2 M 1:100 Quelle: Eigene Abbildung
185	152	Ansicht Süd M 1:100 Quelle: Eigene Abbildung

Abb.	Seite	
186	153	Ansicht Ost M 1:100 Quelle: Eigene Abbildung
187	154	Visualisierung Quelle: Eigene Abbildung
188	156	Visualisierung Quelle: Eigene Abbildung
189	158	Sprengaxonometrie der Pavillonkonstruktion Quelle: Eigene Abbildung
190	159	Keramische Struktur des Pavillons Quelle: Eigene Abbildung
191	160	Simulation der Zugspannung in den Keramik - Modulen Quelle: Eigene Abbildung
192	160	Eckmodule mit verkleinerten Öffnungen Quelle: Eigene Abbildung
193	161	Stützenkopf, Einspannung und Fundament Quelle: Eigene Abbildung
194	162	Stützensausformung des Entwurfs Quelle: Eigene Abbildung
195	162	Alternative Stützenvariante Quelle: Eigene Abbildung
196	163	Pavillon mit alternativer Stützenvariante Quelle: Eigene Abbildung
197	164	Sprengaxonometrie der Hüllenkonstruktion Quelle: Eigene Abbildung
198	165	Sprengaxonometrie mit Randstein und Entwässerung Quelle: Eigene Abbildung
199	165	Entwässerung über Rinne und Stütze Quelle: Eigene Abbildung

Abb. Seite

200 168 Tontafel des Gilgamesch - Epos | Quelle: [http://hroniki-mira.com/wp-content/uploads/2014/04/ IMG_20140408_000424.jpg](http://hroniki-mira.com/wp-content/uploads/2014/04/IMG_20140408_000424.jpg) | Abgerufen am: 26.09.2016