

ceramic translation

Teil I - Tragwerksentwurf und Konstruktion

Ein modulares, keramisches Bausystem
zur Herstellung doppelt gekrümmter Tragstrukturen



Alwin Moser, BSc

CeramicTranslation - Teil I - Tragwerksentwurf und Konstruktion
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

Trummer Andreas, Assoc.Prof.

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 | Die Vertiefung in baustoffkundliche und statische Themenkreise während der Ausarbeitung der Masterarbeit sowie die Herstellung des Prototypen hat uns des Öfteren Unterstützung suchen lassen. 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 vorhergehenden Projektübung gebührt Prof. Martin Bechthold, DI Felix Amtsberg, sowie unserem Studienkollegen, Stanislaus Haidacher, BSc unser Dank.

Für die Unterstützung bei der aufwendigen 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 | Im Rahmen des vom ITE angebotenen Masterstudios „CeramicRe: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 CeramicTranslation 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 „CeramicTranslation“ setzt sich mit dem Entwurf und den Eigenschaften des entwickelten keramischen Tragsystems auseinander. Sie ist zweigeteilt, wobei „Teil I - Tragwerksentwurf und Konstruktion“ die technologischen und statischen Aspekte des Systems behandelt. Es wird die Umsetzung und Herstellung anhand eines Prototypen dargestellt. Mittels eines Belastungstests an einem Modellsystem und FE-Simulationen wurde versucht detailliertere Einblicke in das Verhalten und die statischen Möglichkeiten der erzeugbaren Keramiktragstrukturen zu gewinnen.

Die von meinem Kollegen Bernhard Harrer verfasste Masterarbeit „CeramicTranslation - Teil II - Variation und Ausformung“ fokussiert auf die formalen Möglichkeiten des Systems und die Anwendung in einem Architekturentwurf.

1 Keramik		3 Prinzipien & Referenzen		5 Statische Aspekte		6 Verwendete Quellen	
Geschichte der Keramik	13	Bögen	50	Statische Aspekte der Knoten	128	Selbstständige Publikationen	205
Einteilung von Keramiken	20	Flächen	52	Erste Belastungsversuche	132	Unselbstständige Publikationen	206
Grundstoffe für Keramiken	28	Schalen	54	Biegezugversuch Einfeldträger	136	Abbildungsverzeichnis	207
Formen von Tonmassen	30	Gitterschalen	56	Werkstoffkennwerte	146		
Extrusion von Tonmassen	33	Schalendach St. Antony	58	FE-Modellierung	148		
Trocknen und Brennen	35	Joe & Rika Mansueto Library	60	RFEM: Modellierung Modul	152		
2 Innovative Keramik-Systeme		4 CeramicTranslation		RFEM: Modellierung Fügung	154		
Plazierung von Elementen	40	Übersicht	63	RFEM: Detailmodell Einfeldträger	160		
Innovative Formgebung	42	Prinzipien von CeramicTranslation	65	RFEM: Statisches Modell	164		
		Keramikmodule und ihre Herstellung	68	RFEM: Tragwerksbeurteilung	170		
		Fügung mittels Verbinder	80	RFEM: Statisches Modell - Prototyp	172		
		Vorversuche und Fügevarianten	84	RFEM: Weiterentwickeltes Modul	180		
		Planung und Software-Tools	90	RFEM: Forschungspavillon	182		
		Herstellung eines Prototypen	92	Fazit und Ausblick	198		
		Weiterentwicklung	122				

Ton und Keramik ist eng mit der Kulturgeschichte des Menschen verbunden. Schon früheste Funde belegen dies. Während der kulturgeschichtlichen Entwicklung hat Keramik im Alltag der Menschen immer wesentliche Funktionen in rituellen, künstlerischen, alltäglichen und technischen Bereichen eingenommen.

1

Frühgeschichte | Die bisher älteste aufgefundene Tonfigur stammt aus einer Steinzeitsiedlung, die in den 1920er Jahren bei Ausgrabungen in der [ehemaligen] Tschechoslowakei entdeckt wurde. Archäologen schätzen das Alter dieser kleinen Frauenfigur auf 25.000 bis 29.000 Jahre. Am selben Ort fanden sich Fragmente eines intelligent konstruierten Brennofens - eine der ersten Keramikproduktionen (wenn nicht überhaupt die erste).¹

„Früheste Fundorte von in Aufbauarbeit (ohne Töpferscheibe) hergestellten Gefäßen sind in der Fukiin Höhle in Kyushu (Japan). Die Stücke konnten mittels Radiocarbonmethode auf ein Alter von bis zu 14.700 Jahren bestimmt werden und man kann an der japanischen Küste bei dieser sogenannten „Jomon-Periode“ erstmals von einer Periode der Keramikherstellung sprechen.“²

Über Jahrtausende hinweg wurden zufällig gefundene, geeignete Rohstoffe mit Wasser zu einer formbaren Masse vermengt. Die Formgebung der Masse erfolgte über lange Zeit ausschließlich durch Kneten und Quetschen oder durch Drücken in Formen. Im Gegensatz zu Metallen und Gläsern werden für die Herstellung von Keramiken die gemischten Rohstoffe unmittelbar geformt und nicht vorher erst der eigentliche Werkstoff erschmolzen.³

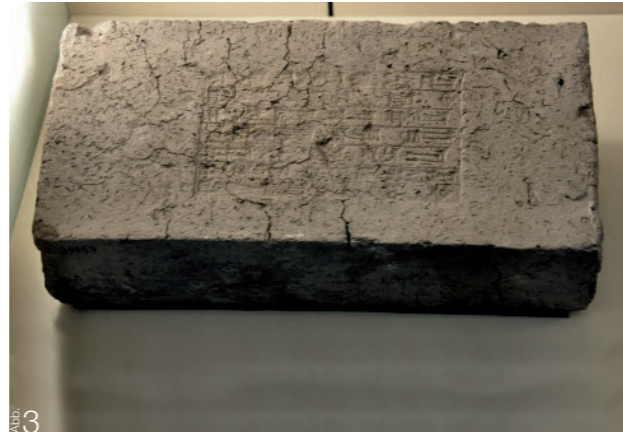


1 Venus von Dolní

2 Früher gebrannter Ton-Ziegel

Die Geschichte von Ton und Lehm, in späterer Folge dann Keramik, als Baumaterial reicht ebenfalls mehrere tausend Jahre zurück. Älteste bekannte Ziegel aus an der Sonne getrocknetem Lehm in Cayönü (südöstliches Anatolien) werden auf 7500 v.Chr. datiert. Die Herstellung gebrannter Ziegel in Mesopotamien kann bis etwa 4000 v.Chr. zurückverfolgt werden. Im Nahen Osten kann in den folgenden Jahrhunderten auch die Herstellung erster gefärbter Ziegel (ca. 3000 v.Chr., Mesopotamien), von gebrannten Kanalisationsrohren (3200 v.Chr., Syrien), die Entwicklung des gebrannten quadratischen Flachziegels und früher Hochbau mit gebrannten Ziegeln (2250 v.Chr. Ur/Mesopotamien) verwurzelt werden.⁴

Die Herstellung von Ziegeln kann damit wahrscheinlich als die älteste Herstellungsmethode eines Massengutes mit industriellen Ansätzen angesehen werden.⁵



3
Ziegel mit Inschrift
Eingedrückte Inschrift über den Neo-Babylonischen König Nebuchadnezzar II von Babylon



4
Antike und frühgeschichtliche Transport- und Aufbewahrungsgefäße

Antike | In der griechischen und römischen Antike wurden viele Techniken wesentlich verfeinert, und Keramiken haben eine breite Anwendung gefunden. Kurz vor der Zeitwende wurden die ersten Dreh- und Töpferscheiben entwickelt und es entstanden damit die ersten rotationssymmetrischen Formen und Gefäße. Vor allem im künstlerischen Bereich sind Weiterentwicklungen dieser Töpferscheiben noch heute sehr verbreitet.⁶ Erste Nachweise zur Verwendung von Dachziegeln finden sich um 2300 v.Chr. in Miloy bei Agros/Griechenland, Dachziegel aus gebranntem Ton dann um etwa 800 v.Chr. ebenfalls in Griechenland.

Etwa 80 n.Chr. wurden von den Römern große Zentralziegeleien (Militärziegeleien), etwa im besetzten Germanien (z.B. Mainz, Rheinzabern, Straßburg), gegründet.⁷

Mittelalter und Neuzeit | Nach dem Niedergang des Römischen Reiches ist es in vielen Bereichen zu einem gewissen Bedeutungsverlust von Keramiken, insbesondere von Ziegeln in Europa, gekommen. Erst im 12. Jhdt. haben Mönche dem Ziegel zu einer neuen Blüte verholfen, was sich besonders im gotischen Kirchenbau widerspiegelt.⁸

In der Neuzeit haben sich in vielen Anwendungsbereichen von Keramiken zunehmend maschinelle Verfahren zur Herstellung zu etablieren begonnen. In der Massenproduktion von Geschirr im 20. Jahrhundert wurde das manuelle Drehen durch Maschinen (Rollermaschinen) übernommen. Es hat sich ein großer Bedarf an günstig herstellbaren Keramikwaren entwickelt.⁹

Im Bauwesen hat sich Keramik zum allergrößten Teil in Form des Ziegels behaupten können. Auf Grund seiner besonderen Eigenschaften haben dabei zwei Anwendungsbereiche traditionell enorme Bedeutung erlangt. Der Ziegel als Wandmaterial und der Dachziegel zur Dacheindeckung



5

H&D-Kaiserziegel

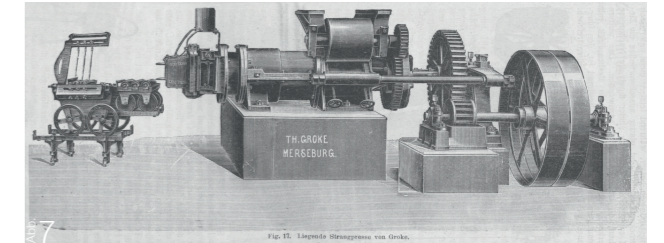


6

Historische grobkeramische Dacheindeckung (Dubrovnik)

Die gute Druckbelastbarkeit von gebranntem Ton zusammen mit der günstigen Verfügbarkeit von Rohstoffen und die relativ einfache Formgebung haben zur Weiterentwicklung des Lehmziegels zum Tonziegel als Bauelement für Wände und Gewölbe geführt. Die gute Witterungsbeständigkeit hat weiters eine Verwendung als Dachziegel nahegelegt.

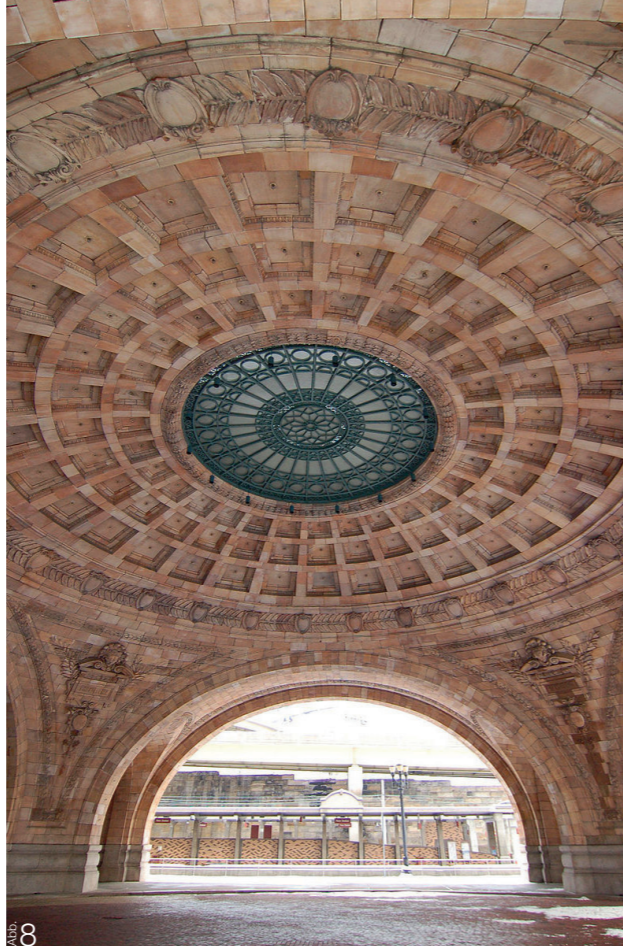
Die technologischen Entwicklungen im 17. Jhdt. haben sich auch in der Herstellung von Ziegeln ausgewirkt. Die Herstellung erster Maschinenziegel ist ein sehr frühes Beispiel für Industrialisierung und Automatisierung in der Baustoffherstellung.



Liegende Strangpresse (ca. 1830)

Als Maschinenziegel bezeichnet man die auf Schneckenpressen maschinell hergestellten Mauerziegel - im Gegensatz zu den manuell gefertigten Handstrichziegeln. Die eigentliche maschinelle Ziegelherstellung begann 1863 mit der Einführung der ersten liegenden Schneckenpresse von Schlickeysen als erstem wirklich brauchbaren Extruder (Abbildung 7). Bereits 1885 gab es über 500 Schneckenpressen. Trotzdem war die Einführung in der Ziegelindustrie nicht ganz einfach, da noch bis zum Ersten Weltkrieg 1914 verschiedene Bauunternehmer den Maschinenziegel mit der Begründung, dass an einem Sandstrichziegel der Mörtel besser haften würde, ablehnten. Der Name Maschinenziegel wurde daher ursprünglich als besondere Gütebezeichnung gegenüber dem Handstrichziegel geprägt. Der Begriff wird in vielen Entwicklungsländern, in denen die manuelle Fertigung immer noch große Bedeutung hat, auch heute noch zur Unterscheidung verwendet.¹⁰

Die beiden Hauptverwendungsfelder im Bauwesen stellen heute nach wie vor Ziegel für Wände sowie solche für Decken und Dächer dar, wobei sich innerhalb dieser Bereiche eine Vielzahl von Sonderformen und Varianten herausgebildet haben.



8
Gewölbe der Union Station (Gustavino)

Gänzlich neue und innovative Produkte sind nicht entstanden bzw. sind auf Elemente in Fassaden beschränkt.

Aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen wurden Fliesen nach dem Zweiten Weltkrieg in Osteuropa und der Sowjetunion und nachfolgend in Asien auf Fassaden geklebt. Dabei wurden hauptsächlich die Langlebigkeit und die Wasserbeständigkeit geschätzt.

In der Architekturproduktion im 20. Jhd. verwendete dann eine Auswahl von Architekten, wie Frank Lloyd Wright, Arne Jacobsen und Henry van de Velde, Keramikelemente für einigen ihrer Projekte. Auch Architekten wie Alvar Alto führten glasierte Fliesen als Gestaltungselemente ein.

Ab 1954 erweiterte Eladio Dieste die konstruktive Verwendung von Keramik mit den aus Ziegeln hergestellten Schalenkonstruktionen in Spanien und Uruguay. Grundlagen und Anfänge davon finden sich bei Guastavino. Rafael Guastavino bildete mit seinem patentierten System aus Fliesen für feuerfeste Gewölbe eines der seltenen Beispiele für die konstruktive Anwendung von Keramikfliesen.¹¹

- 1 Vgl. Bechthold 2015, S.12
- 2 Bender 1995, S.236
- 3 Vgl. Hülsenberg 2014, S.11
- 4 Vgl. Bender 1995, S.237
- 5 Vgl. Brownell 1976, S.2
- 6 Vgl. Bender 1995, S.236
- 7 Vgl. Bender 1995, S.237
- 8 Vgl. Pech/Gangoly/Holzer/Maydl 2015, S5.
- 9 Vgl. Bender 1995, S.237
- 10 Vgl. Bender 1995, S.123
- 11 Vgl. Bechthold 2015, S.16

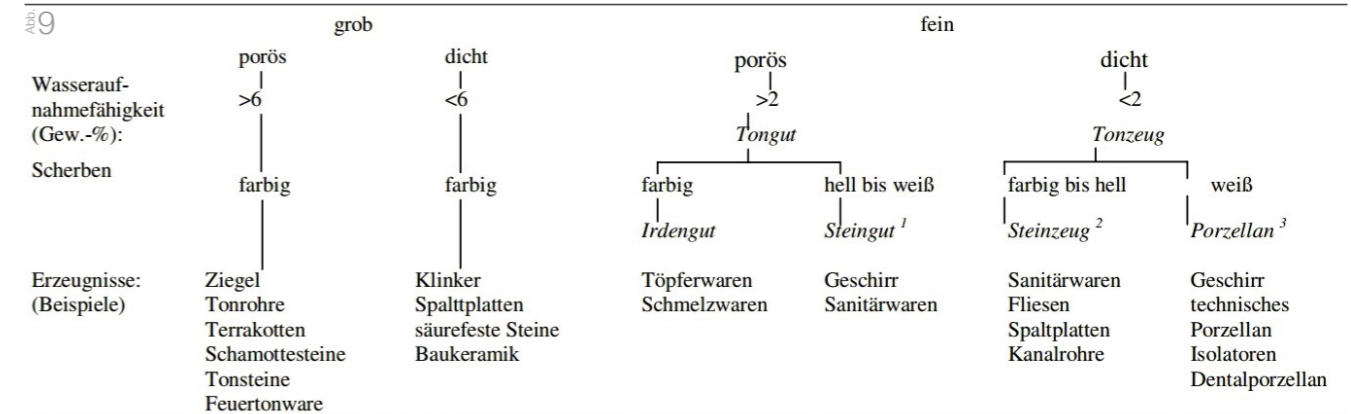
1.2 Einteilung von Keramiken

Durch die lange Tradition der Keramikherstellung und die vielfältig Anwendung, kommt es zu einer etwas ungenauen Verwendung von Begriffen. Viele Bezeichnungen haben sich traditionell etabliert, obwohl sie engeren systematischen Definitionen oft nicht voll entsprechen. Auch Einteilungen von Keramiken wurden je nach Gewerbe und Sichtweise nach unterschiedlichen Kriterien getroffen. Im Folgenden soll eine erste, grobe Einteilung der Keramiken, insbesondere hinsichtlich ihrer Verwendung, erfolgen. Für eine weitere Gliederung wird dann die „Dichtheit“ des Scherbens herangezogen. Weniger dichte Scherben enthalten noch einen größeren Anteil an Poren, während bei entsprechender Rohstoffauswahl und Brandbedingungen sich der Porenanteil stark verringern lässt und ein „dichter“ Scherben entsteht.

Gebrauchskeramiken⁹ | Charakterisiert nach ihrer Verwendung spricht man im Alltag von Keramiken und meint damit meist die große Gruppe der „Gebrauchskeramiken“. Dazu zählen Gebrauchsgegenstände, künstlerische Erzeugnisse und Baumaterialien, beispielsweise Geschirr, Ziegel, Sanitärkeramiken, Fliesen, Tonfiguren, u.a.

Da es sich bei Gebrauchskeramiken um günstige Bauteile handeln muss, werden sie vornehmlich aus Ton gefertigt, der in großen Mengen vielerorts günstig verfügbar ist. Entsprechend der Rohstoffe handelt es sich dann bei den gebrannten Produkten in chemischer Hinsicht um „Silikat-Keramiken“. An diese werden in materialtechnologischer Hinsicht jedoch meist geringere Anforderungen gestellt und sie sind von den technischen Silikat-Keramiken (siehe unten) zu unterscheiden.

Einteilung von Keramiken nach dem Gefüge



¹Mit den Werkstoffen Ton-, Feldspat- und Kalksteingut
²Mit den Werkstoffen Feinsteinzeug, Vitreous China und Cordierit
³Mit den Werkstoffen Hart- und Weichporzellan, Steatit und Li-Al-Silicate

Zur großen Gruppe der Silikat-Keramiken zählen all jene, bei denen der Grundstoff zu mehr als 20 % aus SiO₂ besteht. Die Gruppe der Silikat-Mineralen umfasst eine große Anzahl von Mineralen, wobei Ton und Lehm zu einem Großteil aus ebensolchen Silikatmineralien besteht.

Innerhalb der Gebrauchskeramiken findet man meist eine Einteilung nach der Korngröße im Gefüge und nach der Dichtheit des Scherbens, also seiner Porosität. Diese hängt einerseits von den verwendeten Rohstoffen und deren Aufbereitung ab, andererseits von der gewählten Temperatur beim Brennen.

Grobkeramiken ¹³ | Grobkeramiken sind solche, bei denen die Körnung im Gefüge mit freiem Auge erkennbar ist. Eine weitere Unterteilung kann nach der Wasseraufnahmefähigkeit in poröse und dichte Produkte erfolgen.

Ziegel beispielsweise weisen einen porösen, farbigen Scherben auf. Anhand der Herstellungstechnologie sind sie im Bereich der grobkeramischen Erzeugnisse anzusiedeln. Hinsichtlich des Gefüges kann jedoch nicht immer eine klare Einteilung in Grob- oder Feinkeramik getroffen werden. Weil bei den Ziegeln Eigenschaften wie Atmungsaktivität und niedrige Wärmeleitfähigkeit gewünscht sind, werden sie meist offenporig hergestellt. Für die Herstellung von Ziegeln werden aus Kostengründen meist lokale Lehme und Tone verwendet, wobei die genaue Zusammensetzung meist eine eher untergeordnete Rolle spielt, sofern die Anforderungen an die Verarbeitbarkeit und an das Endprodukt erfüllt sind.

Eine relativ hohe Porosität ist bei vielen Ziegelprodukten heute gewünscht, wobei eine reine Senkung der Brenntemperatur mit zu vielen Nachteilen in den mechanischen Eigenschaften verbunden wäre. Es werden deshalb gezielt Porosierungsmittel, wie Polystyrol, Papierschlamm oder Sägespäne, eingesetzt.

Grobkeramik:
Moderner Hochlochziegel
als Beispiel für ein
grobkeramisches Erzeugnis
Abb. 10



Klinkersteine zählen ebenfalls zu den Grobkeramiken, sind jedoch bis zum Verschwinden der offenen Porosität gebrannt. Dies wird durch bei niedrigeren Temperaturen versinternden Rohstoffen bzw. durch höhere Temperaturen beim Brand erreicht. Klinkersteine sind also im Unterschied zu gewöhnlichen Bauziegeln dicht gebrannt. Für Klinkersteine findet man teilweise auch die Begrifflichkeit „tot gebrannt“.

Feinkeramiken ¹⁴ | Als Bezeichnung für feinkeramische, poröse Produkte hat sich die Bezeichnung „Tongut“ eingebürgert. Je nach Farbe des Scherbens kann man Tongut weiter in Irdengut und Steingut einteilen.

Irdengut ¹⁵ | Irdengut ist im Vergleich zu Ziegelmassen aus weiter aufgearbeiteten Tonrohmassen hergestellt. Dadurch wird bei der Herstellung und beim Brand ein homogenerer Scherben, also ein einheitlicheres Gefüge, erhalten. Typische Produkte sind etwa Blumentöpfe aus Ton.

Steingut ¹⁶ | Steingut wird aus Kaolinen, weißbrennenden Tonen, Quarz und Flussmitteln hergestellt; manche Versätze enthalten auch Cristobalit oder Schamotte. Je nach Verwendung unterscheidet man auch zwischen Feldspatsteingut und Kalksteingut bzw. gemischtem Steingut. Eine Besonderheit in der Steingutherstellung ist die Brennweise. Der Glühbrand erfolgt vorzugsweise zwischen etwa 1100 und 1250 °C. Der Glasurbrand erfolgt dann bei etwa 100 °C tieferer Temperatur.

Für dichte tonkeramische Erzeugnisse hat sich die Bezeichnung „Tonzeug“ etabliert. Im Gegensatz zu „Tongut“ weisen sie eine geringere Porosität auf. Eine weitere Unterteilung kann wieder auf Basis der Reinheit der Tonmasse erfolgen, die sich in der Färbung des Produktes niederschlägt.

Steinzeug ¹⁷ | Steinzeug ist dabei hell bis leicht farbig. In die Sparte Steinzeug fallen, entsprechend dem feinen, dichten und hellen Scherben, Produkte wie Sanitärwaren und Fliesen.

Porzellan ¹⁸ | Charakteristisch für Porzellan ist der völlig dichte, weiße Scherben. Einige Porzellane weisen bei geringen Materialstärken auch eine gewisse Transparenz auf. Die ersten Porzellane konnten etwa im 5. Jhdt. n. Chr. in China hergestellt werden. In Europa ist die Geschichte des Porzellans wesentlich jünger, da die Herstellung an entsprechende Rezepturen der Tonmasse und vor allem an entsprechende Kaolin-Lagerstätten und eine passende Aufarbeitung gebunden ist.



Abb. 11
Porzellan-Gefäße

Technische Keramiken¹⁹ | Von den zuvor beschriebenen Gebrauchskeramiken sind die „technischen Keramiken“ zu unterscheiden. Technische Keramiken haben vor allem seit etwa 1950 eine vielfältige Entwicklung durchgemacht und durch einige außergewöhnliche Eigenschaften viele spezielle Anwendungen gefunden.



Abb. 12

Verschiedene Beispiele für Technische Keramiken

Eine besondere Bedeutung kommen bei diesen technischen Keramiken den außergewöhnlichen mechanischen Eigenschaften zu. Sie weisen so gut wie immer eine sehr hohe Härte und eine große Temperaturstabilität auf. Daneben finden Spezialkeramiken heute eine sehr breite Anwendung in der Elektronikindustrie, als Isoliermaterial oder für Dielektrika in Kondensatoren und vergleichbaren Anwendungen.

Die technischen Keramiken werden je nach chemischer Zusammensetzung unterteilt: Silikatkeramiken, Oxidkeramiken und Nicht-Oxidkeramiken. Technische Keramiken sind dabei in ihren Eigenschaften auf technische Anwendungen hin optimiert. Sie zeichnen sich dabei durch ihre hohe Reinheit, besonders kleine Toleranzen hinsichtlich Kornverteilung und besondere Brennverfahren aus.²⁰

Durch die speziellen Eigenschaften, den hohen Preis und die aufwendige Herstellung und Bearbeitung werden technische Keramiken jedoch nur für spezielle Anwendungen eingesetzt. Beispiele sind etwa abriebbeständige, kleinmechanische Bauteile wie Zahnräder oder Pumpenkolben. Größere Bauteile, wie etwa Bremscheiben in Sportwagen, sind daher eher die Ausnahme.

Als Baustoff kommt Technischen Keramiken keine Bedeutung zu. In der Folge ist mit dem allgemeinen Begriff „Keramik“, wie umgangssprachlich, die im Alltag häufigere Tonkeramik - sprich Silikat-Keramik (jedoch nicht die technischen Silikatkeramiken) - gemeint - also der Bereich der Gebrauchskeramiken.

12 Vgl. Salmang/Scholze/Telle 2007, S.783.

13 [ebda], S.692.

14 [ebda], S.692

15 [ebda], S.699

16 [ebda], S.699.

17 [ebda], S.703

8 [ebda], S.704

19 Vgl. Hülsenberg 2014, S17.

20 Vgl. Wikipedia: „Technische Keramik“

1.3 Grundstoffe für Keramiken

Rohstoff Ton und Tonmassen ^{21 22} | „Ton“ ist ein Begriff zur Beschreibung einer Gruppe von natürlichen Stoffen mit spezifischen Zusammensetzungen und Eigenschaften, die sich in einem Brennvorgang zu Keramik umwandeln lassen. Ton ist weltweit in großen Mengen verfügbar und besteht vor allem aus Tonmineralen wie dem Kaolinit sowie aus Gesteinsanden wie Quarz und Feldspat. Der Rohstoff bildete sich über verschiedene geologische Zeitalter durch die Zersetzung von Erstarrungsgesteinen, vor allem Granit, zu Feldspat. In Verbindung mit einem chemischen Hydratationsprozess führt der Abbau von Feldspat zu Tonerde, Quarz und weiteren Mineralien und schließlich zur Bildung von Ton. Dieser lässt sich in Primärton und Sedimentton (Sekundärton) unterscheiden. Primärton verbleibt am Ort des ursprünglichen Feldspatvorkommens und ist meist der reinere und seltenere der beiden Typen. Der häufiger anzutreffende Sedimentton ist in der Regel plastischer und bildet die Basis für den Großteil der derzeitigen Grundstoffe zur Herstellung von Gebrauchs- und Keramikteile für Anwendungen in Bauwesen und Architektur.

Durch Einwirkung von Wind, Wasser und glazialen Kräften können Sedimenttone von ihrem Entstehungsort verschoben werden. Verunreinigungen mit weiteren Mineralien und organischen Verbindungen führen zu Eigenschaften des Tons, die sich je nach geologischer Region unterscheiden.



Verschiedene Tonmassen
Eisenoxid-Verunreinigungen führen zu Rotfärbungen (links)

Tonmassen sind aus Ton hergestellte Mischungen mit Zusatzmitteln, sodass daraus formbare Grundmassen entstehen. Durch die Art und Menge der Zusatzstoffe der Tonmasse können die Eigenschaften vielfältig beeinflusst werden.

Für die Herstellung von formbaren keramischen Massen kommen bildsame und unbildsame Rohstoffe zur Anwendung. Zu den bildsamen, d. h. unter Zugabe von Wasser formbaren Rohstoffen, gehören Tone und Kaoline.

Tone und Kaoline bestehen aus μm -feinen sogenannten Tonmineralteilchen. Das sind verschiedene Schichtminerale, deren Schichtpakete aus zwei oder drei Schichten durch relativ schwache Nebervalenzbindungen zusammengehalten werden. Kommen diese Teilchen mit Wasser in Berührung, dringt es zwischen die Schichtpakete. Schon mit geringen Kräften, z. B. auf der Töpferscheibe, können die Schichtpakete gegeneinander verschoben werden, ohne dass ihr Zusammenhang verloren geht. Dadurch lassen sich die Rohstoffe formen. Man spricht von Formgebung. Die Schichtpakete gleiten quasi auf dem zwischengelagerten Wasser. Tone und Kaoline sind in geologischen Zeiten durch Verwitterung von Feldspat und Glimmer

entstanden. Haben sich die Verwitterungsprodukte nicht von der ursprünglichen Lagerstätte entfernt, entsteht der etwas gröberkörnige ($< 10 \mu\text{m}$) Kaolin. Er ist nur wenig oder gar nicht durch die Keramikwerkstoffefärbenden Komponenten verunreinigt. Wurden die Verwitterungsprodukte dagegen vom Ort ihrer Entstehung fortgespült, entstanden meist feinere Teilchen ($< 2 \mu\text{m}$) bei gleichzeitiger Aufnahme von färbenden Komponenten, die Tone. Lehme sind Tone, die einen spürbaren Anteil an Kalk und auch Sand enthalten.

1.4 Formen von Tonmassen

Gießen | Man gießt Erzeugnisse, die wegen ihrer Geometrie, z. B. nicht rotationssymmetrisch, großvolumig und mit einem großen Verhältnis von Höhe zu Durchmesser, gar nicht oder nicht kostengünstig gedreht oder gepresst werden können. Das traditionelle Gießen in Gipsformen erfolgt an automatischen Gießbändern oder Gießtischen. Es schließt die Schritte Zusammensetzung der Formenteile, Eingießen, Scherbenbildung, (bei Hohl-guss) Ausgießen der überschüssigen Masse, weiteres kurzes Ansteifen des Scherbens und Entformen ein. Während der Scherbenbildung saugen Kapillarkräfte das Wasser aus dem Schlicker. Gleichzeitig bewegen sich die Rohstoffteilchen zur Formenwand. Sie lagern sich dort aneinander, d. h. sie koagulieren, wenn das Restwasser einen kritischen Wert unterschreitet.²³

Die getrockneten Rohlinge besitzen meist an den Formenschlussstellen Gießnähte oder Gießgrate, die maschinell (in der Ausnahme noch per Hand) durch Abkratzen oder schonendes Schleifen entfernt werden. Die traditionelle Gießtechnik wird in erster Linie für Tonkeramik angewendet. Aber auch Erzeugnisse aus Al_2O_3 und andere oxidkeramische oder nichtoxidkeramische Produkte werden traditionell gegossen.²⁴

Diese Art des Gießens hat mehrere Nachteile. Dazu gehören die begrenzte Stärke des sich an der Formenwand bildenden Scherbens, die weiterhin notwendige Trocknung auch der Gipsformen und ihre relativ geringe Haltbarkeit, vor allem an den Schließstellen der Formen. Außerdem reichern sich alle zuvor genannten, im Suspensionsmittel gelösten Substanzen, in der Formenwand an. Es bestand somit das Ziel, Gipsformen durch poröse, haltbarere Formen zu ersetzen, an die von außen ein Vakuum angelegt werden kann, um das Suspensionsmittel aus dem Schlicker zu entfernen und die Scherbenbildung zu beschleunigen. Der Schlicker selbst steht unter Druck. Es entstand das Druckgießen. In der Regel nutzt man heute poröse Polyurethanformen.²⁵

Plastische Formgebung: Pressen | Rollern und Pressen sind die heute in der Industrie gebräuchlichen Verfahren zur Herstellung von Massenprodukten. Je nach Feuchtigkeit der Rohmasse kann man eine Unterscheidung in Trockenpressen und Feuchtpressen treffen. In manchen Fällen wird die Festigkeit des Presslings durch organische Zusätze erhöht. Je nach Art der Druckaufbringung unterscheidet man auch noch zwischen uni-axialem Pressen und isostatischem Pressen. Isostatisches Pressen ist mit einem wesentlich höheren maschinellen Aufwand verbunden, führt jedoch zu besseren mechanischen Eigenschaften, vor allem von komplexeren Bauteilen und kommt daher im Bereich der technischen Keramiken zum Einsatz. Zur Druckübertragung beim Isostatischen Pressen werden Flüssigkeiten verwendet, die auf den Rohling in einer Gummi- oder Neoprenhülle von allen Richtungen einwirken.²⁶

Pressen eignet sich besonders für typische Massenwaren. Produkte, die durch maschinelles, hochautomatisiertes Pressen hergestellt werden, sind etwa moderne Dachziegel, Firstziegel und ähnliche Bauteile.

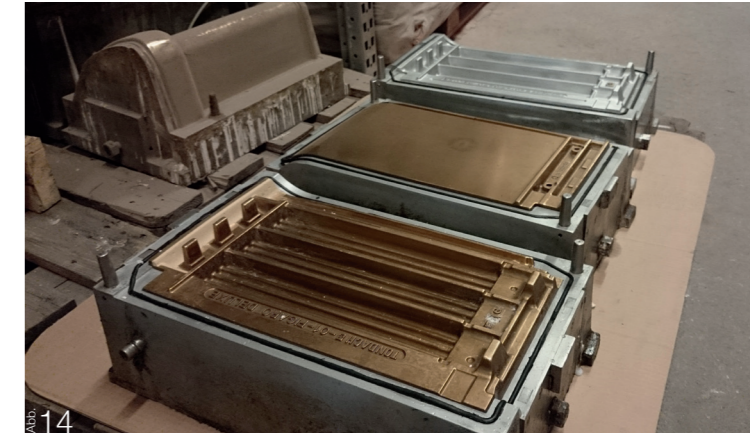


Abb. 14
Messing-Pressform für die industrielle Produktion von Dachziegeln

Plastische Formgebung: Rollern | Rollern ist eine an das Töpfeln und Drehen angelehnte maschinelle Herstellungsmethode rotationssymmetrischer Erzeugnisse wie Teller oder Schalen. In der jüngeren Zeit werden wegen der höheren Effizienz diese Produkte auch zunehmend durch Pressen hergestellt. Man kann jedoch nach wie vor von Rollern als dominierendem Verfahren für die Herstellung von Geschirrwaren sprechen.²⁷

Der für die plastische Formgebung geeignete Zustand wird durch Verringerung des Anteils an Suspensionsmittel im Schlicker erreicht. Das kann auf unterschiedlichem Weg erfolgen. Bei tonkeramischen Massen kommt die rein mechanisch wirkende Filterpresse zum Einsatz. Es entsteht ein Filterkuchen, der an der Oberfläche parallel ausgerichtete, blättchenförmige Tonmineralteilchen, bei gleichzeitig radial ausgerichtetem Feuchtigkeitsgradient, besitzt. Der Filterkuchen ist also nicht homogen. Die Homogenisierung erfolgt in der Vakuumstrangpresse (Abbildung 15). Für dieses Aggregat findet man in der Praxis auch die Bezeichnung Schneckenpresse oder – in Anlehnung an die Kunststoffherstellung – Schneckenextruder.

Die oben liegende Schnecke durchtrennt und bewegt die Filterkuchen und mischt sie knetend noch einmal durch. Dadurch verteilen sich die Rohstoffteilchen und das Wasser relativ homogen. Am Ende der oberen Schnecke wird die Masse durch eine Siebplatte in die Vakuumkammer gepresst. Wie bei einem Fleischwolf entstehen wurstchenförmige Gebilde mit einer großen Oberfläche. Das bedeutet, dass die in der Masse durch die vorangegangenen Prozesse eingeschlossene Luft in der Vakuumkammer, entweichen kann.

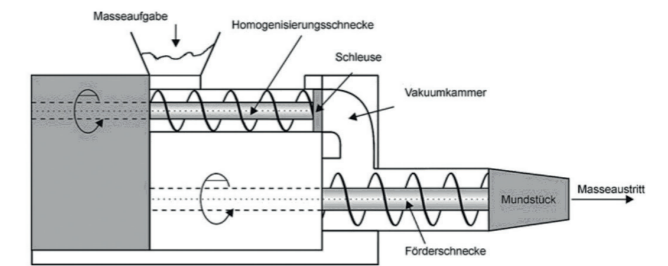


Abb. 15
Schema einer Strangpresse



Abb. 16
Industrielle Ziegelherstellung mittels Extrusion und Schneiden

Das Entlüften muss erfolgen, da andernfalls die Luft - in sogenannter nicht entlüfteter Masse - wie ein unbildsamer Rohstoff wirkt und in unkontrollierbaren Poren im Erzeugnis verbleiben würde. Die entlüftete Masse wird mittels der unteren Schnecke weitertransportiert. Durch die Einschnürung des Massestroms im Mundstück baut sich ein Gegendruck auf, sodass die Masse als geschlossener Strang das Mundstück verlässt.²⁸

Abbildung 18 zeigt, wie sich die Fließgeschwindigkeit durch den Widerstand des Mündstückes ungleichmäßig verändern kann. Durch eine ungeeignete Druck- und Strömungsverteilung am Mundstück kann es zu Extrusionsfehlern kommen. Beispiele für solche Extrusionsfehler sind in Abbildung 17 gezeigt.²⁹



Abb. 17
Typische Extrusionsfehler

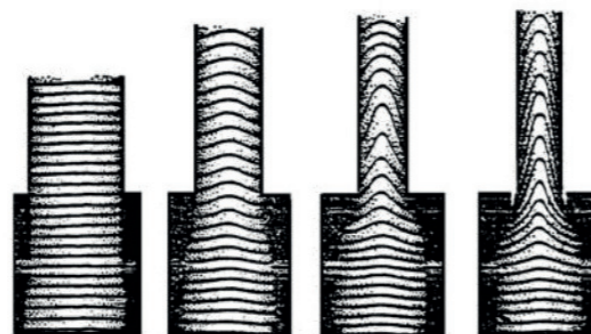


Abb. 18
Fließtextur bei Redzierung des Strangquerschnittes

Trocknen³⁰ | Die hergestellten Teile werden üblicherweise erst luftgetrocknet und gehen dabei erst in den „lederharten“, dann in den „luftgetrockneten“ Zustand über. Eine schonende Trocknung ist einer schnellen Trocknung, bei höherer Temperatur, in fast allen Fällen vorzuziehen, weil eine schnelle Trocknung zu Rissbildung und Ähnlichem führen kann. Nach einigen Tagen, je nach Luftfeuchte und Temperatur, erreicht man den „lederharten“ Zustand. Darunter versteht der Keramiker einen Übergangsbereich, bei dem die Stabilität des Formstückes durch die Teiltrocknung schon stark erhöht ist. Für bestimmte Arbeitsschritte ist dieser Zustand noch gut geeignet. Entgraten oder dekorative Oberflächenbehandlungen, wie Gravieren oder Polieren, sind gut möglich, während Verformungen nur mehr sehr eingeschränkt möglich sind und leicht zum Bruch führen. Ein Zusammenfügen von Teilen ist dann noch durch Aufrauen und Anschlickern machbar, wobei die maximale Belastbarkeit in der Fügung herabgesetzt ist.

Beim Trockenvorgang verflüchtigt sich das Wasser zwischen den Körnern. Dabei kommt es zu einer Verringerung des Volumens. Das Ausmaß, dieser als „Schwinden“ bezeichneten Verkleinerung des Bauteiles, variiert je nach Tonmasse und liegt etwa bei 8 bis 12% insgesamt, wobei etwa die Hälfte davon beim Trocknen auftritt. Zur restlichen Schwindung kommt es während des Brennvorganges. Feinkörnigere Tonmassen weisen eine stärkere Schwindung auf.

Brennen ^{31 32} | Unter Brennen - der modernere, umfassendere technologische Begriff dafür ist „Sintern“ - versteht man einen Vorgang bei dem eine Verdichtung und Verfestigung der Rohlinge durch ein Aneinanderrücken der Rohstoffpartikel stattfindet. Dabei entstehen zwischen ihnen direkte, d. h. stoffschlüssige, Verbindungen. Erst während des Sinterns bildet sich der eigentliche Keramikwerkstoff. Das Sintern kann mit chemischen und kristallografischen Reaktionen verbunden sein. Während des Sinterns kann sich weiterhin eine partielle Schmelzphase bilden. Das Ergebnis des Sinterns wird durch ein definiertes Temperatur-Druck-Atmosphäre-Zeit-Regime eingestellt. Einfluss auf das Sinterergebnis üben weiterhin die Vorverdichtung des Rohlings, die Partikelgrößen und deren Verteilung sowie nicht zuletzt die chemische Zusammensetzung der Rohstoffkörner aus. In diesem Zusammenhang verringert sich auch die Porosität des Werkstückes. Es entsteht der keramische „Scherben“.

Um einen dichten Scherben, wie etwa Klinker, zu erhalten, muss der Anteil an Schmelzphase erhöht werden, entweder durch Steigern der Brenntemperatur auf etwa 1400 °C oder durch Senken der Schmelztemperatur der Tonmischung durch Flussmittel. Das am weitesten verbreitete Flussmittel ist Feldspat. Feldspat ist in vielen Tonmassen bereits natürlich vorhanden bzw. kann er gegebenenfalls zugesetzt werden. Für die Herstellung von Steinzeug mit seiner niedrigen Porosität kommen spezielle Steinzeug-Tone zum Einsatz, die bereits bei 1200 °C relativ dicht versintern.

Die einzelnen Phasen beim Sintern von Keramiken können grob in „offene Porosität“, „geschlossene Porosität“, „Halsbildung“ und „Kornwachstum“ ³³ eingeteilt werden (Abbildung 19 - (3) bis (5)). Speziell bei traditionellen Tonkeramiken erfolgt der Brand jedoch nicht bis zum dichten Scherben. Die Sinterteremperatur und die Sinterzeit wird so gewählt, dass eine gewisse Porosität verbleibt. In Abbildung 19 entspricht dies etwa der dritten Phase.

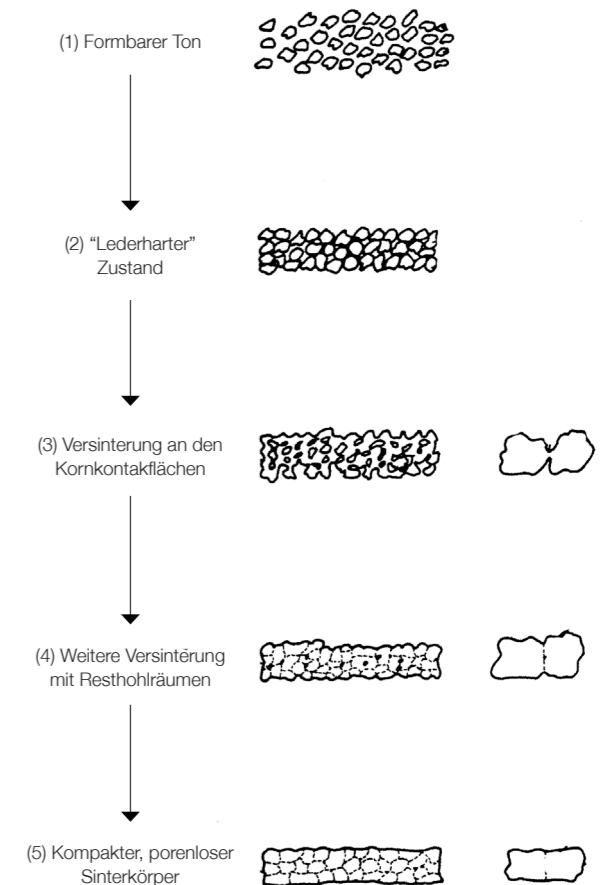


Abb. 19
Phasen beim Trocknen und Sintern

21 Vgl. Hülsenberg 2007, S.28

22 Vgl. Bechthold, S.19

23 Vgl. Hülsenberg 2007, S.39

24 Vgl. [ebda], S.40

25 Vgl. [ebda], S.41

26 Vgl. Salmang/Scholze/Telle 2007, S.621

27 Vgl. [ebda], S.606

28 Vgl. Hülsenberg 2007, S.45

29 Vgl. Salmang/Scholze/Telle 2007, S.608

30 Vgl. Bechthold, S21

31 Vgl. Hülsenberg 2007, S.57.

32 Vgl. Scholze, S.701

33 Vgl. Reichmann 2014

Moderne Technologien bieten viele neue Möglichkeiten in Architektur und Design. Keramikmodule, wie Ziegel, können dadurch in komplexere Anordnungen gebracht werden, als dies eine menschliche Hand je könnte. Roboter erledigen die komplexe und millimetergenaue Platzierung.

Ton eignet sich als Material für viele moderne Formgebungs-Verfahren wie 3D-Druck und verschiedene Bearbeitungsverfahren mittels Roboter mit vielfältigen Werkzeugen.

2

Innovative Keramik-Systeme ... in Architektur und Design

Es soll dargestellt werden, wie moderne, innovative Fertigungssysteme in Design und Architektur den Umgang mit Ton und Ziegel verändern können. Etwa haben Roboter auch in Zusammenhang mit Ton und Keramik ganz neue Möglichkeiten für Architekten und Designer eröffnet. In den vergangenen Jahren sind einige Projekte rund um das Thema Keramik entwickelt und einzelne sogar baulich realisiert worden.

Bei einem der ersten Projekte überhaupt, bei dem Roboter zum Einsatz kamen, wurden klassische Keramikziegel robotisch platziert und so eine Komplexität bei gleichzeitiger Präzision der Anordnung erreicht, wie sie händisch nur schwer herzustellen wäre.

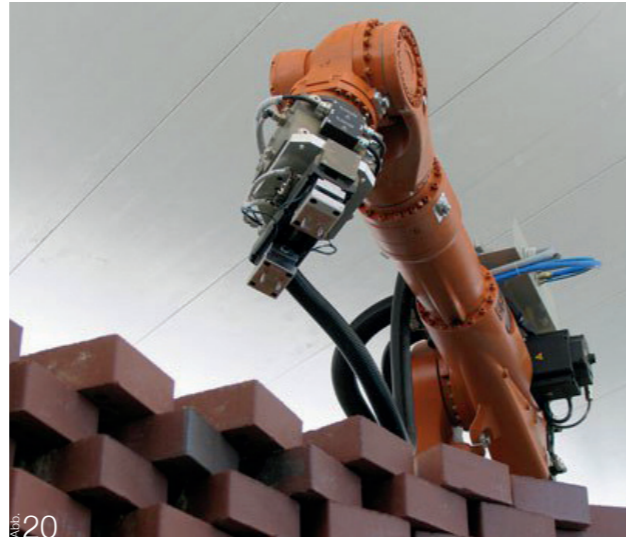
Ob und in welcher Art und Weise solche Verfahren Eingang in die bauliche und architektonische Praxis finden werden, wird sich in den nächsten Jahren zeigen. Wobei bereits ein Markt für Sonderkeramiken in architektonischen Anwendungen existiert und sich Anbieter in diesem Bereich spezialisiert und etabliert haben. Im deutschsprachigen Raum etwa die Firma Möding mit einer umfangreichen Liste an Referenzprojekten.³⁴

Neben der robotischen Platzierung von Keramik-Modulen existieren aktuell einige experimentelle Projekte, die sich mit der robotischen Formgebung von Ton befassen. Entsprechende Tonmassen eignen sich auf Grund ihrer plastischen Formbarkeit, ähnlich wie polymere Thermoplaste für 3D-Druckverfahren, die mit einem Industrie-Roboter-Arm oder einem angepassten 3D-Drucker ausgeführt werden können. Anders als bei Kunststoffen oder Kunstharzen folgt nach der Formgebung bei Ton, wie bei traditionellen Verfahren, natürlich ebenfalls das Trocknen bzw. Brennen.

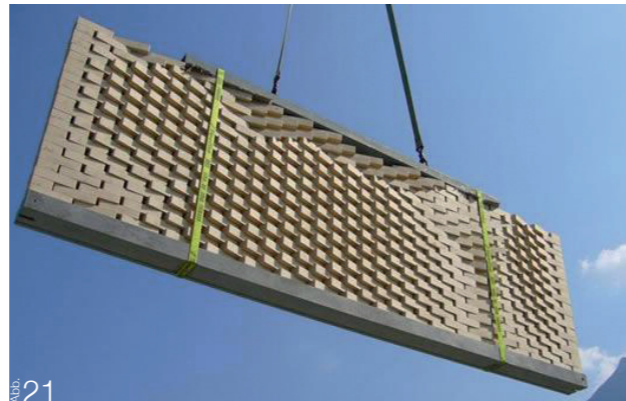
2.1 Platzierung von Elementen

Weingut Gantenbein ^{35 36} | Gramazio+Kohler (ETH Zürich) | Das Konzept zur robotischen Platzierung von Ziegelsteinen wurde vom Duo Fabio Gramazio und Matthias Kohler entwickelt. Sie gründeten 2005 an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich (ETHZ) das erste Roboterlabor für Architektur weltweit.

Eines der ersten Projekte, das an einem Gebäude umgesetzt wurde, war das Weingut Gantenbein bei Fläsch im Bündner Rheintal (Schweiz) von Gramazio Kohler Architects. Aus der Entfernung wirkt das Gebäude wie ein riesiger Korb gefüllt mit Trauben. Aus der Nähe erkennt man jedoch, dass es sich um ein Backsteinmauerwerk handelt, bei dem die einzelnen Ziegel von einem Roboter so geschickt platziert wurden, dass sich aus Schattenwurf, Fuge und Verdrehung (0 bis 17°) der Ziegel, ein Bild in der Fassade ergibt. In der ca. 400 m² großen Fassade wurden ca. 20.000 Ziegel in Betonrahmen angeordnet. Diese Elemente wurden vorgefertigt und dann innerhalb kurzer Zeit auf der Baustelle zusammengesetzt.



20 Ein programmierter Roboter errichtet die Ziegelwand



21 Positionierung eines vorgefertigten Fassadenelementes auf der Baustelle.



22 Weingut Gantenbein von Gramazio+Kohler (ETH Zürich)

2.2 Innovative Formgebung

Building Bytes ³⁷ | Brain Peters (Kent State University, Ohio) | Das Projekt wurde während eines DesignLab-Workshops an der Kent State University entwickelt. Dabei wurden „Non-Standard-Bricks“ parametrisch definiert und mittels eines umgebauten Desktop-3D-Druckers, der üblicherweise mittels FDM (Fused Deposition Modeling) arbeitet, gedruckt. Die erzeugten Module waren dadurch auf eine Größe von 20 x 20 x 20 cm begrenzt. Ein Vergrößern wäre jedoch problemlos möglich und die Elemente eignen sich sowohl als Struktur- als auch Fassadenbauteile und sind sowohl für den Innen- wie auch für den Außenbereich geeignet.

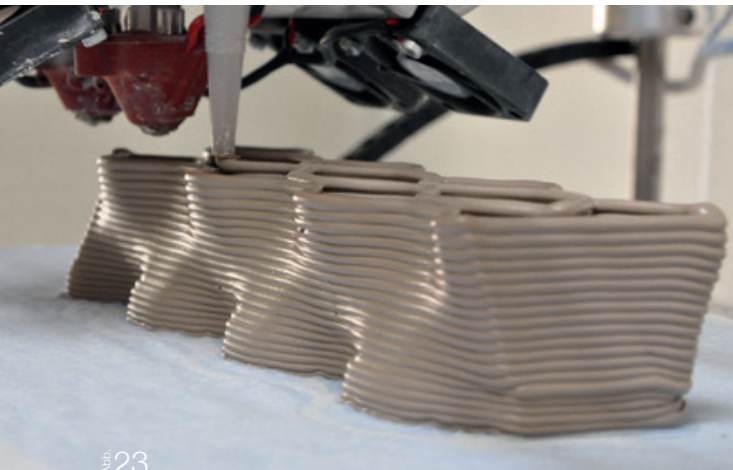


Abb. 23
Werkstück beim 3D-Druck

Die Module können über Grasshopper parametrisch gesteuert werden. Es wurden verschiedene Formen und die Möglichkeit von gewissen Verbindungen erprobt. Das Projekt kombiniert dabei verfügbare Technologien und zeigt neue Möglichkeiten der Produktion, bis hin zu einem angedachten Druck parametrischer Teile direkt auf der Baustelle.

Die flexibel stapelbaren Module

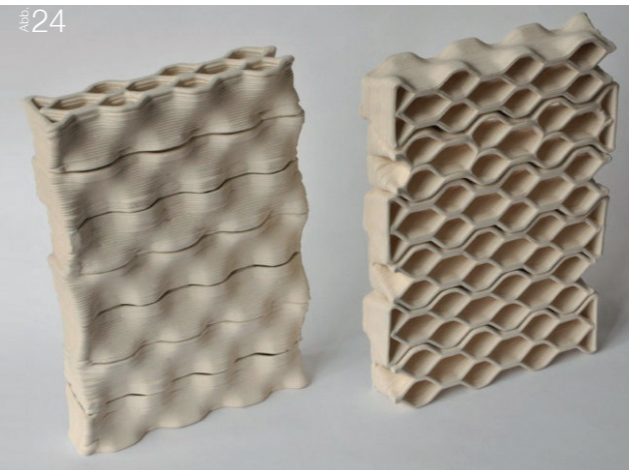


Abb. 24

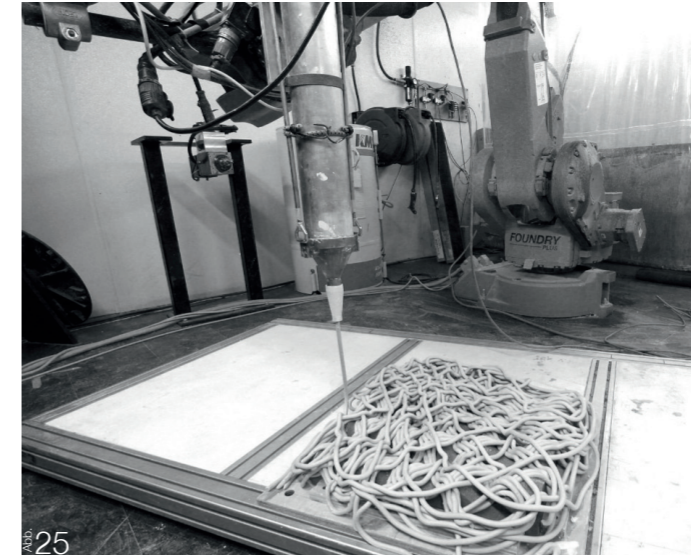


Abb. 25
„Weben“ mittels Roboter-Arm

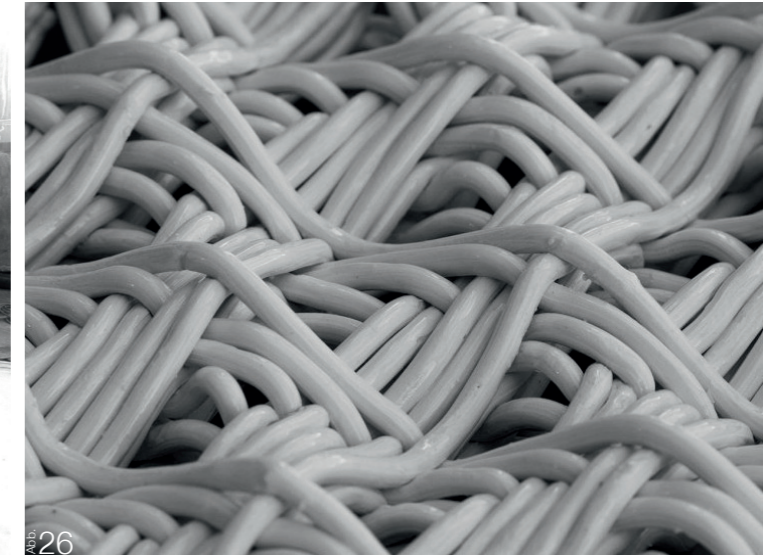


Abb. 26
Detail-Ansicht WovenClay

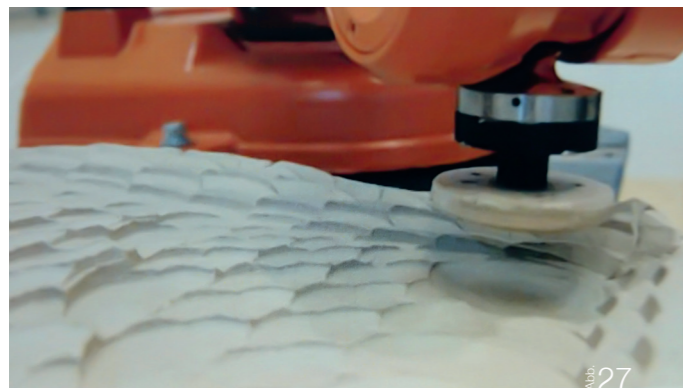
Woven Clay ³⁸ | Jared Friedman, Heamin Kim, Olga Mesa (Harvard GSD) | Das Projekt „Woven Clay“ nutzt einen Industrieroboter (6-Achsen), um einen hochplastischen Ton zu „weben“. Der Tonstrang wird dabei unmittelbar nach dem Extrudieren mit konstanter Geschwindigkeit in einem Pattern bzw. vordefinierten Pfad auf eine gefräste Form gelegt. Kritische Parameter sind dabei, neben der geforderten hohen Plastizität des Tones, eine möglichst geringe Schwindung beim Trocknen.

So entstehen semitransparente Elemente, die sich nach dem Zuschneiden und Brennen, etwa als Fassadenpaneel, eignen würden. Während der Entwicklung wurde der Prozess schon dahingehend überprüft und adaptiert, dass ein Vergrößern und eine automatisierte Produktion möglich wären.

Die freie Formbarkeit von Ton legt die Verwendung eines Roboters für die plastische Verformung nahe. Die Herausforderung liegt hierbei in zwei Hauptpunkten:

- Der Roboter bzw. das Roboterwerkzeug ist in aller Regel wesentlich einfacher aufgebaut als etwa die menschliche Hand und erfordert daher angepasste - in der Regel vereinfachte - Arbeitsschritte und Bearbeitungstechniken.
- Eine plastische Verformung führt zu Materialverdrängung, was wiederum die Form in den Bereichen neben einem Werkzeug mehr oder weniger stark beeinflussen und eine wiederholte Bearbeitung erforderlich machen kann. Im folgenden Projekt wird dem mittels iterativer Prozesse mit einer Feedback-Möglichkeit beigegeben.

Formen mittels iterativer Prozesse | Landstei-



Presswerkzeug verursacht eine sichtbare Ornamentierung

ner Florian (TU Graz, ITE)³⁹ | Als Modelliermasse wurde für das Projekt Plastilin verwendet. Unter geeigneten Bedingungen sollte die Anwendung jedoch auch ohne größere Schwierigkeiten auf Ton übertragbar sein. Es wurde hier mittels eines Roboterarms aus einer Modelliermasse eine als Betonschalung gedachte Form erzeugt. Nach einem Bearbeitungsgang mit einem Presswerkzeug wurde die Oberfläche mittels 3D-Tiefenscan erfasst. Dem Steuerscript wurden so Informationen für den nächsten Bearbeitungsgang zur Verfügung gestellt. Es erfolgt also eine schrittweise Annäherung an die gewünschte Endform durch das Presswerkzeug.

Roboter-Arm beim Formen einer Plastilin-Modelliermasse

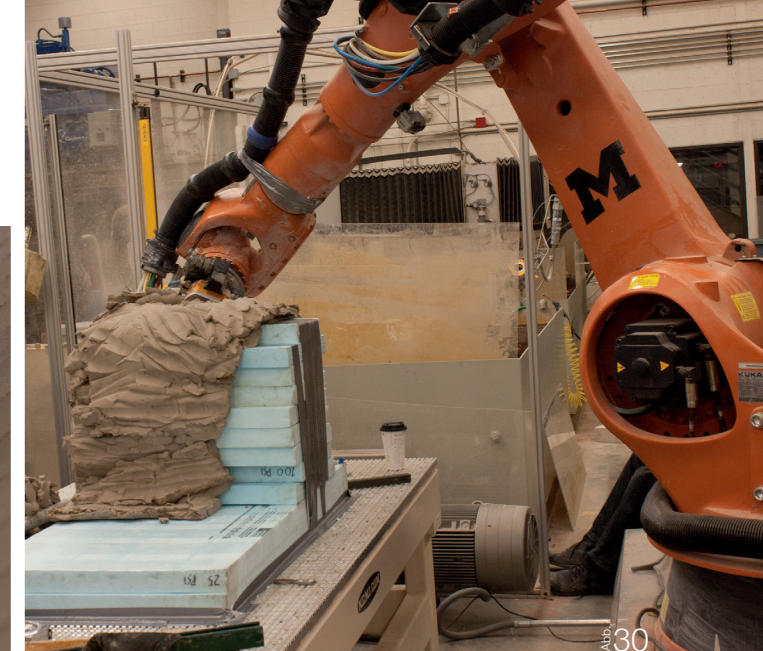


Abtragen mit einem Schneidewerkzeug



Ton lässt sich mit entsprechenden Schneidewerkzeugen sehr gut zerteilen, wobei eine relativ glatte Oberfläche entsteht. Ein großer Vorteil davon ist, dass sich Abschnitte ohne Qualitätseinbußen wiederverwenden lassen, sodass sich sehr materialeffiziente Prozesse entwickeln lassen.

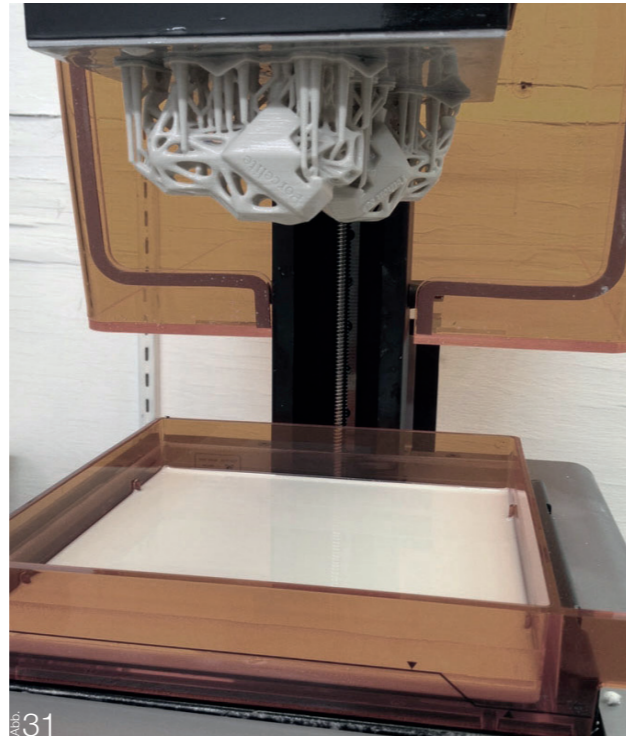
Neben dem beschriebenen Formen kann auch das Schneiden robotisch durchgeführt werden, wie „RoboSculpt“ zeigt.



Polystyrol-Unterbau mit aufgebracht, noch un bearbeiteter Wachston-Masse

RoboSculpt | Mathew Schwartz, Jason Prasad (University of Michigan, COA)⁴⁰ | Bei dem Projekt wurde mit einem Roboterarm, ausgestattet mit einem eigens designten Schneidewerkzeug, eine Tonmasse in Form geschnitten. Das Schneidewerkzeug wurde zuvor mittels Wasserstrahl aus einer Stahlplatte geschnitten und etwas nachbearbeitet. Die Rohform wurde mit PS-Isolierung volumenfölld auf gebaut und dann mit einer Tonschicht überzogen. Dabei wurde ein für Modellierzwecke besser geeigneter Ölton verwendet, der durch Lufttrocknung seine Formbarkeit nicht verändert. Mit dem Roboter wurde dann die Negativform der Ober- und Unterseite, eines Stuhles aus glasfaserverstärktem Harz erstellt.

UV-Stereo-Lithographischer 3D-Druck | Es existieren Harz/Ton-Suspensionen, die einen 3D-Druck mit lithographischen Verfahren ermöglichen. Im Vergleich zu Thermoplast-Druckern sind diese Geräte in der Regel langsamer und im Betrieb wesentlich teurer, ermöglichen jedoch die Herstellung feinerer Strukturen. Die Bauteilgröße ist durch das Tauchbecken jedoch meist sehr begrenzt. Aktuell haben einige kommerzielle Anbieter von 3D-Drucken, wie „Sculpteo“ oder „Shapeways“, Ton bzw. Keramik im Materialprogramm.⁴¹ Ein sehr gut aufbereiteter und feiner Ton hoher Reinheit (der beim Brand dann zu Porzellan führt) wird in einem UV-härtenden Harz suspendiert. Unmittelbar nach dem 3D-Druck ergibt sich bereits ein stabiles Formstück aus dem gehärteten Harz und den eingeschlossenen Tonteilchen. Durch den optionalen Brand unter Luft-Atmosphäre verflüchtigt sich das Harz und die Porzellanteilchen versintern. Unter einer gewissen Schwindung (bei 1230°C 17%) entsteht so ein reines Keramikformstück. Das Verfahren ist zwar zeit- und kostenintensiv, erlaubt jedoch mit überschaubarem Aufwand die Herstellung komplexer Einzelstücke mit hoher Temperaturstabilität.⁴²



31
Stereolithographischer Druck mit UV-Licht-Härtung aus Ton/Harz-Suspension gezogen

Nachteile dieses Verfahrens sind derzeit der vergleichsweise hohe Zeitaufwand durch den langsamen schichtweisen Druck und die relativ hohen Preise des Harzes. Auch ist die Werkstückgröße durch die Größe des Druckers beschränkt.

- 34 Vgl. http://www.moeding.de/cms/upload/infomaterial/Referenzliste_sept-2011.pdf, abgerufen am 09.01.2017
- 35 Vgl. Leybold-Johnson 2014
- 36 Vgl. Gramazio Kohler 2012
- 37 Vgl. Naboni/Paoletti 2014, S.112
- 38 Vgl. Friedman/Kim/Mesa 2014
- 39 Vgl. Landsteiner 2015
- 40 Vgl. Prasad/Schwartz in Rob | Arch 2013
- 41 Vgl. <http://www.shapeways.com/materials/ceramics>, abgerufen am 01.02.2016
- 42 Vgl. <https://www.kickstarter.com/projects/1885710086/porcelite-ceramic-resin-for-sla-dlp-3d-printing?ref=category>, abgerufen am 01.02.2016

Tragwerke sind neben der Gestaltung von Raum- und Gebäudeformen, neben qualitativer Wegführung und Blickorientierung, neben Lichtführung und Lichtqualität sowie neben Farb- und Materialentscheidungen wesentliche Gestaltungselemente in der Architektur und Innenarchitektur.⁴³

In vielen Fällen ist dabei das Tragwerk für wesentliche architektonische Aspekte mitbestimmend oder vielfach, wenn es um das Überspannen von Raum geht, entscheidend.

3

Prinzipien & Referenzen

Bögen, Flächen, Schalen, Gitterschalen

Die Baugeschichte liefert zahlreiche Beispiele für Gebäude, bei denen die Tragwerke einen entscheidenden Anteil an der Erscheinung haben bzw. deren Gestalt sich oftmals nur durch ein Verständnis für das Tragverhalten erklären lässt. Dies umfasst bekannte Bauwerke von Architekten ebenso, wie etwa weit verbreitete Bögen und Gewölbe von qualifizierten Handwerkern.⁴⁴

Beispiele für die Manifestation von Tragwerksaspekten sind etwa die Ausbildung von Säulen und ihren Kapitelen. So mussten in der griechischen Antike Säulen sehr eng gesetzt werden, um die Spannweite der Natursteinblöcke gering zu halten. Kapitele dienten dabei zur Verringerung der Spannweite von Säule zu Säule. In der Romanik wurden dann Rundbögen und anderer einfache Wölbetechniken zum Lastabtrag in dicke Pfeiler und Wände verwendet. Die empirische Weiterentwicklung dieser Elemente zu vielfältigeren Bogenkonstruktionen, wie Spitzbögen oder Schwippbögen, Gurte und Lisenen, führte in der Gotik zu vielen gebauten Anwendungen an sakralen Bauten. Der Einfluss der Konstruktion auf die Gestalt von Gebäuden gilt heute noch in gleicher Art und Weise, wobei jedoch heute ein detailliertes Wissen über Kraftflüsse, Beanspruchungen und Baumaterialien hinzugekommen ist.⁴⁵

Erste theoretisch-empirische Untersuchungen von Kräften in Bögen und Stabtragwerken in qualitativer Hinsicht sind vom Universalgelehrten Leonardo da Vinci überliefert. Erste mathematische Modellbildungen finden sich bei Galileo Galilei, der sich unter anderem auch Fragen der Festigkeitslehre und den Fallgesetzen widmete. Der englische Naturforscher Robert Hook formulierte die lineare Proportionalität von Spannung und Verformung in elastischen Körpern. Bernoulli untersuchte die Spannungsverteilung in Querschnitten.⁴⁶

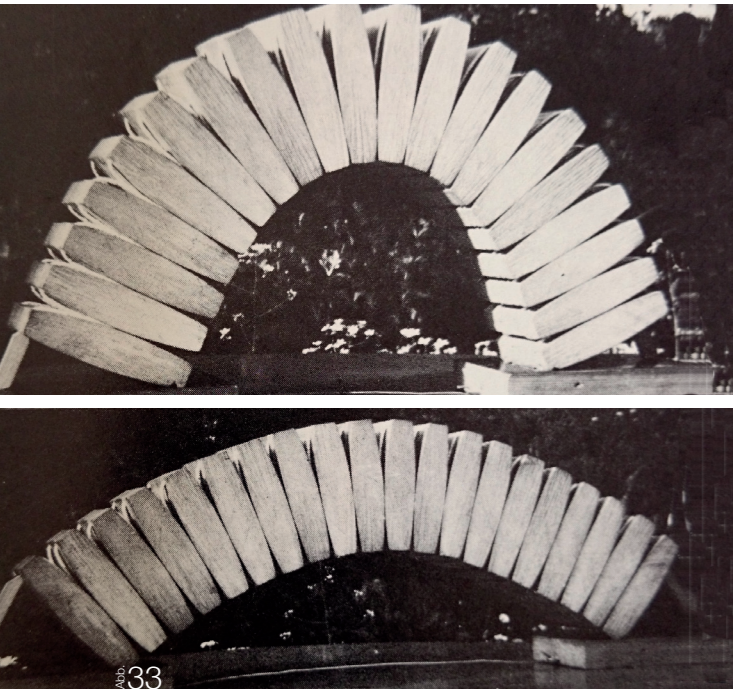


Abb. 33

Element-Bogenkonstruktionen verschiedener Höhen

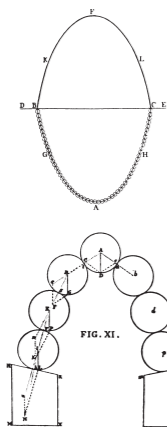


Abb. 32

Ideale Bogenform und Kugelkonstruktion

Ideale Bogenformen⁴⁷ | Die Frage, wie ein Gewölbe geformt sein müsse, in dem außer axialer Druckbeanspruchung keine anderen Schnittkräfte auftreten, wurde theoretisch bereits gegen Ende des 17. Jahrhunderts beantwortet. Die Aufgabe, die Gleichung der Kurve der Kettenlinie zu finden, wurde 1690 von Jakob Bernoulli gestellt. Sie wurde in den folgenden Jahren von seinem Bruder Johann sowie von Leibnitz und Huygens gelöst.

Die veranschaulichte Kernaussage dabei ist, dass die Anordnung der einzelnen Steine so gewählt werden muss, dass selbst bei reibungsfreiem Verhalten diese in ihrer Position verharren. Sie müssen dazu ihr Eigengewicht und das der darüberliegenden Elemente normal zur Berührungsfläche übertragen, sodass daraus keine Kraft resultiert, die zu einem gegenseitigen Abgleiten führen würde.

Diese Erkenntnis fasste 1697 der schottische Mathematiker David Gregory in seinem Werk „Properties of the Catenaria“ zu dem Satz zusammen, dass die theoretisch richtige Bogenachse nach einer umgekehrten Kettenlinie geformt sein müsse. Die Hypothese lässt sich am anschaulichsten darstellen, indem man sich die keilförmigen Wölbsteine (oder Elemente) durch

Kugeln ersetzt denkt, die sich - nach einer Kettenlinie bogenförmig angeordnet - gegenseitig stützen und in labilem Gleichgewicht verharren müssten.

Gegen 1750 verwirft Frezier die theoretische Formgebung der Tonnengewölbe nach einer umgekehrten Kettenlinie als unschön. In der Praxis könne man aber leicht erreichen, dass diese statisch richtige Kurve in der Dicke des Gewölbes verborgen bleibe.

Kettenlinie vs. Parabel⁴⁸ | Joachim Jung wies 1669 nach, dass die Kettenlinie keine Parabel ist. Gottfried Leibniz, Christiaan Huygens und Johann Bernoulli fanden 1690/91 heraus, wie die Kettenkurve zu bilden ist. Die Parabel stellt sich bei einer gleichmäßig über die Spannweite x verteilten Streckenlast ein, z. B. einer Hängebrücke, bei der das Gewicht der Seile gegenüber dem der Fahrbahn vernachlässigt werden kann. Bei der Kettenlinie wirkt jedoch nicht diese projizierte gleichmäßige Streckenlast. Mathematisch gesehen stellt die Kettenlinie eine elementare Grundfunktion,

den Kosinushyperpolikus, dar. Die Abweichung zwischen den beiden Funktionen ist jedoch in vielen Fällen sehr gering, bzw. ist nicht immer von Bedeutung, weil beide Funktionen von der geometrischen Höhe der Konstruktion eingeschlossen werden.

Bildung	einfache Krümmung		doppelte Krümmung	
			synklastisch	antiklastisch
Freiformen				
geometrische Formen				
Rotation				
Translation				
Regelfläche				
strukturoptimierte Flächen				

Abb. 34
Systematik von Flächen

Abbildung 34 zeigt eine systematische Übersicht zu Flächen und zu deren Erzeugung. Der Bereich der Translationsflächen bildet dabei eine ganze Kategorie und erstreckt sich in den Bereich der strukturoptimierten Flächen, wenn man bestimmte Kurven bei der Erzeugung verwendet. Die für die axiale Lastabtragung

notwendige Krümmung lässt sich durch verschiedene geometrische oder physikalische Ansätze ermitteln.

Freiflächen | Freiformen und Freiflächen folgen weder geometrischen noch physikalischen Gesetzmäßigkeiten, lassen sich jedoch durch NURBs (Non Uniform Rational B-Splines) beschreiben.

Geometrische Flächen | Flächen mit einer einfachen geometrischen Definition bieten Vorteile in der Fertigung und Montage, da geometrische Gesetzmäßigkeiten wie definierte Krümmungen, Abwickelbarkeit oder die Möglichkeit einer Eindeckung mit ebenen Vierecken garantiert sind. Geometrische Flächen entstehen durch sogenannte Erzeugende und Leitkurven. Rotationsflächen, Translationsflächen und Regelflächen sind als Beispiele für geometrische Flächen nachfolgend beschrieben.

Rotationsflächen | Eine Rotationsfläche entsteht durch Drehung einer Kurve um eine Drehachse. So lassen sich etwa Kegel oder Kuppeln erzeugen.

Translationsflächen | Eine Translationsfläche entsteht durch Parallelverschiebung einer erzeugenden Kurve entlang einer Leitkurve. Auch die Ebenen der Schar von erzeugenden Kurven müssen dabei parallel zueinander stehen. Einer der großen Vorteile ist dabei, dass sich Translationsflächen durch ebene Vierecke gut annähern lassen, wie dies bei CeramicTranslation der Fall ist. Rotationsflächen, die auf Parabeln basieren, lassen sich auch aus Translationsflächen erzeugen (Abbildung 35). Einfach gekrümmte, strukturoptimierte Flächen, wie die in Abbildung 34 dargestellten, lassen sich erzeugen, einfache synklastische sehr gut annähern.

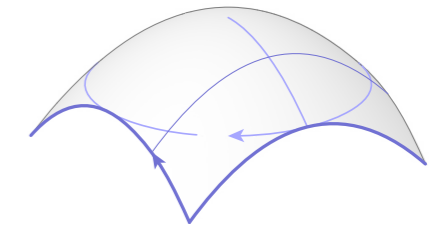


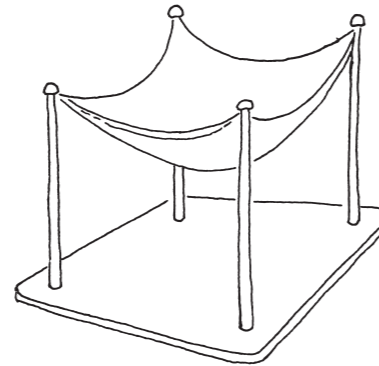
Abb. 35
Parabelbasierte Translationsfläche und Rotationsfläche

Regelflächen | Solche Flächen erhält man durch Bewegung einer erzeugenden Geraden im Raum entlang einer beliebig geformten Kurve. Auch Rotations- oder Translationsflächen können als Regelflächen beschrieben werden. Solche Geometrien lassen häufig sich durch gerade Bauteile realisieren.

Strukturoptimierte Flächen | Äußere Lasten verursachen bei gekrümmten Flächen nicht zwingend reine Druck- oder Zugspannungen. Aus diesem Grund ist das Ziel der Strukturoptimierung von Flächentragwerken meist, Geometrien zu entwickeln, die unter definierten Lasten und Lagerungen zu möglichst reinen Membrankräften und damit zu effizienten Tragsystemen führen. Ein verbreiteter Ansatz für die Optimierung der Geometrien einer druckbeanspruchten Schale ist die Umkehrform und wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

Konstruktionen, die durch ihre Form, insbesondere ihre doppelte Krümmung, hervorragende mechanische Eigenschaften besitzen, spielten in der Vergangenheit - und auch der Gegenwart - eine herausragende Rolle.

Shell structures are present in many technical applications: Undoubtedly they are the most widely used structural components in modern technology. [...] From Roman Cupolas to the Vaults of medieval churches, cloisters and town-halls as well as from the great domes of the Renaissance and Baroque times, all historic shell structures, leads a straight way to the variety of shell constructions of modern architecture, like large-span shell roofs of grandstands, exhibition halls, industrial manufacturing facilities or light-weight shells covering sports arenas.⁵⁰



36

Hängemodell mit einem Tuch bzw. Netz

Die Geometrie aller Schalenstrukturen ist von der sogenannten Schlankkeitshypothese dominiert. Sie besagt, dass das Verhältnis von maximaler Schalendicke zur typischen strukturellen Größe minimal ist. Die mathematische, analytische Beschreibung von Schalen als Tragwerke kann jedoch überaus komplex sein. In der Vergangenheit wurden deshalb auch für flächige Elemente Näherungsverfahren entwickelt.⁵¹

Ideale Schalen- und Gewölbeformen⁵² | Das Konzept der umgekehrten Kettenlinie als ideale Stützlinie lässt sich nicht ohne Weiteres auf ein flächiges System übertragen. Die Lastableitung kann in einer solchen Konstruktion über viele verschiedene Pfade erfolgen, was eine Beurteilung erschwert. Praktisch lässt sich die Methode mit der hängenden Kette jedoch übertragen.

„Am auffälligsten tritt das Prinzip der Stützlinie als umgekehrter Kettenlinie in den Bauten des spanischen Architekten Antonio Gaudí (1852-1926) in Erscheinung. Gaudí suchte Bauformen, die frei von Momenten und Schubkräften waren. Außerdem aber erregte auch der formale Aspekt derartiger Bauformen - die Ablesbarkeit des Kräfteverlaufs im Baus - sein Interesse.

Gaudí ging - in dieser Konsequenz wohl als erster - bei seinen Entwürfen von Versuchen an Hängemodellen aus Bindfäden aus. Er fand heraus, dass die Parabel der Stützlinie, die vergleichsweise schwierig zu bestimmen ist, am ehesten entsprach. Bereits in frühen Bauten verwendete er deshalb parabelförmige Bögen.“⁵³

Nach den Hängemodellen von Gaudí verwendete Frei Otto ähnliche Methoden, um effiziente Formen für Ziegelgewölbe zu finden.

„1946 bis 1949 führte Otto modelltechnische Hängerversuche mit Geweben durch. Beabsichtigt war, Formen für Überwölbungen zu finden, die aus Trümmerziegeln einfach und billig herzustellen waren. Zu diesem Zweck wurden mit flüssigem Gips getränkte Tücher so aufgehängt, dass durch ihr Eigengewicht ein Durchhang sich bildete, der einer Kettenlinie annähernd entsprach.“⁵⁴

43 Kuff 2001, S. 11

44 Vgl. Kuff 2001, S. 11

45 Vgl. [ebda], S. 12

46 Vgl. [ebda], S. 17

47 Vgl. Hasegawa/Hennicke 1974, S. 19

48 Vgl. Wikipedia: Kettenlinie (Mathematik)

49 Vgl. Lienhard/Knippers/Cremers/Gabler 2010, S. 137

50 Vgl. Hart 1965

51 Vgl. Basar/Krätzig 2000, S. 1

52 Vgl. Adriaenssens 2014, S. 11

53 Vgl. Hasegawa/Hennicke 1974, S. 20

54 Vgl. [ebda], S. 22

Gitterschalen

Gitterschalen⁵⁵ | (engl. grid shell oder lattice shell) oder netzartige Schalen (engl. reticulated shell) sind grundsätzlich Schalen, bei denen die Einzelteile ein relativ feines Gitter bilden. Diese Einzelteile fallen in Relation zur Gesamtstruktur klein aus.

Einteilen lassen sich Gitterschalen in „vorbeanspruchte“ (engl. strained) und „nicht vorbeanspruchte“ (engl. unstrained) Konstruktionen. Bei vorbeanspruchten Konstruktionen werden die Einzelelemente verformt, sodass bereits im sonst unbelasteten Grundzustand eine Spannung im Material herrscht. Nicht vorbeanspruchte Schalen hingegen werden so gefertigt, dass sie im Grundzustand noch keine wesentliche innere Spannung aufweisen und entsprechend ungespannt vorgefertigt werden.

Materialien | Materialien aus denen sich Gitterschalen herstellen lassen, können ganz unterschiedlich sein. Gitterschalen aus Keramik sind jedoch nicht wirklich bekannt. CeramicTranslation stellt somit eine echte Innovation dar. Gemäß obiger Einteilung stellt das System eine nicht vorgespannte Gitterschale aus einer Keramik/Kunststoff-Kombination dar.

Die Wahl des Materials hängt dabei sehr stark von der Konstruktionsart ab. Je nach dem, ob die Gitterschale gespannt oder nicht gespannt ist. Dabei wurden Gitterschalen bereits aus Aluminium, Beton, Stahl, Holz, Bambus und Verbundmaterialien hergestellt. Jedes Material hat dabei seine Vor- und Nachteile hinsichtlich Belastbarkeit, Bearbeitbarkeit, Festigkeit, Kosten, Gewicht und Haltbarkeit. Die Art der Fügung hat ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf die Materialwahl.⁵⁶

Gitterschalen stellen in gewisser Weise eine Vereinfachung von Schalen dar. Baulich sind sie je nach dem verwendeten Material einzelne stabähnliche Elemente wesentlich einfacher herstellbar und ffügbar als solche aus Flächen. Die großen Vorteile, die Schalen aufweisen, nämlich ihre große Stabilität durch die entsprechende doppelte Krümmung, kann dabei bei geeigneter Wahl der Größe der Elemente sehr gut beibehalten werden. Gitterschalen kommen also hinsichtlich der Tragfähigkeit Schalentragwerken sehr nahe, sind jedoch in den meisten Fällen wesentlich einfacher herzustellen. Häufig bestehen sie aus gut handhabbaren linearen Einzelelementen, die sich in entsprechenden Knoten gut fügen lassen.⁵⁷

In Abbildung 37 ist die Konstruktion des Daches des British Museum sichtbar. Die Konstruktion besteht aus in den Knoten verschweißten stabförmigen Profilen. Die Gitterschale ist dabei ohne Vorspannung gefertigt.⁵⁸



Gitter und Knoten des British Museum
37

3.5 Schalendach St. Antony-Hütte Oberhausen

Entwurf: AFS Ahlbrecht - Felix - Scheidt Generalplaner GmbH | Statik: Schülke- Wiesmann Ingenieurbüro ⁵⁹ | Die archäologische Ausgrabungsstätte der St. Antony Hütte in Oberhausen wurde zum Schutz vor Witterungseinflüssen mit einem selbsttragenden Schalendach aus verzinktem Stahlblech überdacht. Die Materialwahl beruht auf der Tatsache, dass dort lange Zeit hochwertige Stähle erzeugt wurden. Gleichzeitig erinnert die minimalistische Schalenform des Daches an temporären Wetterschutz aus Zelttuch, das über archäologischen Fundstätten befestigt wird und das sich durch Windsog nach oben wölbt. Die 73 Tonnen schwere Schalenkonstruktion zeigt den Stand der Technik mit dem Werkstoff Stahl.

Die ca. 1000 m² große Dachschaale liegt frei über der Ausgrabung und schützt die archäologischen Funde. Geometrisch liegt der Konstruktion eine Translationschale zugrunde. Das Schalendach besteht aus verzinktem Stahl und ruht auf vier Fußpunkten, die ein Rechteck von etwa 17,5 m x 41,5 m Größe beschreiben. Die Schalenkonstruktion besteht aus 323 Blechtafeln von fünf Millimeter Dicke, die sich schindelartig überlappen. Die gelaserten Blechtafeln sind zur Versteifung an jeweils einer Längs- und Querseite um etwa 15 Zentimeter auf- bzw. abgekantet. Entlang der Blechtafelränder und im Bereich der Überlappungen der Kanten sind die Tafeln miteinander verschraubt.

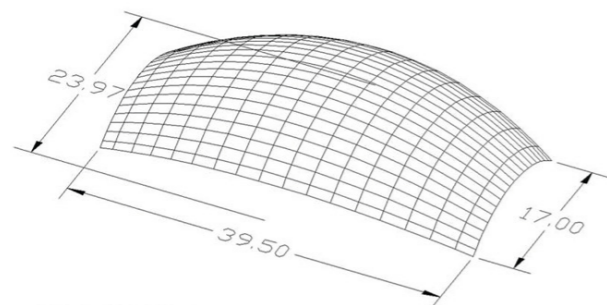


Abb. 38

Translationsnetz der Stahlschale mit Abmessungen



Abb. 39

Untersicht der Translationsschale (St. Antony - Überdachung Industriearcheologische Ausgrabungsstätte)



Abb. 40

St. Antony - Beleuchtung der Schale und der Ausgrabungen

3.6 Joe & Rika Mansueto Library

Statik: Engelmann + Peters | Architekten: Helmut Jahn ⁶⁰ | Die Joe & Rika Mansueto Library befindet sich am Campus der University of Chicago. Das Gebäude wurde als Erweiterung der Regenstein Bibliothek für 25 Mio. US-Dollar geplant, entwickelt und gebaut. Das 2011 fertiggestellte Bauwerk ist vor allem für seinen gläsernen Lesesaal in Kuppelform bekannt, der 160 Leseplätze bietet.

Die Bibliothek besteht aus einem unterirdischen Teil, der moderne automatisierte Regalsysteme für 3,5 Mio. Werke beherbergt, sowie die öffentlichen Bereiche unter der Stahl-/Glas-Kuppel mit ovaler Grundfläche. Die Kuppel ist eine der wenigen gebauten Anwendungen des Translations-Prinzips. Dadurch wird auch eine Eindeckung mit viereckigen, planaren Glaspanelen möglich.

Joe and Rika Mansueto Library, Chicago University

Abb. 41



Abb. 42

Innenraum der Mansueto Library

Der moderne Lesesaal ist von einer Stahlkonstruktion in Form einer Translationschale überspannt. Im oberen Bereich sind die Glaspaneele stark abgedunkelt, um die gewünschte Lichtsituation herzustellen und ein Aufheizen durch die Sonneneinstrahlung zu verhindern.

55 Vgl. Adriaenssens 2015, S. 101

56 Adriaenssens 2015, S. 97

57 Vgl. Adriaenssens 2015, S. 241

58 Vgl. [ebda], S. 241

59 Vgl. <http://www.baukunst-nrw.de/objekte/Schalendach-St-Antony-Huette-Oberhausen--2023.htm>, abgerufen am 02.11.2016

60 Vgl. Lushington/Rudorf/Wong 2016, S. 244

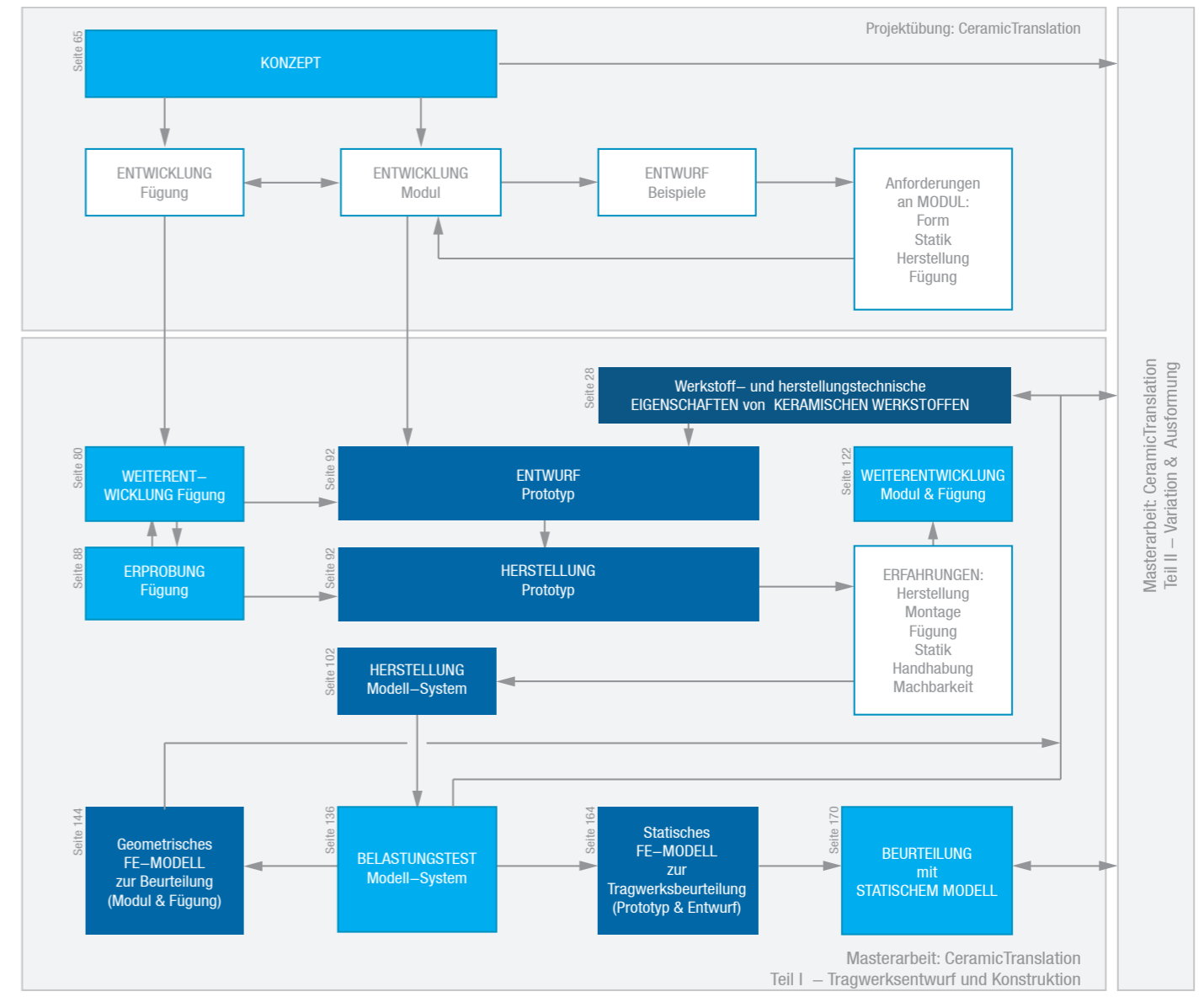
4

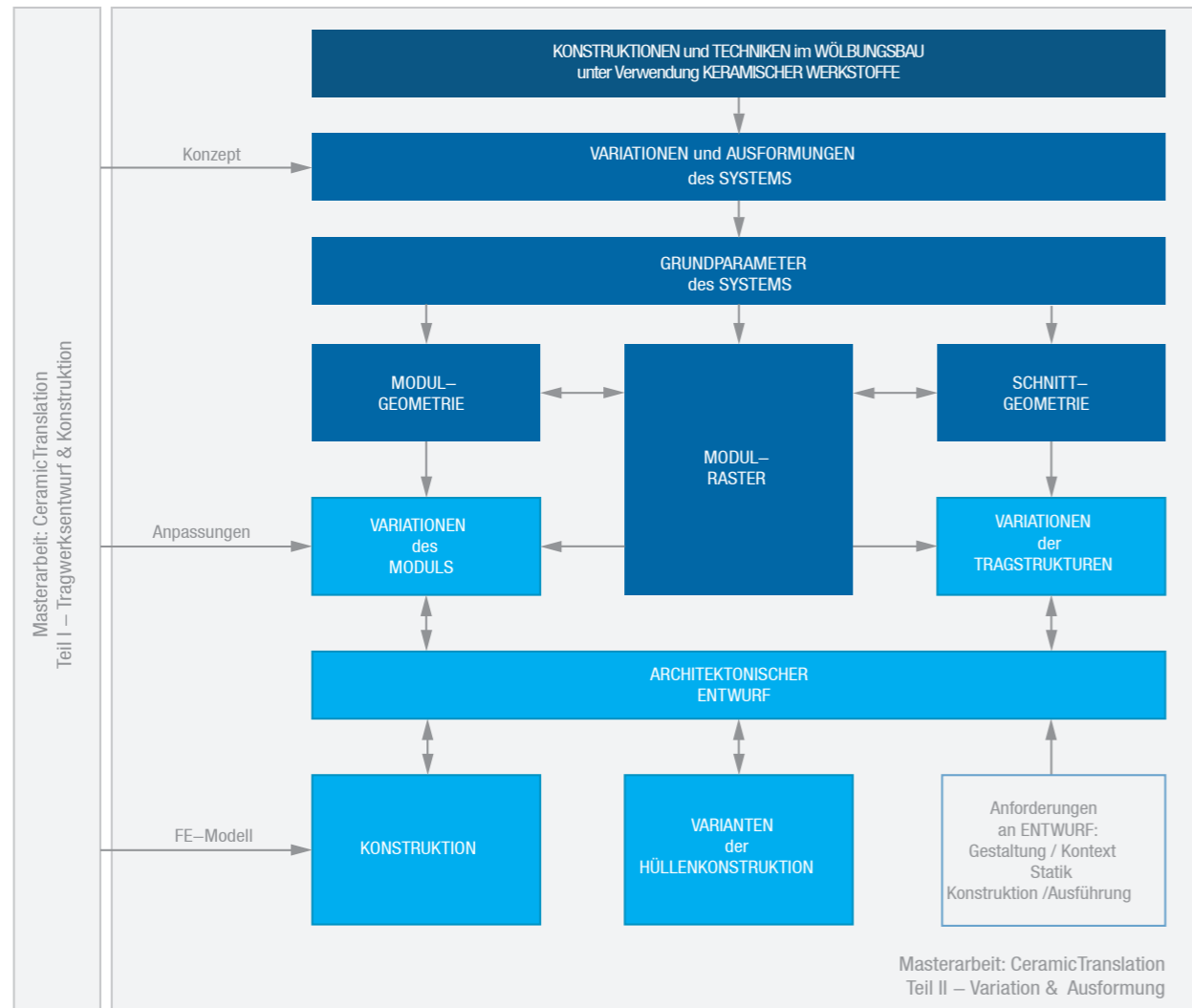
Die Art und Weise wie Keramik als Baumaterial verwendet wird, hat sich über viele Jahrhunderte kaum verändert. Lange Zeit hat man dabei am etablierten - grundsätzlich einfachen - Ziegel festgehalten und nach Möglichkeiten gesucht, anspruchsvollere Konstruktionen zu realisieren, ohne die klassischen Modulformate aufgeben zu müssen. Auch modernere Konstruktions-systeme, wie Ziegeldecken, stellen hier nur vergleichsweise kleine Schritte dar, nutzen jedoch die Stärken, die Keramikbauteile in Kombination mit anderen Baumaterialen zur Geltung bringen können.

Um hier neue Möglichkeiten zu erschließen, erscheint es angebracht, dieses Baumaterial neu zu denken. Aus Sicht der klassischen Ziegelkonstruktionen geht CeramicTranslation hier einen entscheidenden Schritt weiter, indem es den Herstellungsprozess versteht und nutzbringend zu integrieren versucht. Die formalen Möglichkeiten zur Herstellung architektonisch anspruchsvoller Lösungen aus traditionellem Ausgangsmaterial können so erweitert werden.

CeramicTranslation

Ein modulares, keramisches Bausystem





CeramicTranslation ist ein modulares, keramisches Bausystem, das eine vergleichsweise einfache Möglichkeit bietet, um aus Ton doppelt gekrümmte Keramikgitterstrukturen zu erzeugen. Die Herstellungsschritte sind dabei an die heute industriell verwendeten Verfahren zur Produktion von Hochlochziegeln angelehnt. Sowohl das Extrudieren und auch das Schneiden sind damit recht effizient und in hohem Maße automatisierbar.

In der Herstellung der Einzelteile geht CeramicTranslation einen kleinen Schritt in Richtung Mass-Customisation - durch einfache Adaption der Bearbeitungsschritte (Extrusionsform und dem Schneiden) erreicht man damit ein Maß an formalen Möglichkeiten.

Neben geometrischen und statischen Betrachtungen der Keramikteile, spielt dabei in besonderem Maße auch die Integration von Möglichkeiten, die neue Materialentwicklungen bieten, eine Rolle. Neben gut und präzise verarbeitbaren Kunststoffkomponenten kommen auch Zweikomponenten-Injektionsmörtel zum Einsatz, die eine schnelle und effektive Endmontage ermöglichen.

Translationsflächen | Translationsflächen können relativ einfach erzeugt werden, indem man eine Linie oder eine Kurve entlang einer dazu um 90° gedrehten zweiten Kurve verschiebt (Translation), wobei dieser Winkel auch variiert werden kann (siehe Masterarbeit „CeramicTranslation - Teil II - Variation und Ausformung“). Entsprechend dieser Vorgehensweise bezeichnet man die eine Kurve als „Erzeugende“ (Abbildung 43(a)) und die zweite als „Leitkurve“ (b). Abhängig von den gewählten Kurven - etwa bei Bögen - weist die Fläche jedoch in beide Richtungen an jedem Punkt Krümmungen auf, was nichtlineare Schnittvorgänge notwendig machen würde.

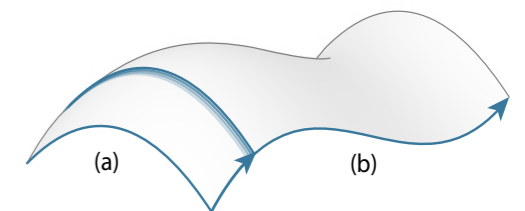
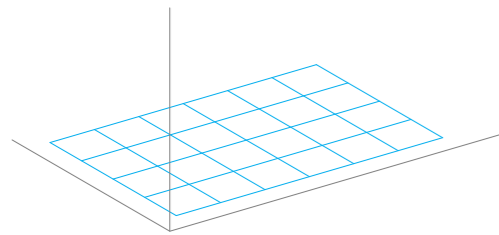
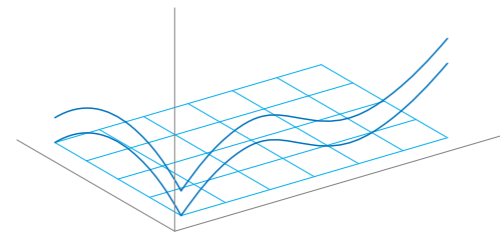


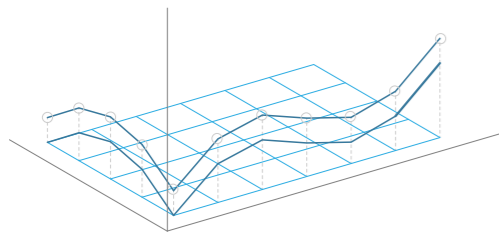
Abb. 43 Erzeugung einer Translationsfläche



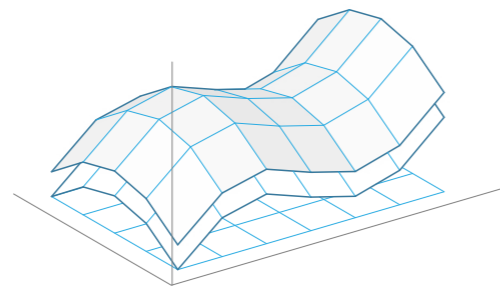
1 Raster erzeugen



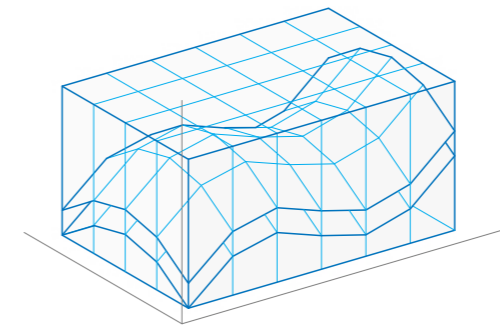
2 Randkurven erzeugen



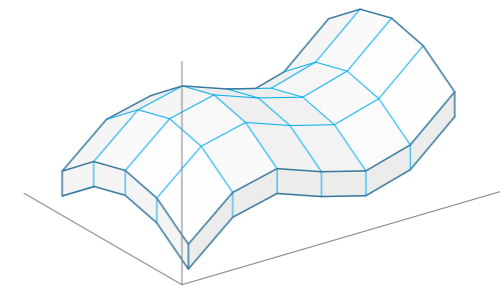
3 Randkurven entsprechend Raster linearisieren



4 obere und untere Translationsfläche erzeugen



5 Modulraster extrudieren



6 Modulraster mit Translationsflächen schneiden

Approximierte Translationsfläche | Der Schwierigkeit von Krümmungen innerhalb eines Moduls wird dadurch begegnet, dass die Erzeugende und die Leitkurve vor der Translation durch Linien angenähert werden. Der projizierte Abstand der Linienendpunkte leitet sich von einem immer gleichen Abstand in X- bzw. Y-Richtung ab. In die XY-Ebene projiziert ergibt das einen regelmäßigen, quadratischen Raster. Die Rasterweite entspricht der Modulgröße und dem einzukalkulierenden Zwischenraum. Nach dem Verschieben der Erzeugenden-Polylinie und dem Vervielfältigen der Leit-Polylinie erhält man eine approximierte Translationsfläche. Die Fläche besteht aus einzelnen Vierecken, deren Eckpunkte, bedingt durch das verwendete Verfahren, immer alle in einer Ebene liegen - also planar sind.

Obere und untere Begrenzungsfläche | Je eine solche linearisierte Translationsfläche begrenzen die Keramikstruktur oben und unten. Eine detailliertere Darstellung der Linearisierung bzw. wie diese geometrisch erfolgen kann, wird in Abbildung 80 gezeigt. Die Abstände der Flächen in Z-Richtung entsprechen der Modulhöhe. Aus statisch oder aus anderen Gründen ist es in vielen Fällen vorteilhafter, wenn die obere und untere Begrenzungsfläche nicht gleich sind. Durch leicht abweichende Kurvenformen kann etwa erreicht werden, dass sich das erzeugte, gekrümmte Keramik-Gitter in weniger stark beanspruchten Bereichen verjüngt und in statisch stärker beanspruchten Teilen, etwa zu den Rändern und Ecken hin, verstärkt.

Darüber hinaus erlaubt dies neue formale Möglichkeiten für das Tragsystem, die neue interessante Anwendungen ermöglichen (siehe „CeramicTranslation - Teil II - Variation und Ausformung“).

Modulgeometrie | Der einzelne Baustein des Systems leitet sich von einer quadratischen Grundform ab und bilden eine Rahmen. In den Ecken sind Öffnungen ausgebildet, die über einen komplementär geformten Knoten die benachbarten Module miteinander verbinden. Die Materialstärke rund um die Ecken sind dabei erhöht, um punktuell erhöhte Belastungen aufnehmen zu können. Durch das Vergießen der Fuge zwischen Knoten und Modul können solche Punktbelastungen zwar stark minimiert werden, eine gewisse Toleranz gegenüber Ungenauigkeiten bei der Knotenmontage u.ä. ist hier zweckmäßig.

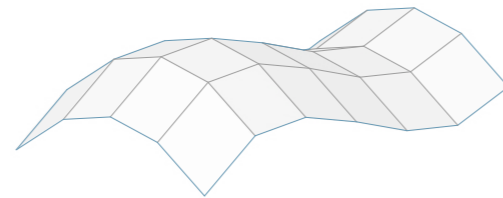


Abb. 46
Linearisiert Translationsfläche zur Begrenzung

Die Seiten des Moduls sind alternierend leicht nach innen bzw. außen gewinkelt. Dies ermöglicht bei der Montage eine gute Unterscheidbarkeit der Modulseiten und erleichtert das Platzieren. Diese Ausformung ist optional und muss nicht zwangsläufig Bestandteil des Querschnitts sein. Die statischen Nachteile werden durch die Ausformung jedoch gering gehalten. Die Öffnung in der Modulmitte ist ebenfalls so ausgeformt beeinflusst stark die Erscheinung und den Lichteinfall.

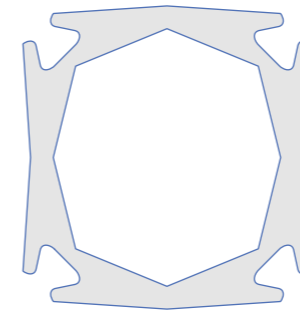


Abb. 48
CeramicTranslation-Querschnitt des Prototypen M1:5

Man verzichtet durch die Öffnung zwar etwas auf die Ausbildung einer vollständigen Schalentragwirkung, erreicht jedoch eine starke Gewichtsreduktion. Der Tatsache, dass die Kraftweiterleitung ohnehin nahezu vollständig über die Knotenelemente erfolgt, wird dadurch Rechnung getragen. Die Kräfte werden also über die Modulseiten von Knoten zu Knoten übertragen.

Modulvarianten werden in „CeramicTranslation - Teil II - Variation und Ausformung“ weiter behandelt.

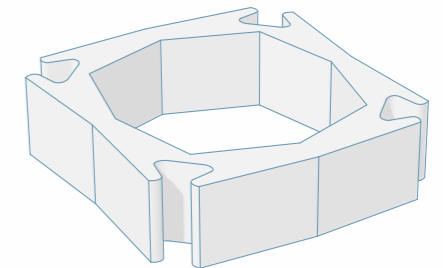


Abb. 47
CeramicTranslation-Modul

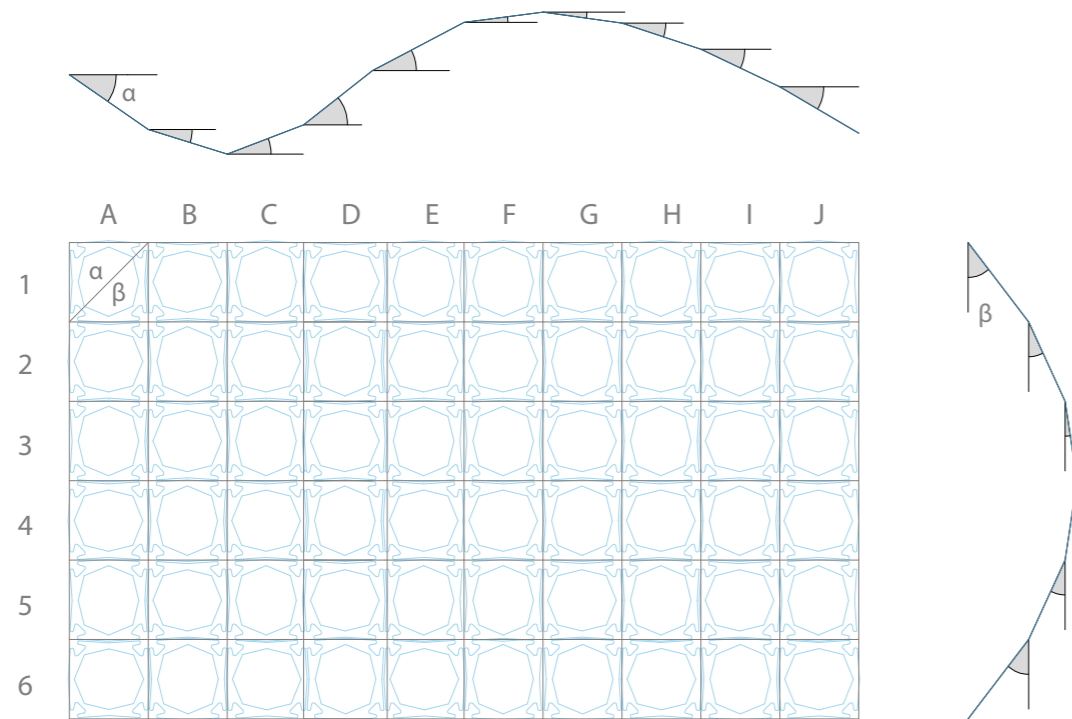


Abb. 49
Modul-Raster und Schnittwinkel-Ermittlung
aus den Randkurven

Modulraster | Eine gedachte Ausgangsform für die zu erzeugende Geometrie, etwa eine doppelt gekrümmte Fläche, kann eine zweidimensionale, rasterförmige Anordnung von Modulen sein. Diese virtuelle Modulanzordnung ergibt, verschnitten mit der oberen und unteren Begrenzungsfläche, die tatsächlichen Module mit ihren

planaren, eventuell geneigten Ober- und Unterseiten. Einige gestalterische Möglichkeiten ergeben sich durch Abwandlung des quadratischen Rasters zu einer Raute oder einem Rechteck - siehe dazu „Teil II - Variation und Ausformung“.

Modulzuordnung | Der Modulraster eignet sich auch gut für die eindeutigen Zuordnung der produzierten Module anhand ein schachbrettähnliches Benennungssystem. Es erfolgt also eine durchgehende Benennung der „Spalten“ mit Buchstaben und eine durchgehende Nummerierung der „Zeilen“. Jede Rasterposition bzw. jedes Modul kann so mit einer Buchstaben-/Nummernkombination eindeutig identifiziert werden (z.B. „C7“). Diese Festlegung erlaubt auch eine eindeutige Unterscheidbarkeit der beiden Winkel, die den planaren Schnitt definieren. Einer wird dabei in Buchstabenrichtung gemessen, der andere in Zahlenrichtung.

Modulparameter | Zur vollständigen Charakterisierung eines Moduls innerhalb des Systems sind die beiden Winkel (α und β) der Schnittebene sowie die Angabe der Höhe erforderlich, die sich aus dem Abstand der oberen und unteren Translationsfläche ergibt.

Die Winkel lassen sich entweder aus einem 3D-Modell, oder einfacher aus den beiden linearisierten Randkurven, wie in Abbildung 49 gezeigt, ermitteln. Bei unterschiedlichen oberen und unteren Begrenzungsflächen ist das natürlich in gleicher Weise für beide möglich.

Da die Modulhöhe bei unterschiedlichen Kurven für die untere und obere Begrenzungsfläche einen Verlauf aufweist, müssen für das Messen ebenfalls Konventionen eingeführt werden. Eine zweckmäßige Variante ist, dass die Höhe immer an einer definierten Position gemessen wird, in einem Schema wie in Abbildung 49 etwa in der linken oberen Ecke eines jeden Moduls.

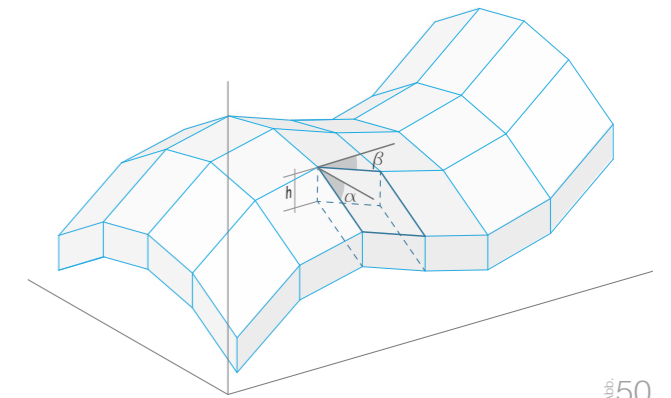


Abb. 50
Schnittwinkel der Module

Extrusion | Die Modulform bzw. der Modulquerschnitt erlaubt die effiziente Herstellung mittels Strangpressen. Die Tonmasse wird dabei unter hohem Druck durch eine entsprechende Stahlmatrize gepresst, nimmt dadurch beim Durchtritt ihre Form ein und bleibt bei sorgsamer Handhabung der Formstücke auch erhalten. Um eine weitere unerwünschte Verformung zu verhindern, muss gegebenenfalls mit entsprechenden Stützkonstruktionen gearbeitet werden. Eine Lagerung bzw. die Trocknung sollte dann möglichst stehend erfolgen, damit keine Verzerrung des Querschnitts erfolgt. Eine solche Verformung, die eine Veränderung der Abstände der Knotenpunkte bewirken würde, wäre bei der Montage problematisch. Die Verformungen müssen während des gesamten Herstellungsprozesses so gering gehalten werden, dass sie durch die Toleranzfuge zwischen Keramik und Verbindern ausgeglichen werden können.

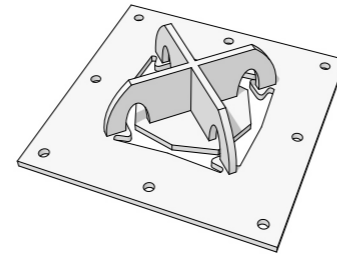


Abb. 51
3D-Modell der Extrusions-Matrize

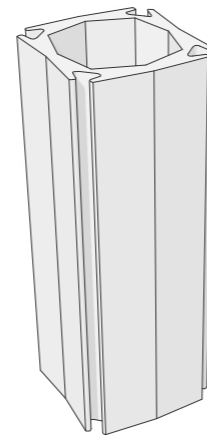


Abb. 52
CeramicTranslation Extrusions-Strang

Schneiden | Der Schneidevorgang der Module aus dem Extrusionsstrang erfolgt gemäß den individuellen Modulparametern (oberer Winkel, unterer Winkel, Modulhöhe). Ab diesem Arbeitsschritt ist eine eindeutige Identifikation des herausgeschnittenen Moduls (siehe Modulzuordnung) wichtig.

Der Schneidevorgang erfolgt direkt nach der Extrusion oder nach einer Teiltrocknung. Systemimmanent handelt es sich bei jedem Modulschnitt um einen planaren Schnitt, sodass sich übliche Drahtschneidevorrichtungen gut eignen. Die Orientierung der Schnittebene wird dabei durch zwei Winkel definiert. Bei einem händischen Schnitt erlaubt dies die einfache Festlegung mit Hilfe einer Schnittschablone. Der Schnitt der feuchten Tonmasse mit einem Drahtwerkzeug erreicht eine angemessene Genauigkeit und ist wesentlich weniger aufwendig als der Schnitt des getrockneten oder gebrannten Stranges mittels Steinsäge oder einem ähnlichen Werkzeug.

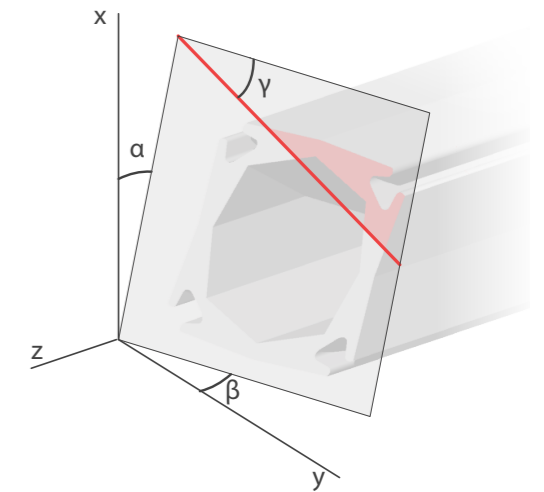


Abb. 53
Schnittwinkel am Extrusions-Profil

Um vor allem die Lage der Abstände der Öffnungen zueinander beizubehalten sowie die Passung der vier Knotenöffnungen zu gewährleisten, darf beim Schnitt keine wesentliche Verformung des Profils erfolgen. Die fortschreitende Trocknung führt zu einer Festigung des Tonkörpers, sodass zwar der Widerstand beim Schneidvorgang etwas ansteigt, andererseits die Formtreue aber ebenso steigt. Als günstig hat sich hierbei eine Lufttrocknung über einen Zeitraum von etwa einem Tag erwiesen. Der Draht wird dabei, um den Anpressdruck gering halten zu können, leicht gezogen und am besten diagonal von einer Ecke zur gegenüberliegenden durchgeführt. Wenn ein „Zusammenfallen“ des Stranges durch die seitlichen Schnittschablonen verhindert wird, erreicht man so gute Ergebnisse.

Durch die variierenden Winkel ergeben sich durchaus beachtliche Mengen an Abschnitten, die nicht für die Schale oder Fläche verwendet werden. Diese werden unmittelbar wieder der Extrusion zugesetzt, sodass im Endeffekt kein nicht nutzbarer Verschnitt anfällt. Gegenüber Tragwerken aus konventionellen Materialien, wie Holz oder Stahl, bei deren Fertigung immer Verschnitte anfallen, stellt dies einen gewissen Vorteil dar.

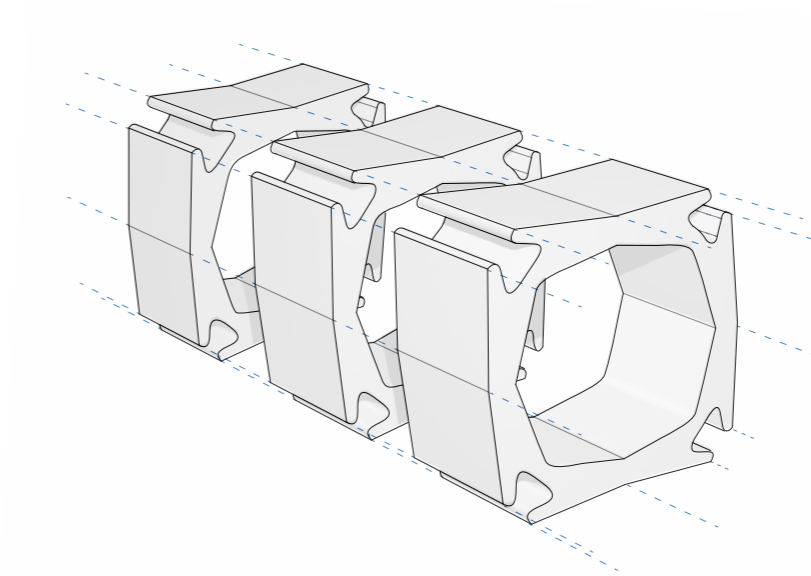


Abb. 54 Schneiden der Module aus dem Extrusionsstrang. Zwischenstücke können der Extrusion unmittelbar wieder zugeführt werden, sodass quasi kein Verschnitt entsteht.

Roboterschneiden | Automatisiert könnte das Schneiden am laufenden Extrusionsstrang erfolgen, wobei die Bewegung des Profilstranges berücksichtigt werden muss. Das winkelvariable Schneidewerkzeug bewegt sich hierbei für die Zeit des Schneidevorganges mit gleicher Geschwindigkeit mit dem Strang mit. Dieser Ansatz wird heute etwa bei der industriellen Ziegelproduktion verwendet, um rechtwinkelige, planare Schnitte zu erreichen. Die Extrusion läuft dabei mit kontinuierlicher Geschwindigkeit weiter.

Die hohe Flexibilität, die hinsichtlich der sich immer verändernden schiefen Anordnung der Schnittebene gefordert wird, sowie die laufende Strangbewegung, legt beispielsweise aber auch die Verwendung eines Industrieroboterarmes mit Schneidewerkzeug nahe. Wichtig ist, dass der Draht nach dem Schneidevorgang von anhaftenden Tonresten befreit wird, damit der folgende Schnitt sauber wird. Dies könnte aber durch ein automatisches Abstreifen gut bewerkstelligt werden. Der Mechanismus dafür könnte in das Schneidewerkzeug integriert werden, oder in die Bewegung des Roboters integriert werden. Für die Rückführung des Drahtes wäre es zweckmäßig das geschnittene Modul, etwa durch ein schneller laufendes Band, etwas zu entfernen und den Draht durch den Spalt dazwischen zurück zu führen.

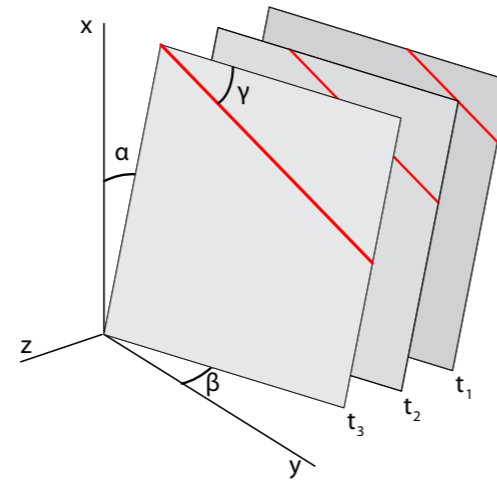


Abb. 55
Schnittwinkel und Drahtführung bei kontinuierlich laufender Extrusion

Ein Roboterarm kann dabei die geforderten bzw. optimalen Bewegungen kombinieren (Abbildung 55 und 56):

- Einstellung des Winkels in X-Ebene
- Einstellung des Winkels in Y-Ebene
- Einstellen des Winkels, unter dem das Schneidewerkzeug in der Schnittebene geführt wird
- Gleichzeitiger Ausgleich der Strangbewegung in Z-Richtung
- Ziehen des Schneidedrahtes zur Verringerung des Widerstandes und der Verformung

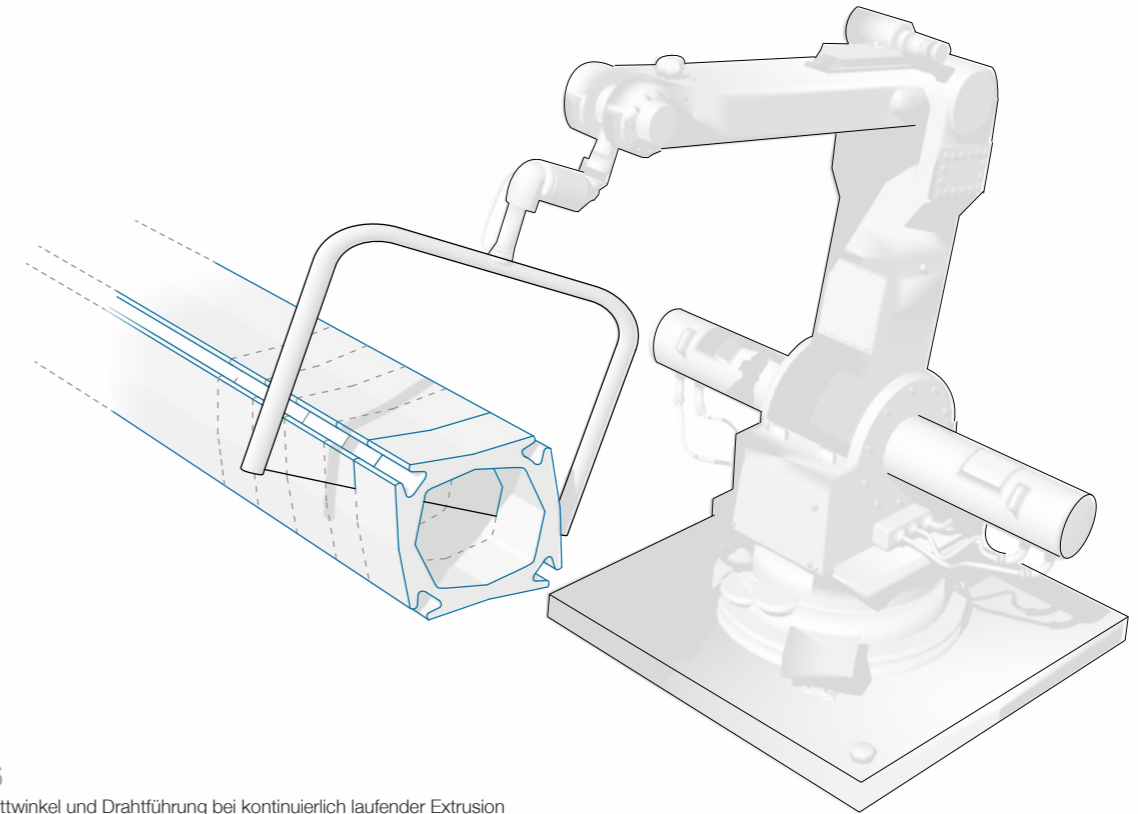


Abb. 56
Schnittwinkel und Drahtführung bei kontinuierlich laufender Extrusion
Ein Industrieroboterarm kann die komplexe Bewegung mit der benötigten Geschwindigkeit, Genauigkeit und Flexibilität ausführen.

Trocknen | Größere Mengen von eingeschlossenem Wasser würden beim Brennen verdampfen und zu Verformungen bis hin zur Zerstörung von Bauteilen führen. Es ist also erforderlich den Wassergehalt zu verringern, also zu trocknen. Vor dem Brennen bietet sich eine Lufttrocknung von mehreren Tagen an. Zum einen erfolgt die Trocknung so sehr schonend, zum anderen muss keine zusätzliche Energie aufgewendet werden. Bereits die luftgetrockneten Module weisen eine ausreichende mechanische Festigkeit auf, um sie transportieren, schlichten oder nachbearbeiten zu können.

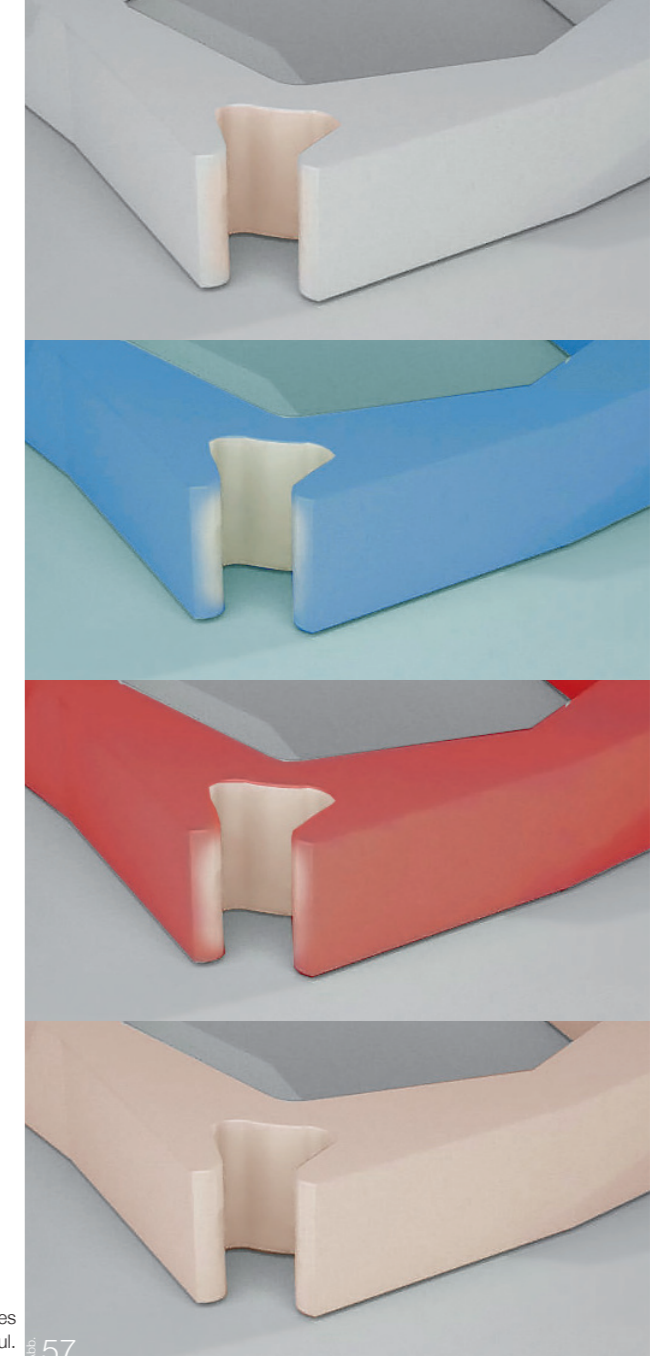
Vor dem eigentlichen Brennprozess ist noch eine vollständige Resttrocknung erforderlich. Diese erfolgt in der Regel durch ein einige Stunden anhaltendes Temperaturplateau von ca. 110°C vor dem Brennen, und ist meist schon Teil des Temperaturprogramms des Brennofens.

Brennen | Beim Brand erfolgt, abhängig von den gewählten Bedingungen, ein Versintern der Phasen. Die Körner beginnen an den Kontaktpunkten miteinander zu verschmelzen und bilden so ein nach dem Erhitzen festes Gefüge. Je nach Temperatur und Zeit ist dieser Prozess mehr oder weniger stark ausgeprägt und bestimmt so direkt die mechanische Festigkeit des Scherbens und die Form und Größe von verbleibenden Poren (und damit des Wasseraufnahmeverhaltens der Keramik). Die Verringerung des Porenvolumens bewirkt eine Volumsverringering des Tonkörpers. Unter normalen Umständen erfolgt die Volumsänderung so, dass die Längenänderungen in alle Richtungen gleich stark sind und die Form des Bauteiles, hinsichtlich der Proportionen und Winkel, erhalten bleiben.

Die Bedingungen beim Brand (Temperatur, Dauer) sind direkt für das Ausmaß der Schwindung verantwortlich. Ein wichtiger Punkt ist somit, dass für den Brand der einzelnen Module des Tragwerks konstante Bedingungen herrschen sollten, um eine einheitliche und kontrollierte Schwindung zu erreichen und die gegenseitige Passung der Module zu gewährleisten. Diese Schwindung hat natürlich einen Einfluss auf die Gesamtgröße der Konstruktion und liegt in einer Größenordnung von bis zu 30 % des Volumens und 10 % der Längen.

Oberflächenbehandlung | Eine Erhöhung der Haltbarkeit wird bei Keramiken traditionell durch Aufbringen einer Glasur erreicht. Auf die vorgebrannte, poröse Oberfläche wird dabei eine dichte, glasartige Oberflächenveredelung aufgebracht. Chemisch bestehen Glasuren aus Mineralmehlen, die beim Brennen schmelzen und eine glasige, farblose Schicht bilden. Zur Farbgebung bietet sich eine breite Palette von möglichen Farben durch Zugabe von Metalloxid-Pulvern an.

Die Glasur wird üblicherweise auf die vorgebrannte Keramik (sog. „Schrühbrand“ bei niedriger Temperatur) in Form einer Suspension aufgebracht. Es eignen sich dafür etwa Tauch- und Sprühverfahren, die Glasur wird aufgespritzt oder das Werkstück damit übergossen. Damit es zu keiner Verschmelzung mit der Ofenauskleidung kommt, müssen dabei jedoch Auflageflächen unbehandelt bleiben.



Unglasiertes, farbig glasiertes und weiß glasiertes Keramikmodul.

Abb. 57

4.4 Fügung mittels Verbinder

Das Verbinden der Module erfolgt über Kunststoff-Knotenprofile. Die Profile werden entsprechend der jeweiligen Höhe der Module abgelängt und verbinden je vier Module miteinander bzw. am Rand zwei. Auf Grund seiner mechanischen Eigenschaften und guten chemischen Beständigkeit sowie in der Regel hohen UV-Beständigkeit, eignet sich HD-PVC-(High-Density-Polyvinylchlorid) gut als Material für die Verbindungselemente. HD-PVC weist von allen handelsüblichen Kunststoffen auch die beste mechanische Bearbeitbarkeit auf und wird auch unter der Bezeichnung „Hart-PVC“ geführt. Es kann mit vielen üblichen Verfahren geschnitten, gefräst, ja sogar geschliffen werden. Von ausgewählten Lösungsmitteln wird PVC ohne merklich zu quellen leicht angelöst, sodass es gut geklebt werden kann. Auch den Inhaltsstoffen von Zwei-Komponenten-Montagemörteln widersteht es gut, wobei bereits bei glatten Oberflächen eine gewisse Haftwirkung entsteht.

Die Toleranzfuge zwischen Knotenelement und Keramikmodul von 3-5 mm wird mit Mörtel ausgefüllt. Besondere Vorteile bieten hier handelsübliche Zwei-Komponenten-Injektionsmörtel.

So kann eine formschlüssige Verbindung über die ganze Modulhöhe hergestellt werden. Auftretende Zug, wie auch Druckkräfte werden dabei sehr gut auf die Kontaktfläche verteilt und weitergegeben. Diese „starre Verklebung“ ist damit außerordentlich keramikgerecht, weil punktuelle Belastungen sehr gut vermieden werden.

Der Verbinder eignet sich mit einer Adaption dann auch zum Eindecken mit Plattenwerkstoffen, allen voran Glas. Details dazu finden sich in „CeramicTranslation - Teil II - Variation und Ausformung“.

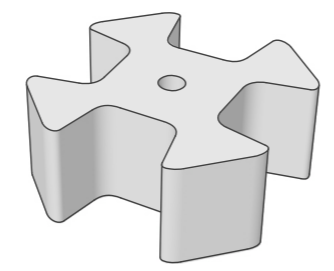


Abb. 58
3D-Modell des Verbindungs-Profiles

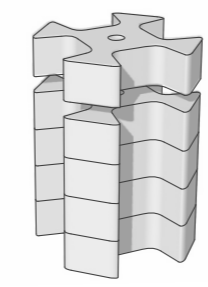


Abb. 59
aus Stücken aufgebautes Profil

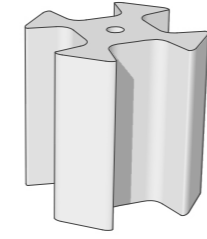


Abb. 60
Extrudiertes Profil

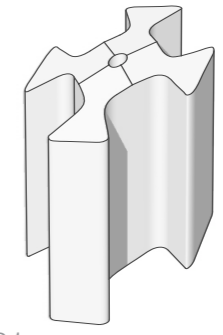


Abb. 61
4-fach schräg geschnittener Verbinder

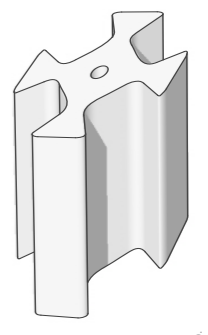


Abb. 62
Planar geschnittener Verbinder

Verbinderprofil | Idealerweise hat man zum Fertigen der Verbinder ein langes Profilstück zur Verfügung. Solche Profile lassen sich aus Thermoplasten in größeren Mengen sehr effizient mittels Warmextrusion herstellen. In kleinen Mengen ist dies jedoch kaum möglich, da für die Extrusion eine Strangpresse benötigt wird, bei der der Kunststoff sehr temperaturgenau aufgeschmolzen wird und während der Formgebung diese Temperatur hält. Daher sind solche Pressen, wie auch die Matrizen, ungleich aufwendiger gefertigt als solche für Tonmassen. Sie sind erst bei sehr großen Mengen rentabel. Alternativ kann das Profil jedoch gut aus Plattenwerkstoffen geschnitten oder gefräst werden. Diese Einzelstücke lassen sich dann zu einem längeren Profil stapeln und verkleben.

Verbinderoberseite/ -unterseite | Der Verbinder kann im rechten Winkel in der passenden Höhe geschnitten bzw. auch passend hoch gestapelt werden (Abbildung 59 und 60). Dieser gerade geschnittene Verbinder kann zwischen die vier Module eingesetzt werden, ohne der Form der Module zu folgen, falls diese schräg geschnitten sind. Formschöner erfolgt der Übergang zwischen Verbinder und Modul, wenn beide mit den gleichen linearisierten Translationsflächen geschnitten sind, was jedoch mit einem höheren Herstellungsaufwand verbunden ist. Als etwas einfachere Alternative können die vier erforderlichen Schnitte (Abbildung 61) auch durch einen planaren Schnitt angenähert werden (Abbildung 62), was die Fertigung vereinfacht und dennoch einen stufenfreien Übergang ergibt.

Montage mit Unterbauschalung - Komplettschalung

| Zur Montage der fertigen Module eignet sich eine Unterbauschalung sehr gut. Bei mehrfach symmetrischen Formen kann dabei eine Auflegeschalung hergestellt werden, auf der die Module und die Verbinder platziert und ausgerichtet werden können. Nach dem Aushärten des Injektionsmörtels kann die Schalung für einen weiteren Teil des Tragwerks verwendet werden. Die Tragwerksteile können dann ggf. mit einer weiteren Schalung positioniert und zusammengefügt werden. Diese Methode wurde bei der Prototyp-Montage verwendet und ist dort detaillierter dargestellt.

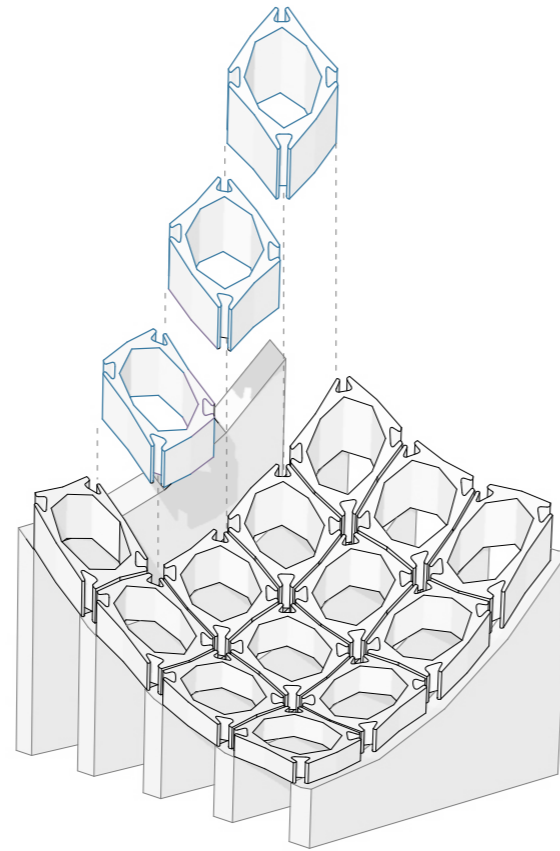


Abb. 63
Montage mit Unterbauschalung

Montage mit Unterbauschalung - Rippe

| Durch das Translationsprinzip zur Herstellung der Geometrie bietet sich die Wiederverwendung von Schalungselementen an. Mit einer Schalung in Form einer Rippe, die die Form einer der Translationskurven aufnimmt, kann

somit die Gesamtform reihenweise aufgebaut werden. Nach jeder Reihe kann die Schalung in der Höhe angepasst und zum Auflegen einer weiteren Modul- bzw. Verbinderreihe zum Verkleben wieder verwendet werden.

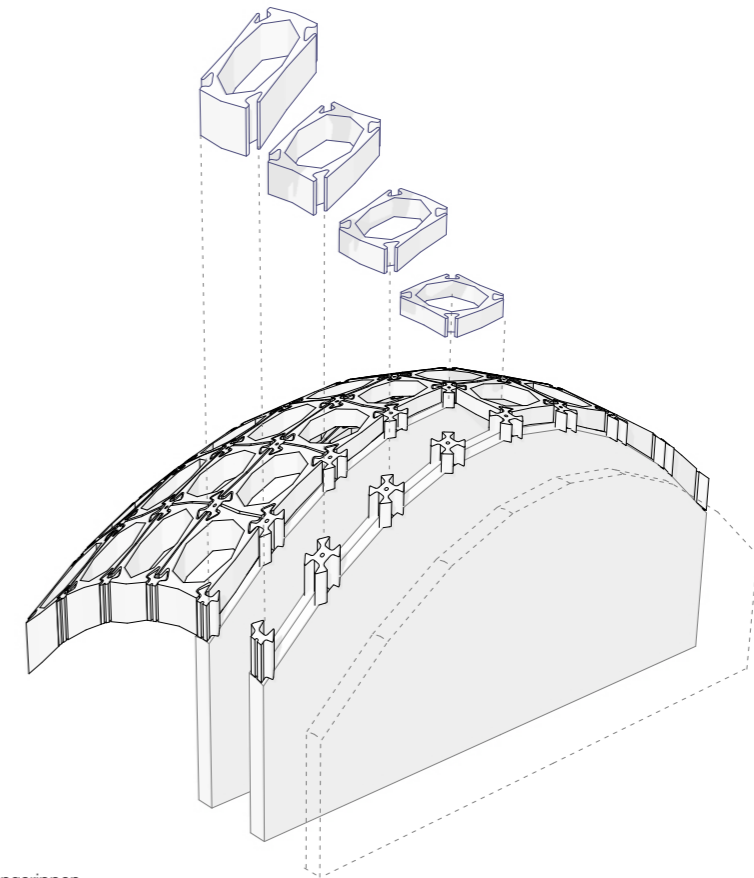


Abb. 64
Montage mit weiterrückenden Schalungsrippen

Vorversuche und Fügevarianten

Vergießen mit Bewehrung | Erste Fügungen wurden ohne Knotenprofile hergestellt. Dabei wurde eine einfache Drahtbewehrung eingebracht und mit einer Zementmischung vergossen. Zwar wurde eine äußerst keramikgerechte, hochfeste Verbindung hergestellt, jedoch mit einigen Nachteilen. Sehr anspruchsvoll und aufwendig muss die Öffnung im Knoten abgedichtet werden, ein optisch ansprechender, einheitlicher Betonkörper mit geringem Aufwand ist kaum zu erreichen.

Weiters erlaubt die lange Aushärtezeit von Zementmörteln kaum eine effiziente Montage. Schneller härtende Produkte wie Gips sind wegen der geringeren Festigkeit und Schwindung beim Trocknen sowie wegen der mangelnden Witterungsbeständigkeit nicht gut geeignet. Denkbar wäre auch ein Vergießen mit Kunstharz, wobei solche Kunstharze, etwa auf Epoxidbasis, teuer und noch aufwendiger anzuwenden sind als Bindemittel auf Mineralbasis.

Für erste Fügeversuche wurde eine profisorische Drahtbewehrung mit Gewindestange im Knoten positioniert



Verbindungsstelle mit Bewehrung



Händisches Verteilen des Mörtels



Ausgemörtelte Verbindungsstelle mit Bewehrung

In statischer Hinsicht ergibt sich durch das Vergießen mit der Wasser/Zement/Sand-Mischung eine belastbare Fügung (siehe dazu auch Punkt 5.7) bei niedrigen Kosten. Eine ansprechende Optik würde sich bei den an der Ober- und Unterseite glasierten Modulen erreichen lassen. Mörtelreste lassen sich von der Glasur sauber entfernen, was bei unglasierter Keramik schwer ist. Auch eine Vereinheitlichung der Oberfläche durch „Glattwischen“ wäre dann möglich. Es könnte somit ähnlich gearbeitet werden, wie etwa beim Verlegen von glasierten Fliesen und dem anschließenden Verfugen und Sauberwischen.

Belastung bei einer Spannweite von 1 m



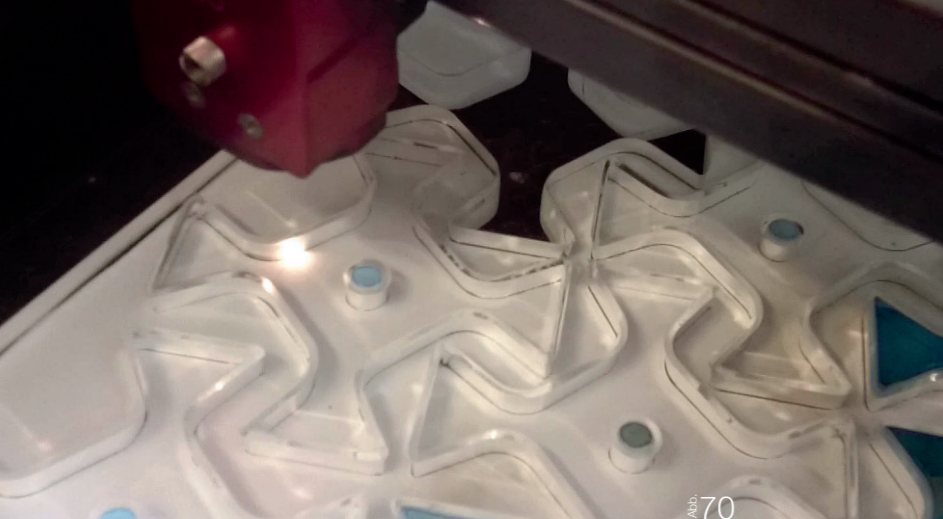


Abb. 70
Lasercutten von Verbindern aus Acrylglas



Abb. 72
Verschiedene lasergeschnittene Acryl-Verbindern

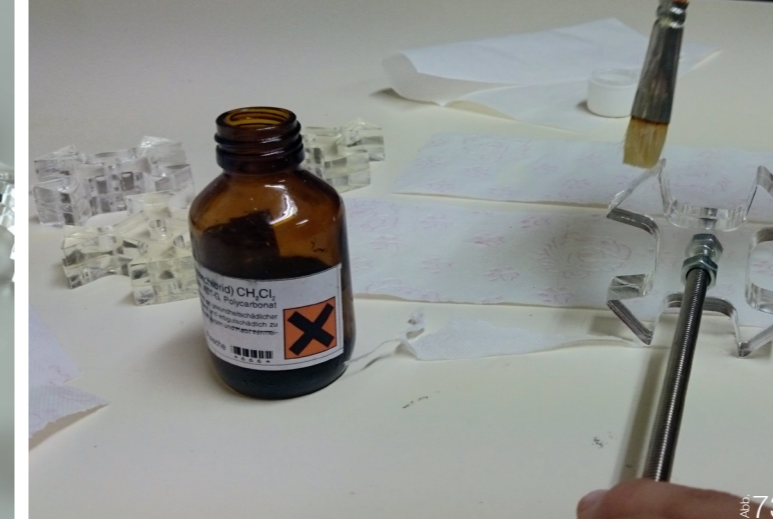
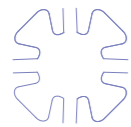


Abb. 73
Verkleben der geschnittene Acryl-Teile zu einem stabilen, strangähnlichen Profil durch Anlösen mit Dichlor-Methan.

PMMA - Acrylglas | Eine gute Fügbarkeit stellen Kunststoff-Verbindern dar. Erste Verbindern wurden aus lasergeschnittene Acrylglas in 10 mm Stärke hergestellt, mit Dichlormethan angelöst und zu einem Stapel verbunden. Acrylglas lässt sich sehr einfach mit einem gängigen Lasercutter schneiden. Erste Stücke dienen auch dazu, die Geometrie zu testen und ein geeignetes Spaltmaß zwischen Knotenelement und Keramikmodul zu finden. In Abbildung 71 und 72 sind Verbindernstück mit unterschiedlichen Größen gezeigt, die anschließend an gebrannten Modulen erprobt wurden. Eine

angestrebte Fuge von 3 mm stellt dabei einen guten Freiraum zum Ausgleich von Ungenauigkeiten bei der Keramikherstellung/Modulpositionierung und einer effektiv und wirtschaftlich mit Kleber oder Mörtel verfüllbaren Fuge dar. Zur Herstellung größerer Stückzahlen ist das Material jedoch aus Kosten- und Zeitgründen weniger geeignet. PMMA ist etwas teurer als andere Massenkunststoffe wie PE oder PVC. Die Herstellung ist mit einem gewissen Zeitaufwand verbunden, weil der Laser sehr langsam und mit hoher Leistung gefahren werden muss.

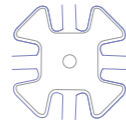
Abb. 71
Verschiedene Spaltmaße bei Verbindern



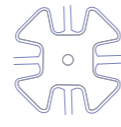
Keramik
10mm Fuge



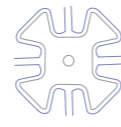
1mm Spalt
5mm Fuge



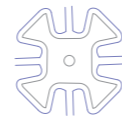
2mm Spalt
10mm Fuge



2mm Spalt
5mm Fuge



3mm Spalt
5mm Fuge



4mm Spalt
5mm Fuge



Abb. 74
Verklebter Stapel aus Acrylglas-Verbindern

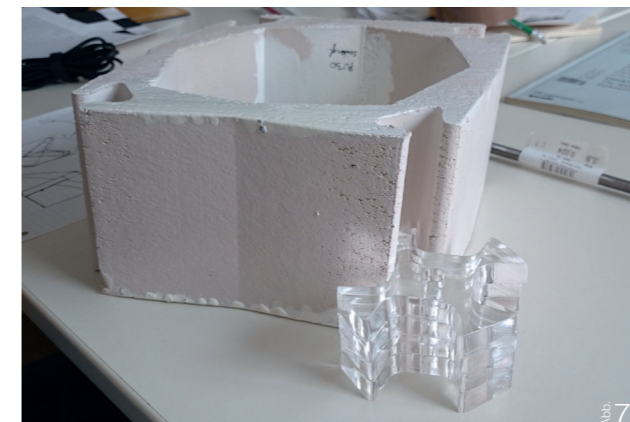


Abb. 75
Die verklebten Verbindern in die Verbindernstelle der Keramik eingesetzt.

Kleben | Erste Vorversuche zu den Verbindernstellen mit den Profilen auf Kunststoffbasis wurden mit einer Auswahl an Klebstoffen durchgeführt. Die Anwendung erfolgte mit handelsüblichen Kartuschenpressen.

- **Ponal PUR-Montagekleber:** Solche Kleber auf Polyurethan-Basis werden heute gerne als Ersatz für Leim verwendet. Es gibt Varianten, die nach der Anwendung leicht aufquellen, sodass eine gute Spaltfüllung erreicht wird. Einige Punkte haben sich jedoch als sehr nachteilig herausgestellt:
 - Der Kleber neigt zum Ziehen von Fäden und kann von der Oberfläche kaum mehr rückstandsfrei abgewischt werden, weshalb eine optisch entsprechende Applikation sehr schwierig ist.
 - Nach dem Aushärtvorgang von mehreren Stunden behält die Fügung eine gewisse Elastizität bei. Beim erforderlichen Spaltmaß von einigen Millimetern hätte dies zu einer zu großen Beweglichkeit der Einzelmodule und in Folge zu Montageschwierigkeiten und möglicherweise auch zu statischen Problemen in der Gesamtkonstruktion geführt.

Fischer FIS 300 T: Ist ein Montagemörtel-System. Vergleichbare Produkte werden von mehreren Herstellern angeboten und werden häufig als „chemische Dübel“ für Verankerungen in Beton und Naturstein verwendet. Je nach Anwendung bieten die meisten Hersteller dabei eine breite Palette an Produkten an, die sich in Verarbeitungszeit und Endfestigkeit unterscheiden. Neben zementbasiertem Mineralmörtel enthalten diese Produkte ein Zweikomponentensystem aus Vinylestern und einem chemischen Starter. Beim Vermischen von Harz und Härter im Statikmischer wird die Polymerisation des Vinylesters eingeleitet. Die Verarbeitungszeit ist dann stark temperaturabhängig. Bei Raumtemperatur kann der gewählte Injektionsmörtel für ca. 5-10 Minuten gut verarbeitet werden. Danach kommt es schnell zum Aushärten. Fischer FIS 300 T zeichnet sich durch eine vergleichsweise hohe Wirtschaftlichkeit bei hoher Festigkeit und durch eine einfache Anwendung aus. Ähnliche Ergebnisse lassen sich vermutlich auch mit Produkten anderer Hersteller erzielen.



Flexible, flache Mischspitze für Injektionsmörtel



Einbringen von Injektionsmörtel

Die Injektionsmörtel-Verklebung bietet einige Vorteile gegenüber den vorhergehenden Varianten:

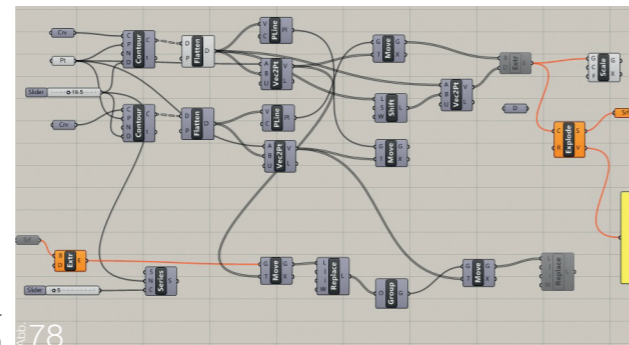
- Durch die sehr passende Verarbeitungszeit, kann die Mehrfachverwendung von Schalungen erfolgen. Die Endmontage der Viertelschalen am Bestimmungsort kann dadurch ebenfalls gut bewerkstelligt werden.
- Weiters konnten sehr gute Festigkeiten erreicht werden. Insbesondere kann durch die geringe Elastizität von einer guten formschlüssigen Verbindung in den Knotenpunkten ausgegangen werden. Durch das Kriechverhalten vor dem Aushärten kann bei entsprechender Verteilung in der Fuge zwischen Kunststoffverbinder und Keramik eine keramikgerechte, gleichmäßige, flächige Belastung erfolgen.
- Zur porösen, unglasierten Keramikoberfläche entsteht eine sehr gute Haftung, während die Verbindung zum Kunststoff auf einem Formschluss beruht. So besteht etwa bei einer leicht konischen Form der Verbinders die Möglichkeit, die Verbindung wieder zu lösen, indem man den PVC-Kern aus dem Knoten hämmert. Im Detail würde dies jedoch eine genaue Abstimmung der Form und Oberfläche erfordern.

4.6 Planung und Software-Tools

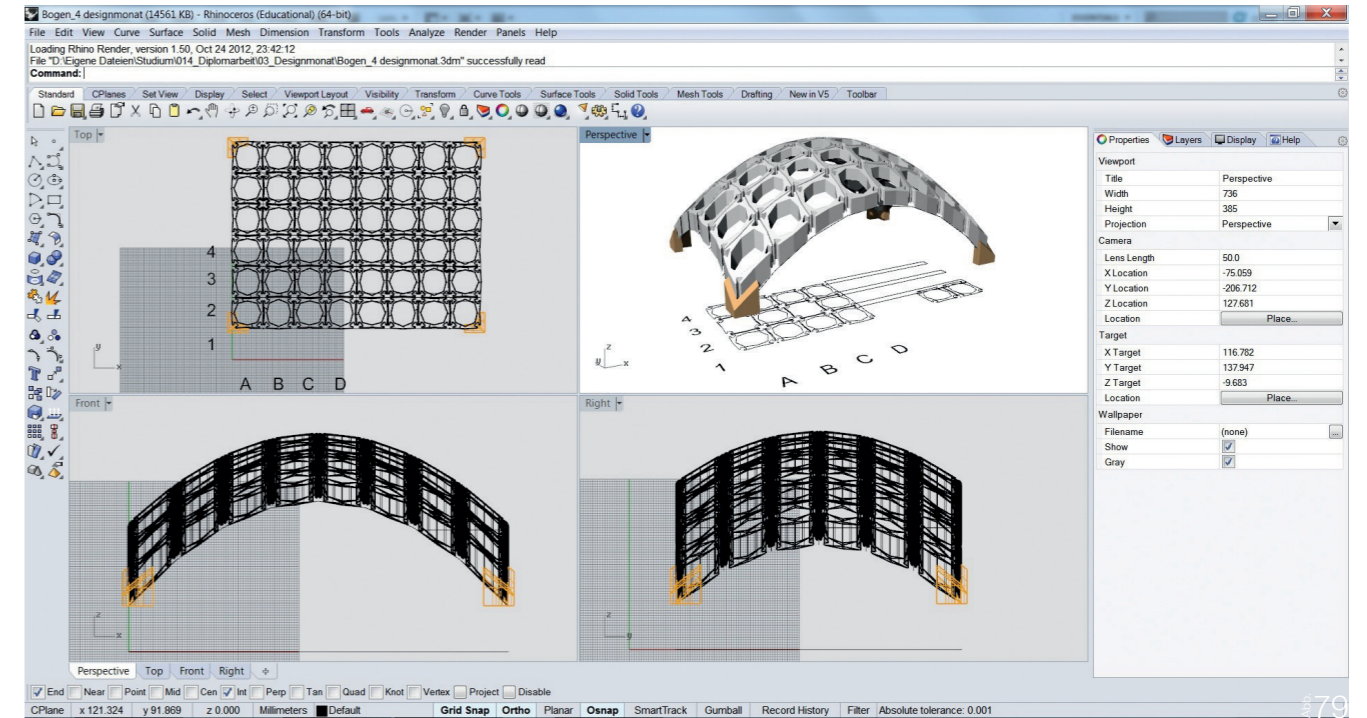
Modellierung | Für den Entwurf und die Fertigung des Prototypen wurde hauptsächlich die 3D-Modellier-Software „Rhinceros“ Version 5 von „Robert McNeel & Associates“ verwendet. Prinzipiell ist die Ermittlung der Schnittwinkel und der Modulhöhen, auch ohne Computerunterstützung bis zu einem gewissen Grad möglich. Die Verwendung von Modelliersoftware bietet jedoch Vorteile, wie z.B. eine gute Veranschaulichung der Form.

Die grundlegenden Geometrie-Operationen zum Zeichnen der Randkurven werden von Rhinceros zur Verfügung gestellt. Sowohl äußere Anforderungen (Position der Auflager, Spannweite, Anschlusspunkte ...) als auch statische Überlegungen (Druckableitung, Kettenlinien ...) können schnell und unkompliziert berücksichtigt werden. Sowohl das Erstellen von parabelförmigen Randkurven, wie auch völlig frei geformter, ist einfach möglich.

Das Linearisieren der Kurven und die Multiplikation bzw. Translation der Kurven kann ebenso völlig unkompliziert erfolgen, sodass relativ schnell ein anschauliches 3D-Grobmodell der Translationsgeometrie entsteht. Die oberen und unteren Begrenzungsflächen können ebenfalls einfach durch Ausfüllen mit Flächen erzeugt werden, die mit Modul-Extrusionen verschnitten ein detailliertes 3D-Modell ergeben. Rhinceros stellt ebenfalls Messwerkzeuge zur Ermittlung der Schnittwinkel und Längen/Höhen zur Verfügung und ermöglicht so eine anschauliche Prüfung anhand des 3D-Modells.



Screenshot des Grasshopper-Scripts zur automatischen Erzeugung der Begrenzungsflächen aus den Randkurven



Screenshot des Prototypen in der 3D-Software Rhinceros

Grasshopper | Für das Modellieren aus den Randkurven wurde für Teilschritte das Grasshopper-Plug-In verwendet. Die Randkurven als Input-Geometrie liefern so automatisiert ein fertiges Modell der Flächen der Translationsgeometrie oder sogar der fertig geschnittenen Module.

Mit einem Grasshopper-Script lassen sich so auch die Grundgeometrien für die Modellierung eines statischen Modells erstellen und in die FE-Software übertragen.

Zu Ausstellungs- und Erprobungszwecken wurde ein Prototyp entworfen und hergestellt, wobei wertvolle Erkenntnisse gewonnen wurden und die Machbarkeit gezeigt werden konnte. Die Größe des Prototyps von 1,56 x 1,56 m bei einem Gewicht von ca. 150 kg sollte noch einen vertretbaren Aufwand beim Transport erlauben.

Prototyp-Entwurf | Unter Anwendung der beschriebenen Prinzipien ergibt sich eine statisch günstige Translationsschale durch Verwendung von Parabeln als Randkurven. Die Wahl zweier Parabeln als Randkurven führt auch dazu, dass die sich ergebende Schale einer Idealform sehr nahe kommt, und Gewicht und Belastung sehr gut als Druckkräfte abgeleitet werden können. Durch die Dicke der Schale liegt die Drucklinie innerhalb der Geometrie.

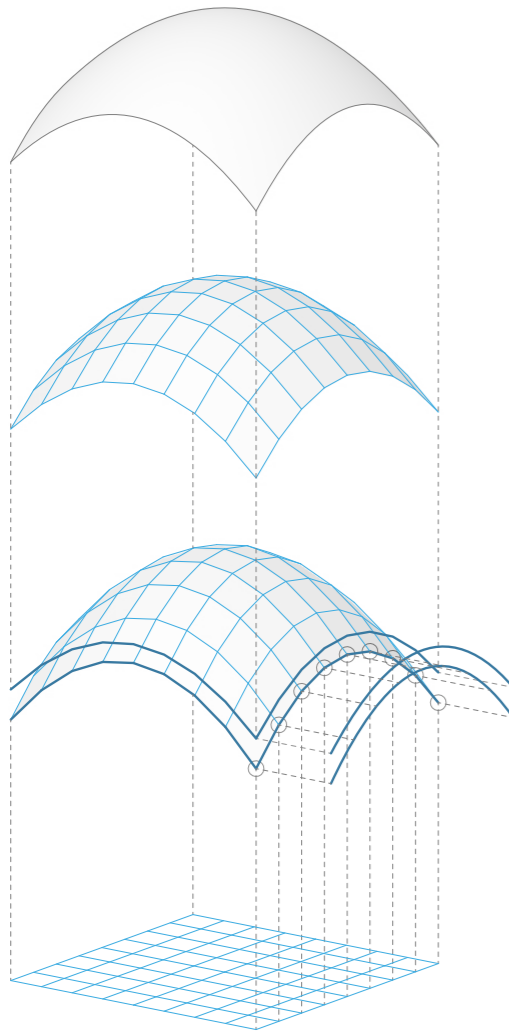


Abb. 80
 Linearisierung der oberen und unteren Begrenzungsflächen des Prototypen
 oben: über Projektion des Rasters auf die Translationsfläche
 unten: über Linearisierung der Randkurve vor der Translation

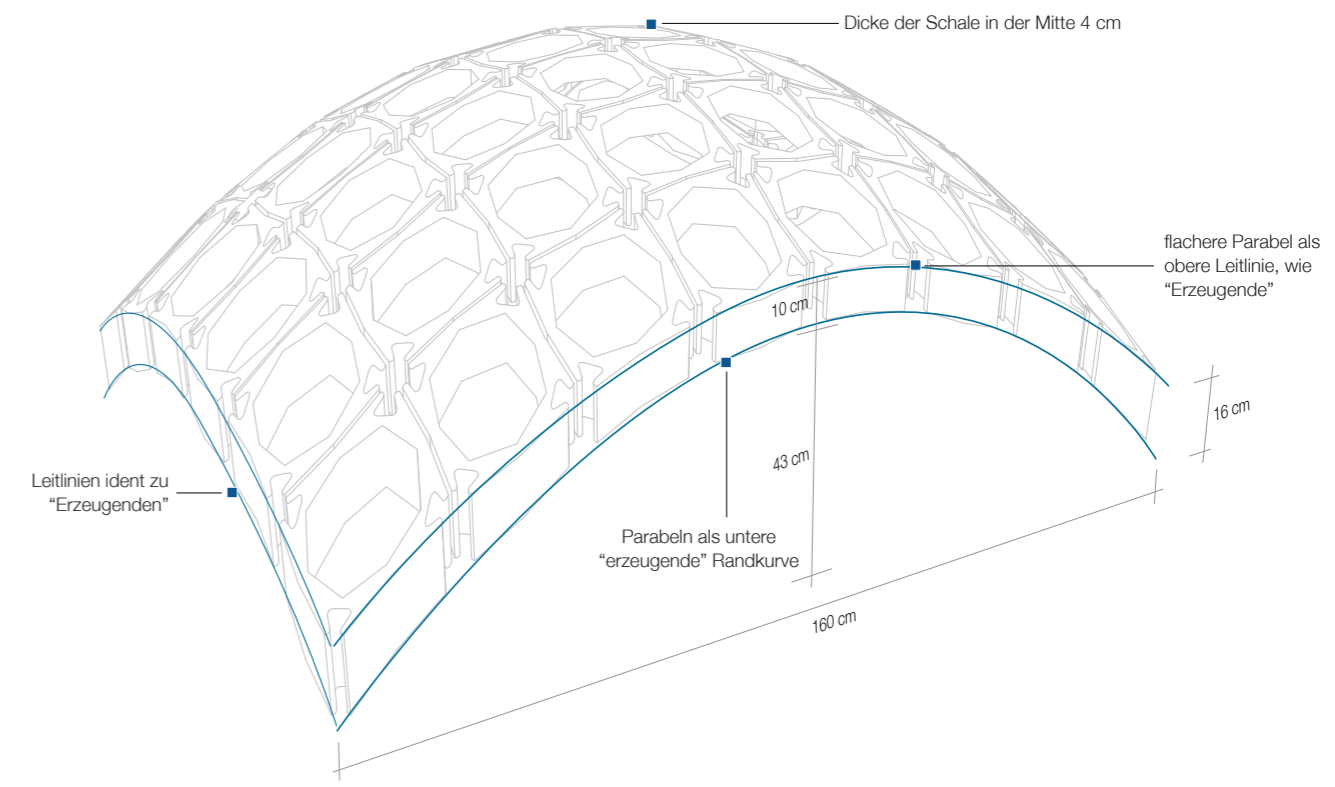


Abb. 81
 Entwurf einer doppelt-symmetrischen Translationsschale mit variierender Dicke als Prototyp

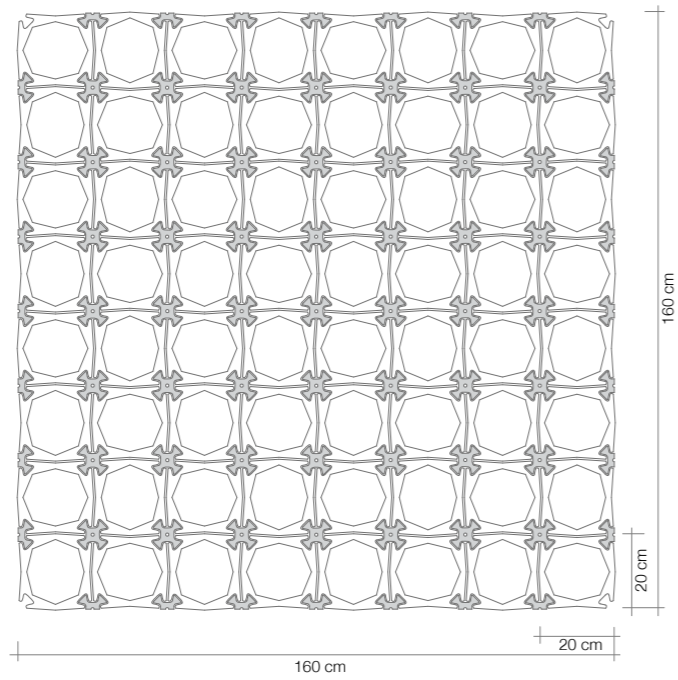


Abb. 82
 Prototyp-Entwurf: Grundriss M 1:20

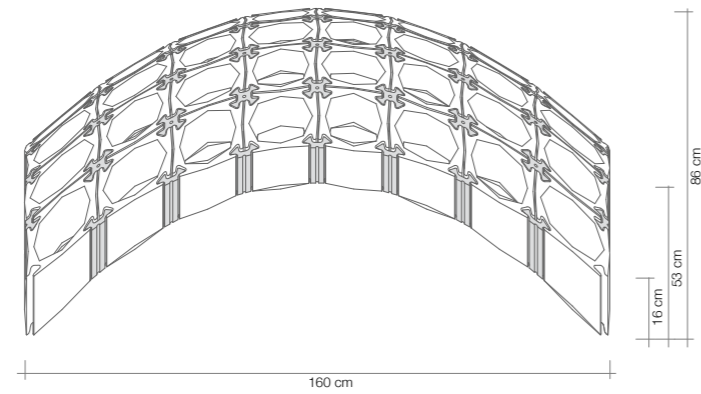


Abb. 83
 Prototyp-Entwurf: Ansicht M 1:20

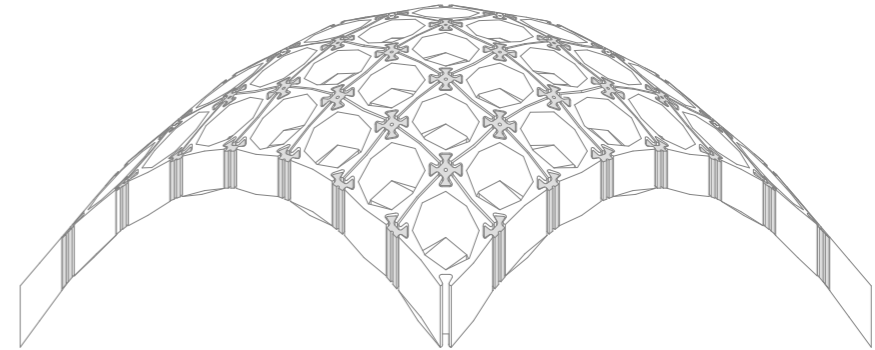


Abb. 84
 Prototyp-Entwurf: Diagonalansicht M 1:20

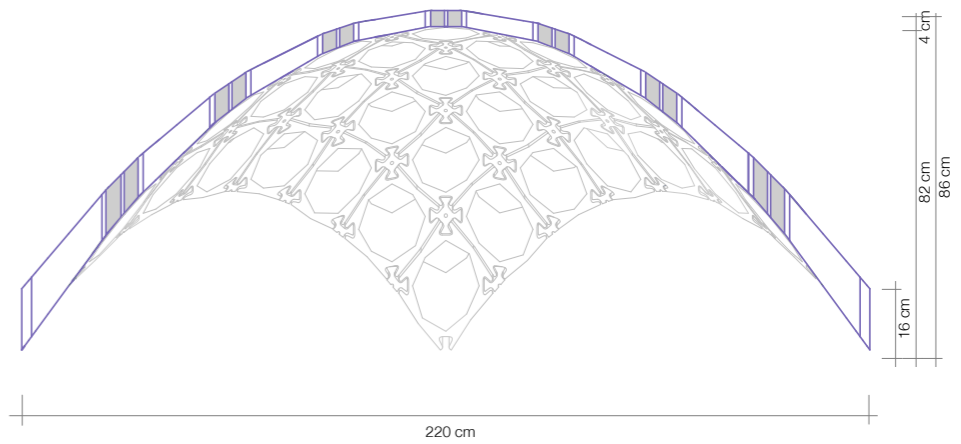


Abb. 85
 Prototyp-Entwurf: Diagonalschnitt M 1:20

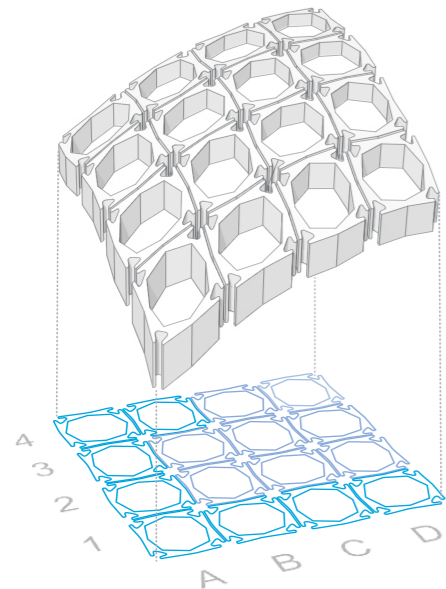


Abb. 86
Viertelschalen des Prototyps mit Kennzeichnungsra-
ster, der zur Identifikation
der Module verwendet wurde.

Weiters sollte der Herstellungsaufwand durch die Ver-
wendung von identen Kurven, die eine Doppelsymme-
trie ergeben, verringert werden. Der Prototyp besteht
aus vier gleichen Viertelschalen, die im letzten Monta-
geschritt zusammengesetzt werden. Durch die Mehr-
fachverwendung von Schnittschablonen und Schalung
sollten sich kleine Ungenauigkeiten möglichst reprodu-
zierbar wiederholen, sodass die Passung der Reihen
zueinander dennoch sichergestellt wird.



Abb. 87
Lasergeschnittene Matrizen-Teile

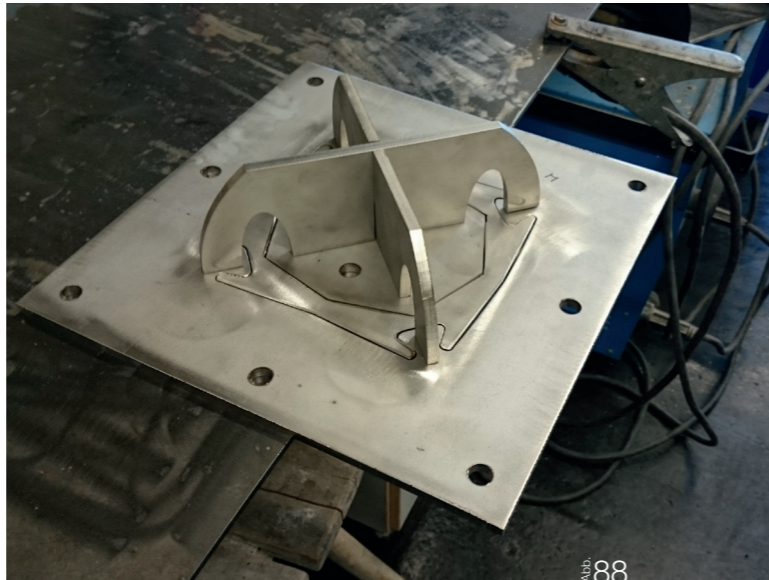


Abb. 88
Bearbeitete Einzelteile: Die Teile wurden entgratet, die Schnittflächen plan
gefeilt und der Tonströmung entsprechend leicht konisch gefeilt

Extrusions-Matrize | Aus einem 5 mm Stahlblech
wurden von einer Stahlbaufirma, gemäß der Planung,
die Teile für die Extrusionsmatrize mittels Laser ge-
schnitten. Die Teile wurden händisch nachbearbeitet.
Dabei wurden scharfe Kanten leicht gebrochen und
der Stirnplatte eine leicht konisch zulaufende Form ge-
geben. Dies verbessert die Qualität des Ton-Stranges
beim Extrudieren. Insbesondere an der Oberfläche
des Tones wären Grate in der Matrize o.ä. sonst gut
sichtbar. Für ein passendes Extrusions-Ergebnis ist die
Detailausformung der Matrize bzw. der Einbauten (z.B.
des Haltekreuzes) nicht unerheblich.



Abb. 89
10 kg-Tonhubbel G&S 254

Tonmasse | Wie aus den vorhergehenden Kapiteln
hervorgeht, gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen
Tonmischungen. Für die Herstellung des Prototyps
wurde auf Grund von positiven Erfahrungen bei der
Extrusion ein im Hobbybereich üblicher schamottierter
Ton verwendet:
Firma G&S - Georg und Schneider; Ton 254 mit einem
Anteil an Feinschamotten (0 bis 0,2 mm) von 25 % w/w
der Trockenmasse.⁵⁹

- Brennfarbe : weiss - creme
- Brennbereich: 1000°C bis 1200 °C
- Trockenschwindung: ca. 1 % d. Länge
- Brennschwindung bei 1200°C: ca. 5 % d. Länge

Durch die Beimengung von Schamotten (bereits ge-
brannte, fein gemahlene Tonteilchen) erhält die Masse
eine größere Standfestigkeit und das Schwinden beim
Trocknen und Brennen verringert sich.

Hauptsächlich sind diese Tonmassen in Kleinmengen mit einer Rotfärbung oder in Grau erhältlich. Um den Prototyp optisch neutraler zu halten und um Form und Oberflächen bestmöglich lesbar zu machen, wurde ein möglichst heller Ton gewählt, der beim Brennen eine weiße bis cremefarbene Oberflächenfarbe annimmt. Der Feuchtigkeitsgehalt des Tones für die Extrusion lag bei ca. 40% der Trockenmasse und wurde während der Extrusion durch Wasserzugabe geringfügig variiert, um ein möglichst gutes Extrusionsergebnis zu erhalten. Sofern für die Extrusion bereits extrudiertes Material (beschädigte Stücke oder Abschnitt) wieder eingesetzt wurde, wurde dies in einem vorhergehenden Schritt in der Strangpresse ohne Pressmatrize homogenisiert und durch Wasserzugabe wieder auf den passenden Wassergehalt gebracht.



Abb. 90
Farbe des Scherbens bei verschiedenen Brenntemperaturen (1000°C | 1100°C | 1200°C)



Abb. 91
Extrusionsfertige Tonmasse



Abb. 93
Förderschnecken einer geöffneten Ton-Strangpresse



Abb. 92
Extrusion des Profils an der Strangpresse auf einen XPS-Stützkern

Extrusion auf einer Strangpresse |

Die feuchte Tonmasse (G&S 254) wurde mit einer Vakuum-Strangpresse (Sonderanfertigung Maschinenbau Stracke GmbH, Graz) durch die montierte Extrusionsmatrize gepresst. Neben der eigentlichen Formgebung wurde durch die beiden Förderschnecken der Maschine auch eine Homogenisierung des Tones und ein Verkneten der Tonportionen erreicht. Zwischen der ersten und der zweiten Förderstrecke wurde der Ton durch ein grob-lochiges Stahlsieb gepresst. Die „Tonschnüre“ passieren nach diesem Abschnitt eine Vakuumkammer (<0,2 bar). Dadurch wird verhindert, dass sich im Ton Luft befindet, die nach der Extrusion zu Blasen oder einer Zerstörung der Form durch „Auftreiben“ führen kann. Das Vakuum führt außerdem zu einer starken Verdunstung von Wasser an der Oberfläche der Tonstränge, weshalb der fertige Formstrang um einiges trockener als der eingesetzte Ton ist.

Für den Extrusionsstrang wurde aus XPS ein passender Kern angefertigt, auf den der Strang beim Extrudieren aufgeschoben wurde. Der Kern stützt den Tonstrang in seiner Form, sorgt dafür, dass er gerade bleibt und ermöglicht eine Handhabung, ohne den Extrusionsabschnitt zu beschädigen. Nach etwa 80 bis 100 cm wurde die Extrusion gestoppt und der Strang mit einem Draht abgeschnitten. Ausschusstücke sind nach einer Befeuchtung mit Wasser wieder dem Aufgabestrom zugesetzt worden, um den Materialverbrauch möglichst gering zu halten.

Die so hergestellten Profilstücke wurden anschließend stehend gelagert und bis auf etwa 25-30 % an der Luft getrocknet. Eine unpassende Verformung könnte zu einer Verschiebung der Knotenpunkte führen und wäre bei der Montage problematisch. Eine stehende Lagerung sollte ein Zusammensinken verhindern und die Form des Querschnittes gut erhalten.



Abb. 94
Winkellehren für händisches Schneiden



Abb. 95
Schnitt am Ton-Extrusionsstrang



Abb. 96
Händisches Schneiden mit der Tonsäge



Abb. 97
Geschchnittene Module



Abb. 98
Lufttrocknen



Abb. 99
Kontrolle auf dem späteren Montageunterbau

Schneidevorgang | Der Prototyp besteht aus 8 x 8 Modulen, wobei er aus vier identen Viertelschalen zusammengesetzt ist. Dadurch konnte der Aufwand beim manuellen Schneidevorgang ebenfalls erheblich verringert werden. Die Schnittwinkel wurden anhand der Planung ermittelt.

Die Trocknung auf einen Wassergehalt von ca. 30 % der Trockenmasse verleiht der Tonmasse eine gute Festigkeit. Dieser Wassergehalt stellt für den händischen Schnitt einen guten Kompromiss zwischen Formstabilität und einer noch annehmbar gut mit dem Schneidewerkzeug zerteilbaren Tonmasse dar. Das Trockenverhalten von Ton ist im Bourry-Diagramm (Abbildung 101) beschrieben. Im Diagramm ist auch der Feuchtegehalt beim Schneiden eingezeichnet. Lederharte Module könnten kaum noch ohne vorheriges gleichmäßiges Durchfeuchten geschnitten werden.

Der planare Schnitt wurde mit einer Tonsäge mit ausreichender Drahtlänge unter leichtem Ziehen geschnitten. Die besten Resultate werden erzielt, wenn der Draht diagonal geführt wurde. Für eine möglichst hohe Qualität des folgenden Schnittes wurde der Draht zwischendurch immer von Tonresten gereinigt.

Die Winkel beim Schneidevorgang wurden mit einer Holzschnittschablone geführt. Jedes Modul weist eine individuelle Höhe auf, die zwecks Eindeutigkeit immer an der höchsten Stelle gemessen wurde. Nach dem oberen Schnitt wurde bei entsprechender Länge des Extrusionstranges (Höhe des Moduls an einer Stelle) der zweite (untere) Schnitt nach dem Schablonenwechsel in gleicher Weise durchgeführt.

Die Vielzahl an verschiedenen Schnitten macht beim händischen Schneiden einen entsprechend häufigen Wechsel der Schnittschablonen mit unterschiedlichen Winkeln notwendig. Einer der beiden Winkel kann durch Wechsel der Seitenstücke variiert werden, der andere relativ schnell durch ein Verschieben der Seitenstücke (Abbildung 93).

Jedes einzelne Modul bzw. alle gleichen Module sind mit einer Beschriftung (siehe Modulzuordnung) mittels Stanzwerkzeugen versehen worden, um eine spätere Positionierung zu erleichtern. Die geschnittenen Module sind mit dieser Feuchtigkeit auch ausreichend stabil, um sie für die weitere Trocknung handhaben, evtl. sogar stapeln zu können.



Abb. 100
Elektrischer Brennofen

Trocknen und Brennen | Die luftgetrockneten Module wurden anschließend im Brennofen vollständig getrocknet und gebrannt. Von Raumtemperatur wurde die Offenkammer innerhalb von sechs Stunden auf 600 °C erwärmt und 30 min bei 600 °C gehalten. Während dieser Phase erfolgte eine vollständige Resttrocknung. Danach wurde innerhalb von vier Stunden auf die Brenntemperatur von 1200 °C geheizt und die Temperatur ebenfalls 30 Minuten gehalten.

Der Brennvorgang wurde unter normaler Luft-Atmosphäre durchgeführt, sodass es zu einer Oxidation der Eisenverunreinigungen zu Eisenoxid gekommen ist. Dies ist für die leicht rötliche Färbung der fertig gebrannten Module verantwortlich (siehe auch Abbildung 89).

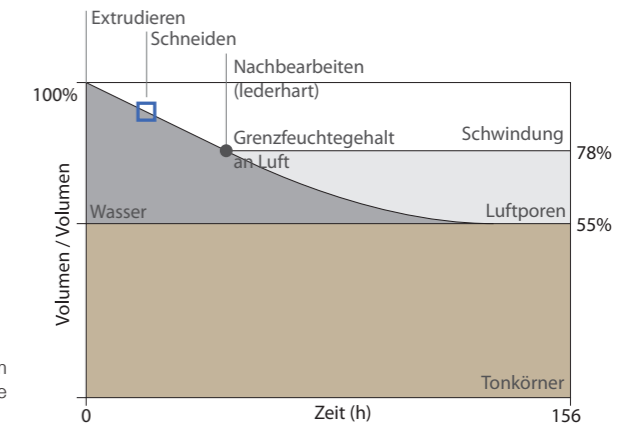


Abb. 101
Bourry-Diagramm zeigt die Feuchtezustände einer Tonmasse

Durch das Brennen kommt es zur Versinterung der Körner an den Berührungspunkten. Je nach Brenntemperatur nähern sie sich dabei einander an und die Hohlräume werden verringert oder gar geschlossen (bis zum „dichten Scherben“). Die Teile schrumpfen dabei mehr oder weniger in alle Richtungen gleich stark und das Modulvolumen verringert sich. Bei den gewählten Bedingungen beträgt die Längenverringering 4 - 6 % in alle Richtungen. Das Volumen verringert sich dabei um 8-12 %. Alle Module konnten in der gleichen Charge gebrannt werden und sind somit den gleichen Bedingungen unterlegen. Andernfalls wäre eine gute Kontrolle bzw. Reproduktion der Parameter wegen einer einheitlichen Schwindung und der resultierenden Passung der Module und Verbinder bei der Montage von großer Bedeutung.

Der Grad der Versinterung ist damit unter anderem auch direkt für die mechanische Festigkeit der Bauteile verantwortlich. Deshalb wurde die Temperatur vergleichsweise hoch gewählt, um die statische Belastbarkeit der Module möglichst zu erhöhen.



102
Nachbearbeiten/entgraten der gebrannten Module



103
Montagefertige, gebrannte, nachbearbeitete und sortierte Module

Nachbearbeitung | Die Module wurden das erste Mal vor dem Brand nachbearbeitet. Sie wurden mehrere Tage an der Luft getrocknet und gewannen damit zunehmend an Festigkeit und Stabilität. Grate vom Schneidevorgang konnten dann mit einem passenden Schleifstein sehr gut entfernt werden. So wurden alle Kanten an den Schnittflächen nachgebessert. Zwar wären Nachbearbeitungen am feuchten Modul ebenso - oder sogar noch einfacher - möglich, dabei besteht jedoch noch stark die Gefahr einer ungewollten Verformung. Auch wurde grundsätzlich nur eine leichte Entgratung der Kanten durchgeführt, um an der winkligen Optik der Module festzuhalten und keine „handcrafted“-Optik zu verursachen. Ebenfalls gut funktioniert hat die Nachbearbeitung nach dem Brennen, wobei eine Modulverformung nicht mehr auftreten konnte. Vor allem die Kanten konnten mit Bimssteinen verschiedener Körnung sehr gut und schnell von Graten befreit werden (Abbildung 102).

Eine Glasur wurde aus Kosten- und Zeitgründen beim Prototyp nicht aufgebracht. Lasierte Werkstücke können im Ofen nicht mehr gestapelt werden (zumindest nicht auf lasierten Oberflächen), sodass neben dem Lasiervorgang (Sprühen oder Tauchen) auch mehrere Brennvorgänge nötig gewesen wären.

Fräsen | Für das Verbinden der einzelnen Module wurden Kunststoff-Knotenprofile angefertigt. Auf Grund der vorteilhaften Eigenschaften hinsichtlich der Verarbeitung wurde HD-PVC verwendet. Hart-PVC kann von allen Kunststoffen wohl am besten gefräst, geschnitten, und sogar geschliffen werden. Polyethylen (PE) würde eine kostengünstigere Alternative darstellen, ist jedoch sehr lösungsmittelbeständig, was zu einer schlechten Verklebbarkeit führt und damit ebenfalls weniger geeignet als PVC war.

Das Herstellen eines durchgehenden Kunststoff-Extrusionsprofils war produktionstechnisch nicht möglich, weil dies entsprechend aufwendiger und teurer als die Ton-Extrusion ist. Bei solchen Prozessen ist es erforderlich, den thermoplastischen Kunststoff für die Formgebung zu erwärmen und den gesamten Prozess mit dem erwärmten PVC durchzuführen. Solche Anlagen sind also entsprechend aufwendig und nur für Massenanwendungen (Kunststoffrohre, Fensterprofile, Kunststoffleisten ...) rentabel.

Die Verbinderprofile lassen sich relativ effizient für eine Fräsung mit geringem Zwischenraum anordnen. (Abbildung 104) Der Verschnitt nach dem Fräsvorgang ließe sich auf etwa 30 % der Fläche verringern. Es wurde

jedoch ein etwas größerer Abfallanteil akzeptiert, um ausreichend dicke Stege auf der Platte zu belassen. So konnte sichergestellt werden, dass es zu keinem Verziehen der Platte während des Fräsens kommt. Die Herstellung der Verbinder wurde an einer großformatigen CNC-Fräse durchgeführt.

HD-PVC ist im Plattenformat in diversen Dicken und Farben erhältlich. Für die Herstellung wurden die Querschnitte mittels CNC-Fräse aus einer 2 cm Platte mit 1 m x 2 m gefräst. Ein Problempunkt beim Fräsen von Kunststoffen ist der Abtransport von Spänen, weil es an sehr heißen Oberflächen wieder zum Anschmelzen kommen kann. Der Schneidebereich des verwendeten Fräasers reichte von der Spitze etwa 15 mm nach oben, sodass besonders bei den letzten drei Zustellungen die Gefahr bestand, dass der obere Bereich ohne Klinge an der Kunststoffwandung und an PVC-Spänen reibt und ein Verschmelzen bewirkt. Ein sofortiges Absaugen oder Abblasen der Späne nach dem Abtragen durch den Fräskopf war damit unerlässlich. Teilweise musste bei den letzten Zustellungen, wegen der Tiefe der Fräsbahn, auch mechanisch (mit einem Nagel) mitgearbeitet werden, um alle Späne abblasen oder absaugen zu können.

Parameter des Fräsvorganges:

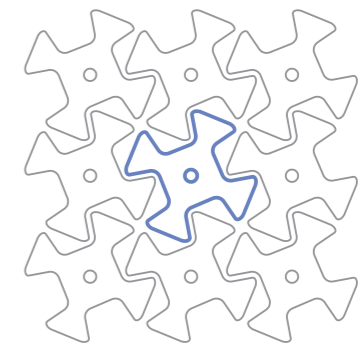
- Fräser: Spiralfräser, \varnothing 4 mm
- Drehzahl 10.000 U/min
- Zustellung 1,5 - 2,0 mm
- Vorschub ca. 1.200 mm/min (20 mm/sec)

Zwar wurden durch leichte Verschiebungen der Platte und in Folge zu starke Beanspruchung zwei Fräswerkzeuge zerstört, generell ist der Verschleiß der Fräswerkzeuge jedoch nicht übermäßig hoch. Letztlich konnten mit den obigen Parametern ca. 40 m Frässtrecke in der 2 cm dicken Hart-PVC-Platte mit nur einem einzigen Werkzeug bewältigt werden.

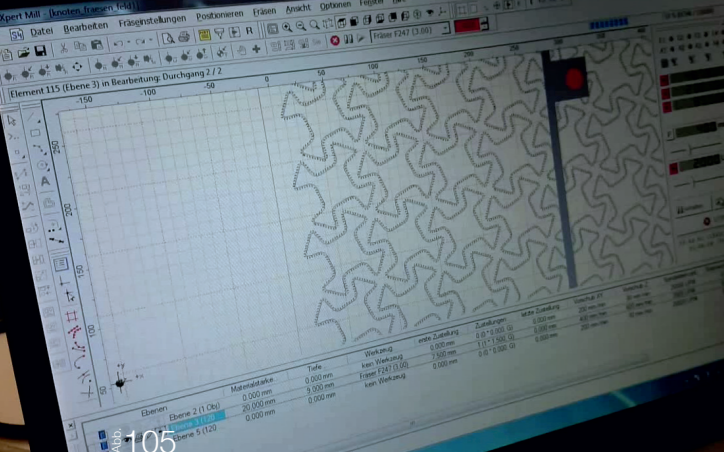
Da die Mittelbohrungen bzw. -fräsungen gut für das Handling beim Fräsvorgang geeignet waren, wurden diese zuerst bearbeitet und für das Festschrauben der Platte am Frästisch verwendet. Auch für das Entnehmen der Teile nach dem Fräsen und vor allem für das Zentrieren zum Verkleben zum Strang wurde die Mittelbohrung verwendet. Die Frästeile wurden anschließend je nach Höhe der benachbarten Module im jeweiligen Knotenpunkt mehrschichtig verklebt. Die PVC-Teile wurden mit einem handelsüblichen Modellbaukleber

verbunden. Der verwendete „UHU Plast Spezial“ ist ein lösungsmittel-basierter Kunststoffkleber, der beidseitig dünn aufgetragen und nach kurzem Ablüften verpresst wird. Die Kunststoffoberfläche wird dabei angelöst, sodass nach dem Verdunsten des Lösungsmittels eine sehr belastbare Verbindung zwischen dem Kunststoff entsteht.

An den dünnsten Stellen der Schale wurden die 2 cm dicken Verbinder einzeln verwendet, während die Anzahl an den Ecken bis zu 8 Schichten (=16 cm) betrug. Die Verbinder an den Rändern wurden entsprechend halbiert. Die Teile in den Ecken wurden ganz belassen, um durch die Mittelbohrung ein höhenverstellbares Auflager anbringen zu können.



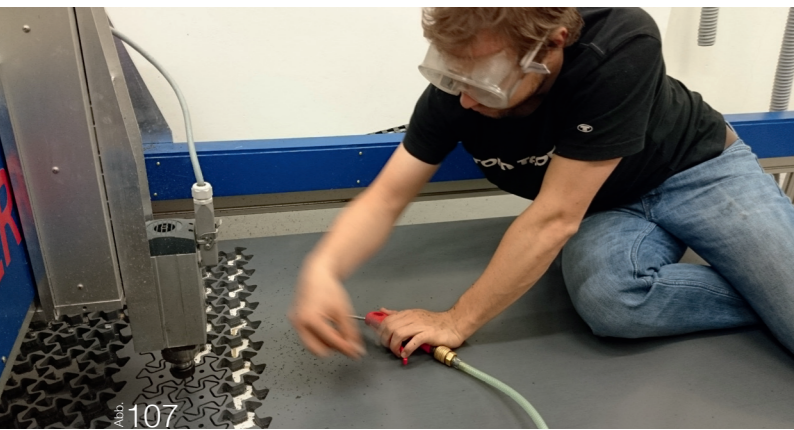
104
Anordnung zum Fräsen mit möglichst geringem Verschnitt



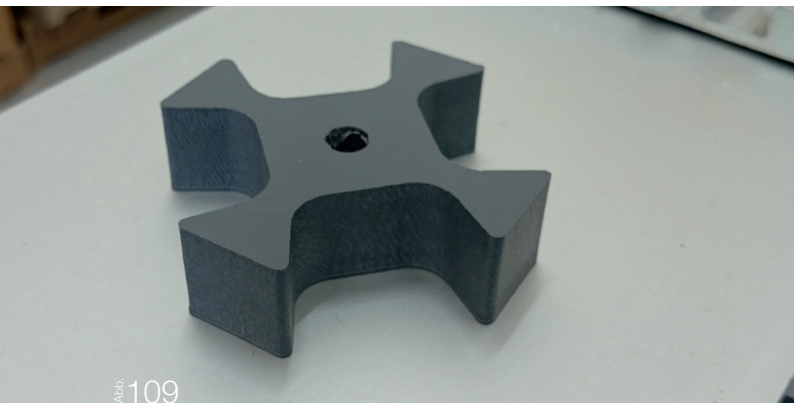
105
Software-Steuerung der CNC-Fräse



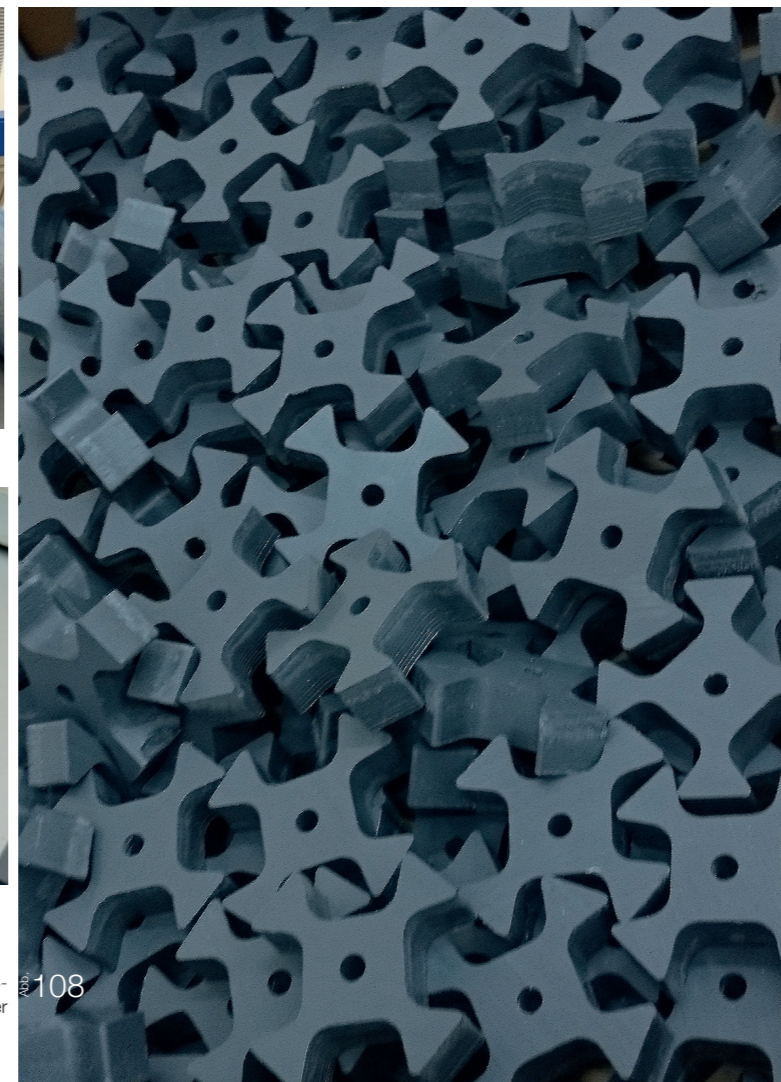
106
Fräsvorgang (1,5mm Tiefenzustellung je Fahrt)



107
Ende des Fräsvorganges



109
Fertiger Verbinder mit nachgebohrtem Loch



108
Fertige PVC-Verbinder



110
Eingesetzter PVC-Verbinder



111
Anordnung auf der Montage-Unterkonstruktion

Prototyp-Montage | Die einzelnen Module und Kunststoffverbinder der Viertelschalen wurden mit einer entsprechenden Unterkonstruktion aus Polystyrol positioniert. Für die Verklebung wurde erst punktuell und dann fugenfüllend Fischer FIS 300 T Injektionsmörtel eingebracht (siehe Abschnitt Fügung/Vorversuche). Dieser Injektionsmörtel weist eine Verarbeitungszeit von etwa 10 min bei Raumtemperatur auf und unterscheidet sich hinsichtlich der Färbung wenig vom ge-

wählten Grau der PVC-Verbinder. Auf der unebenen und teilweise noch porösen Oberfläche der Keramik haftet der Injektionsmörtel gut. Insgesamt beruht die Fügung aber sehr stark auf einem Formschluss. Schon nach etwa 30 min waren die Schalenviertel so stabil, dass sie problemlos vom Unterbau genommen werden konnten.

Um die Passung der Viertelschalen sicherzustellen, wurden zwei Viertelschalen nebeneinander positioniert und verklebt. Die Geradlinigkeit der Modulreihe, an der die Schalen anschließend verbunden wurden, wurde kontrolliert. Markante Längen, wie etwa die Eckabstände, dienten zum Einrichten der Tragwerksteile.

Die Module wurden, dem Modulraster bzw. der Modulzuordnung entsprechend, auf der Hilfskonstruktion aufgelegt. Die Fixierung erfolgte dann nach exakter Ausrichtung von Modulen und Knotenelementen durch das Einbringen von Injektionsmörtel in die Fuge zwischen Verbinder und Keramik. Für das Einbringen wurde eine mit einem flachen Schlauchstück ergänzte Statikmischer-Kartuschenspitze verwendet.

Injektionsmörtel-Systeme (hier Fischer FIS) zeichnen sich durch eine sehr kurze Aushärtezeit aus. Die organischen Komponenten des Injektionsmörtels polymerisieren nach der Mischung sehr schnell, sodass bereits nach einer Verarbeitungszeit von einigen Minuten eine hohe Festigkeit erreicht wird. Bereits nach ein bis zwei Stunden werden je nach System und Hersteller bei Raumtemperatur die Endfestigkeiten erreicht. ⁶¹

Für den letzten Montageschritt, also das Zusammenfügen der Viertelschalen, wurde ebenfalls ein Styroporunterbau angefertigt. So konnte ein exaktes Positionieren der Einzelteile und eine stabile Lage für die Dauer des Aushärtens des Injektionsmörtels sichergestellt werden. Das Verbinden erfolgte gleich wie innerhalb der Schalenviertel: Erst punktuell zur Fixierung der Verbinders und der Positionen der Viertelschalen, dann fugenfüllend, um eine maximale statische Wirkung zu erreichen. Nach einer Aushärtezeit von etwa einer Stunde konnte der Unterbau vollständig entfernt werden und die Schale war bereits so belastbar, dass sie an den vier Eckpunkten angehoben werden konnte.



Abb. 112
Plazieren der Module und Verbinder

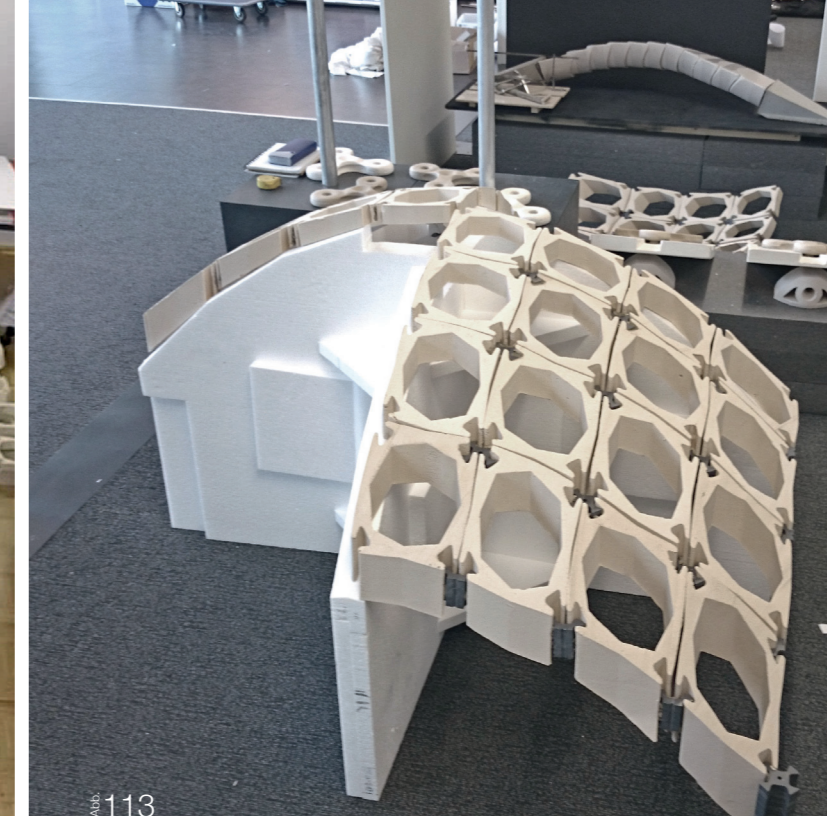


Abb. 113
Zwei fertig verklebte Viertelschalen auf Positionierungshilfe aus Styropor zur End-Montage

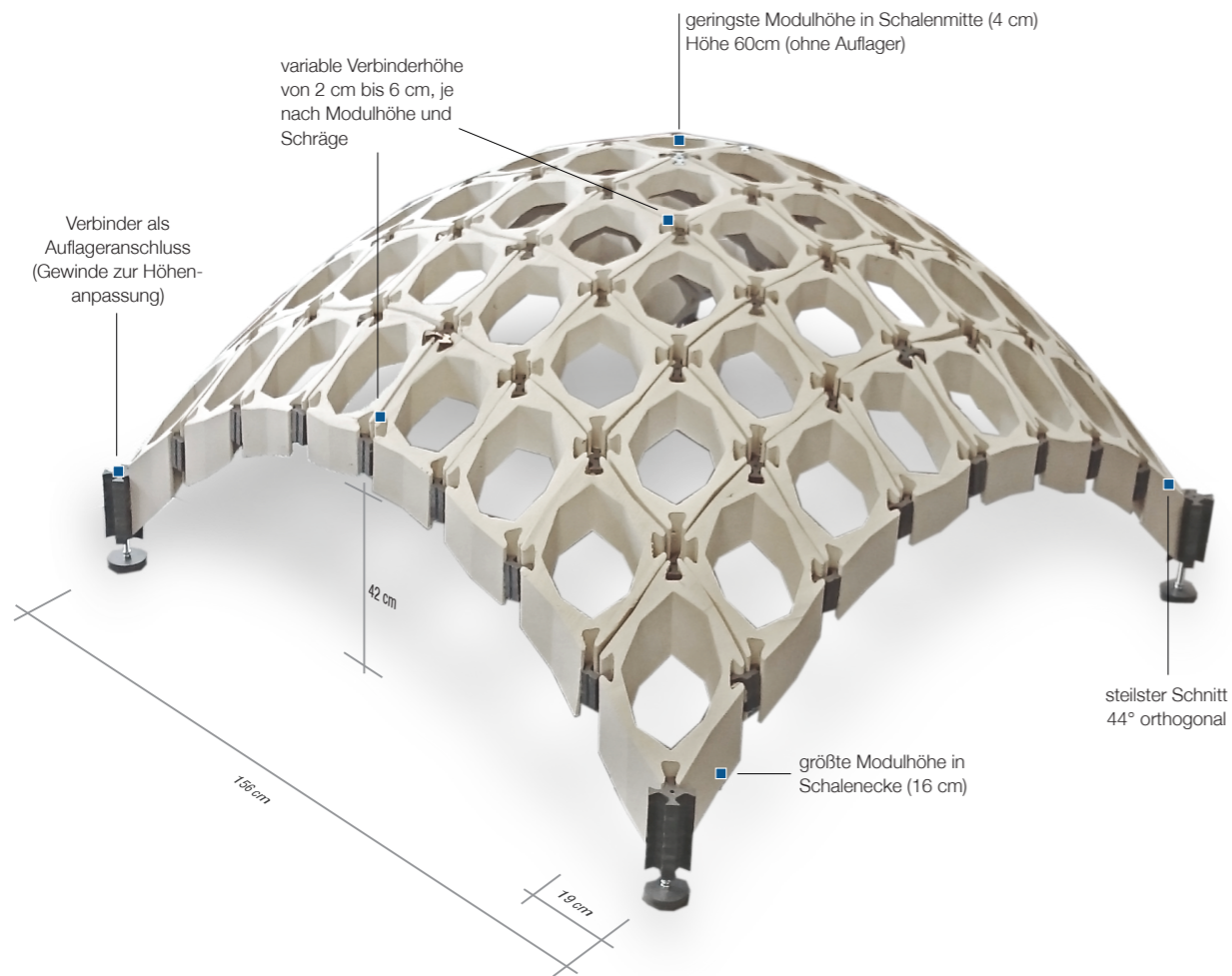


Abb. 114
Gebauter Prototyp und Charakteristika

Eckdaten des Prototypen:

- 64 CeramicTranslation-Baumodule
 - feuchte Tonmasse: 190 kg
 - gebrannte Keramik: 135 kg
 - Verschnitt/Abfall: 0 kg
- 81 Verbindungs-/Anschlussstellen
 - 112 Hart-PVC-Verbinder 10 kg
 - 4 Auflagerscheiben 10 cm
 - Injektionsmörtel (3.600 mL) 7 kg
 - 4 Gewindestäbe M8 je 15cm lang
- Gesamter Prototyp 152 kg

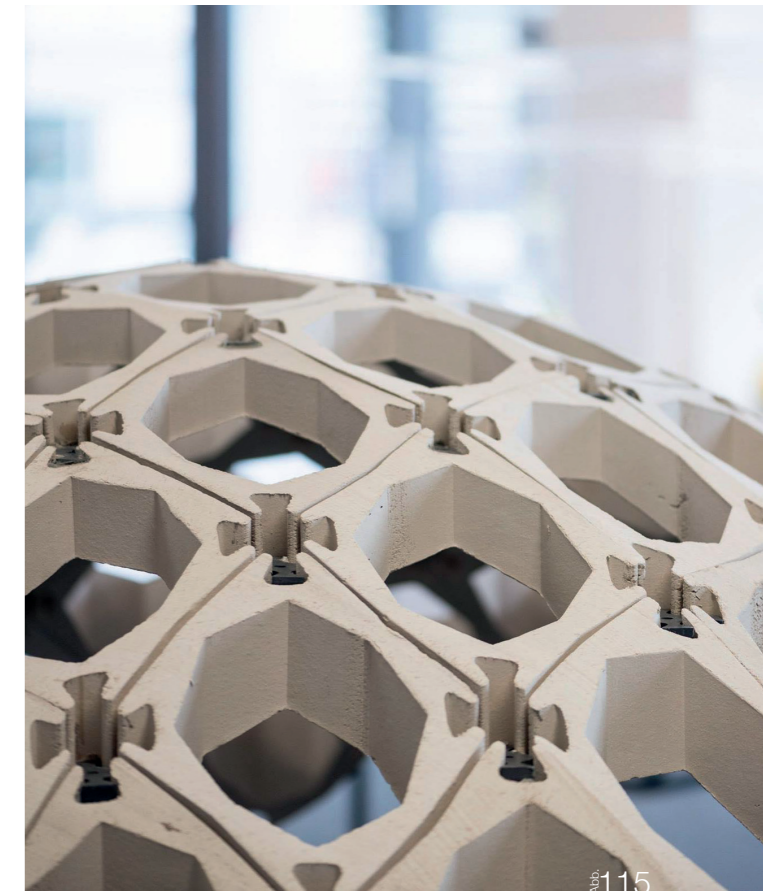


Abb. 115
Gebauter Prototyp, ausgestellt im Designforum Steiermark



Abb. 116

Ausstellung des Prototypen
(Designforum Steiermark)
im Rahmen des
Design-Monat Graz 2015



Ausgestellter Prototyp mit
Konzepterläuterungen 117

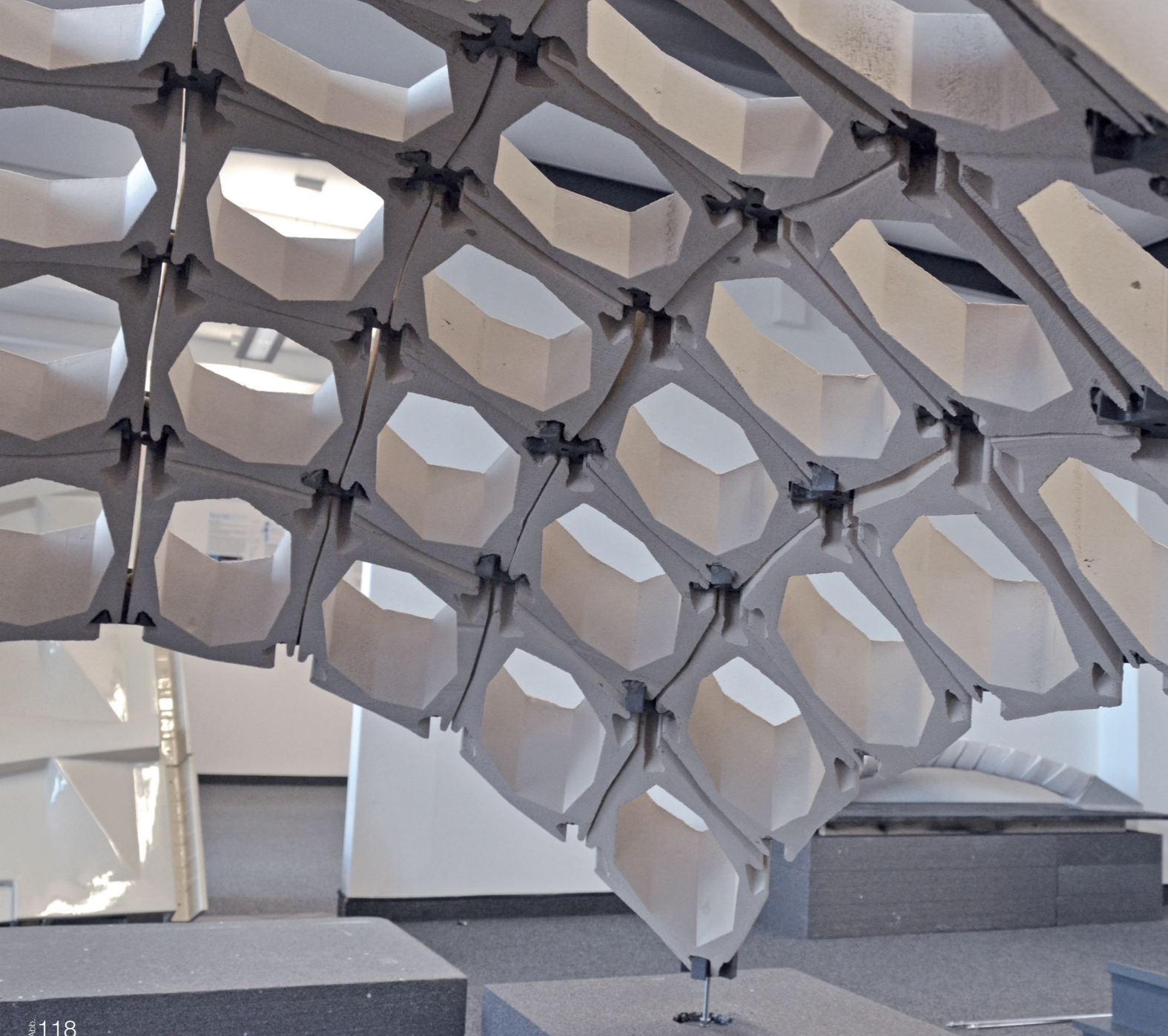


Abb. 118

Untersicht des Prototypen



Abb. 119

Spannweite von etwa 1,5 m



4.8 Weiterentwicklung

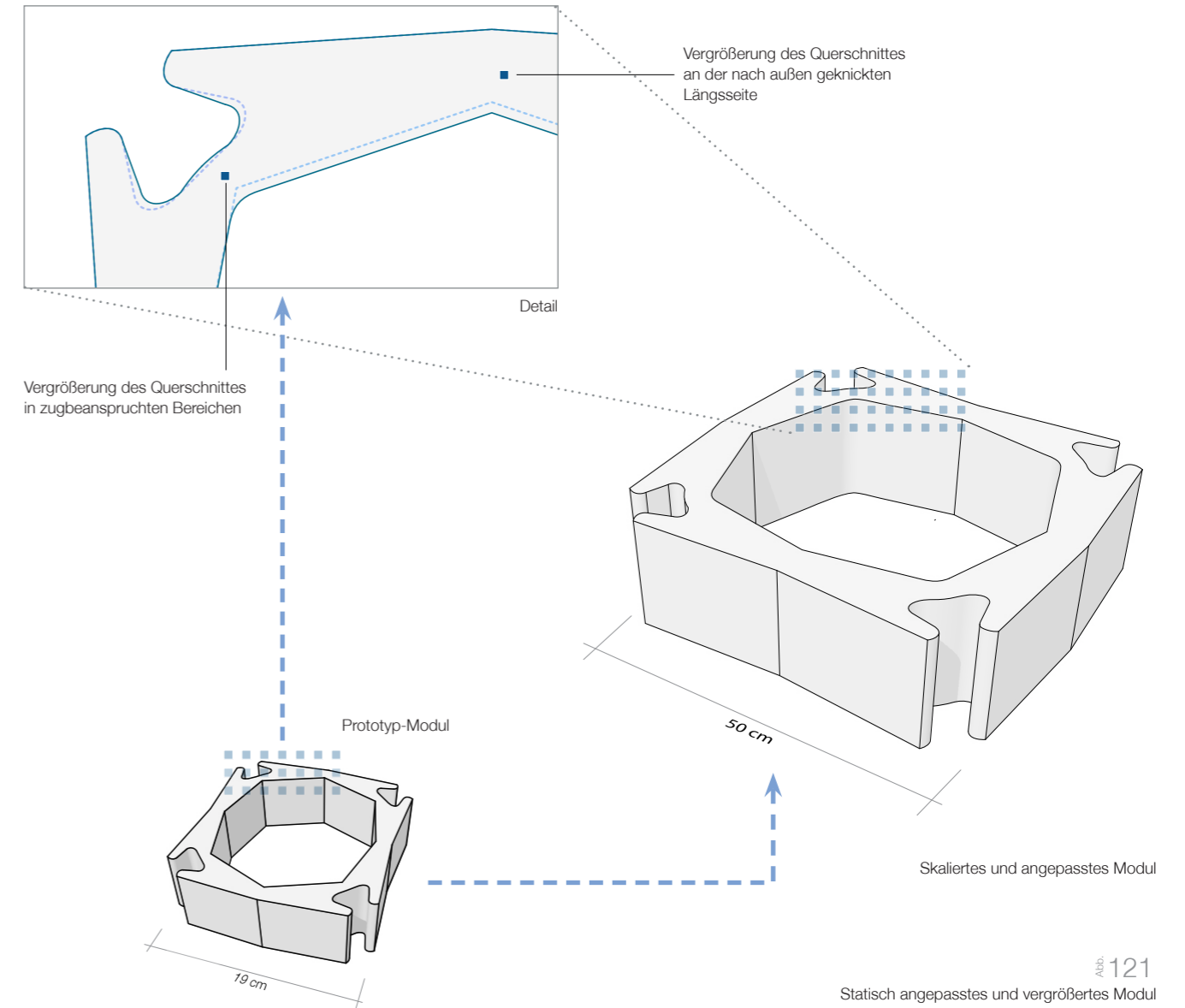
Statische Anpassung der Modulform | Aus den FE-Berechnungen (Punkt 5.7) und den Belastungsversuchen (Punkt 5.2) sind in statischer Hinsicht zwei Optimierungspunkte des Moduls ersichtlich. Durch geringfügige geometrische Anpassungen in diesen Punkten kann die Zugspannung herabgesetzt und damit die Tragkraft eines Tragwerks vergrößert werden.

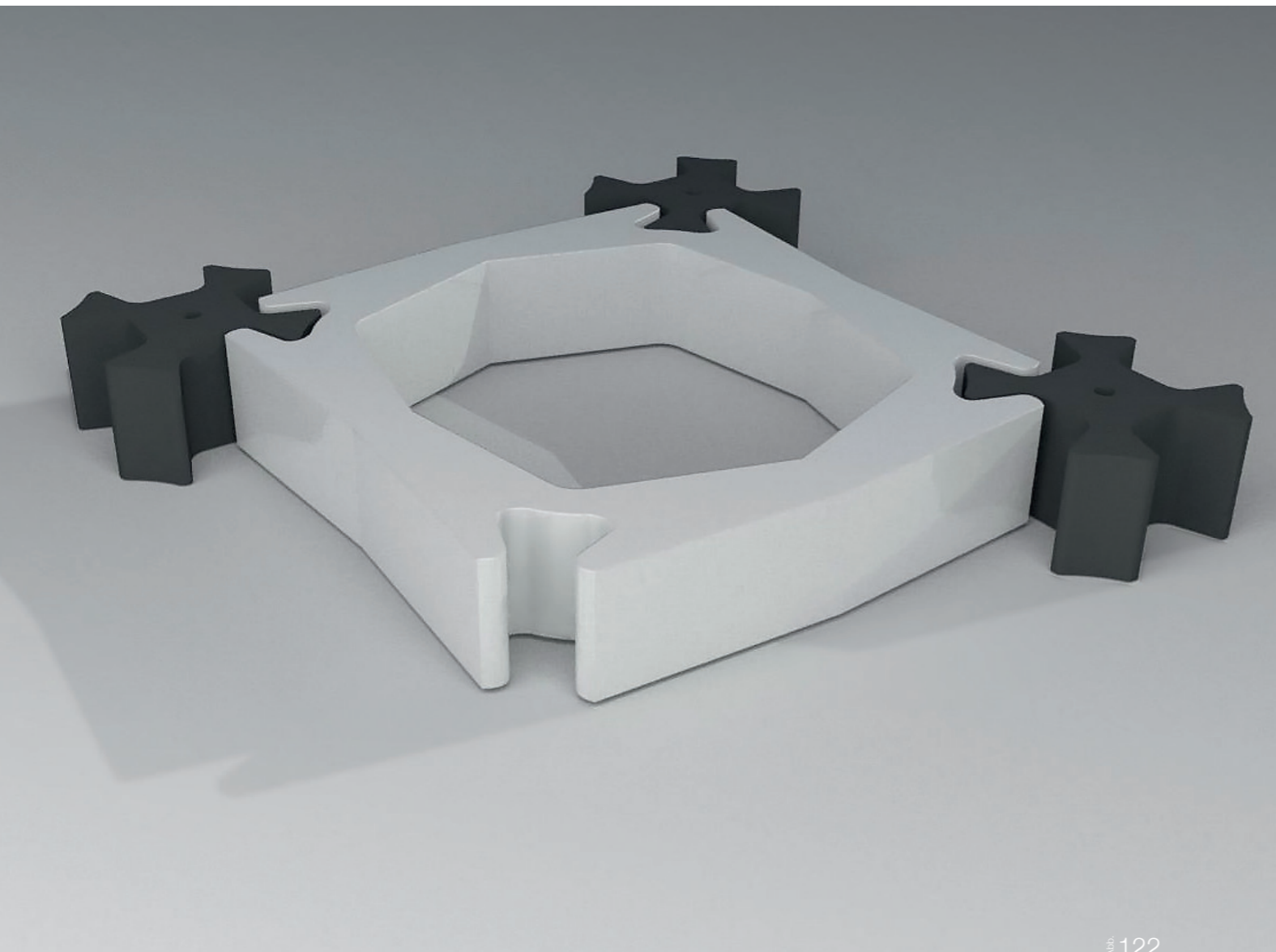
- Die nach außen knickenden Längsseiten des Moduls wurden etwas verstärkt, sodass die Beanspruchung etwa gleich groß wie auf der nach innen geknickten Modulseite ist.
- Die Ausnehmung zur Aufnahme des Verbinders kann optimiert werden und die Querschnitte an den am stärksten beanspruchten Stellen in der Ecke wurden vergrößert.

Modulgröße | Für eine praktikable Anwendung des Bausystems in größerem Maßstab ist eine Vergrößerung der Bauteile sinnvoll. Dadurch wird die Anzahl der Einzelteile erheblich reduziert. Gleichzeitig kann durch die größeren Öffnungen die Modulhöhe vergrößert werden, ohne den Lichteinfall zu verringern. Damit wird die maximal mögliche Spannweite ebenso vergrößert. Das Skalieren ist durch gewisse Rahmenbedingungen jedoch nur bis zu einem gewissen Grad möglich bzw.

sinnvoll. Verfügbare Strangpressen sind auch in der industriellen Fertigung in der Größe begrenzt. Die maximalen Abmessungen der Extrusionsöffnungen, und damit der Matrize, liegen im Bereich von 50 cm und stellt damit produktionstechnisch die Grenze für das Vergrößern dar (größtes Ziegelformat, Wienerberger AG).

Je nach Größe des Tragwerks bzw. der Spannweiten sollte auch die Tragwirkung der Gitterschale möglichst noch einem Flächentragwerk entsprechen. Dies ist durch eine geeignete Wahl der Größe - und damit der Knotenanzahl und „Maschenweite“ - möglich. Verglichen mit dem Prototypen kann durch die Vergrößerung eine gegebene Spannweite mit einer um 85 % geringeren Anzahl an Modulen und Verbindern überspannt werden. In ähnlichem Maße verringert sich damit auch der Montage-Aufwand.





Visualisierung: Statisch angepasstes, weiß glasiertes 50 x 50 cm Modul mit Verbindern

Moduloberfläche | Alle sichtbaren Flächen bzw. alle Flächen bis auf die Kontaktflächen zu den Verbindern sollen letztlich eine Glasur aufweisen. Neben einer Verbesserung der Optik kann dadurch auch eine statische Verbesserung erreicht werden, weil oberflächliche Risse geschlossen werden, von denen bei Belastung evtl. Brüche ausgehen könnten. Durch die Glasur wird auch die Frostbeständigkeit erhöht, weil durch die völlig dichte Beschichtung keine Wasseraufnahme mehr möglich ist.

Variationen der Modulform | In formaler Hinsicht sind die vielfältigen Möglichkeiten des Systems in der Masterarbeit „Ceramic Translation - Teil II - Variation und Ausformung“ weitergehend ausgearbeitet und dargestellt. Unter Beibehaltung der entwickelten Grundprinzipien von CeramicTranslation wurden vielfältige Variationen und Adaptionen der Form der Module und der Verbindersprofile entwickelt.

Variationen des Bausystems | Ebenso sind in „CeramicTranslation - Teil II - Variation und Ausformung“ weitergehende Variationsmöglichkeiten von Systemparametern dargestellt. So lassen sich etwa die quadratischen Tragwerke durch Veränderung von Winkeln und Längen der Module in rechteckige oder rautenförmige überführen.

61 http://www.fischer.at/PortalData/1/Resources/service/sales-documents/documents/2012-05-31-FISV_106367-de.pdf, abgerufen am 22.08.2016

Keramik weist außerordentliche Eigenschaften auf. Aus kaum einem anderen Baustoff können so einfach sehr leistungsfähige Module hergestellt werden. Keramik kann Witterungseinflüssen nahezu unbeschadet über viele Jahre widerstehen. Bezogen auf Kosten, Gewicht und Haltbarkeit weist kein anderer Baustoff eine solche Druckfestigkeit, die bei entsprechend geformten Einzelementen vielfältigsten statischen Anforderungen gerecht werden kann, auf.

5

Statische Aspekte Tragwerksbeurteilung von CeramicTranslation

Im folgenden Kapitel sollen Details der Statik von mit CeramicTranslation konstruierten Tragwerken erläutert werden. Nach der Behandlung von einigen Detailpunkten, die Besonderheiten des Systems darstellen, wird zu einer Betrachtung des Gesamttragwerks übergegangen. Im kleineren Maßstab ist dabei vornehmlich die Fügung von entscheidender Bedeutung. Für die Gesamtstruktur ist die Tragwerksform maßgeblicher und wie weit diese den unter Kapitel 3 dargestellten Prinzipien folgt.

Im ersten Teil wird die Fügung in statischer Hinsicht analysiert und die Verwendung der Knotenelemente als Lager zur Krafteinleitung, -weiterleitung und -ableitung beschrieben.

Um genauere, realitätsnahe Einblicke zu erhalten, wurden dann mehrere Belastungsversuche an Modellsystemen vorgenommen. Die meisten Erkenntnisse zur Weiterbearbeitung sind dabei aus dem Biegezugversuch eines Einfeldträger-Modellsystems hervorgegangen. Aus dem Verformungs- und Bruchverhalten ließen sich Punkte für statische Verbesserungen ableiten, und andere wesentliche Erkenntnisse zur Belastbarkeit gewinnen.

Zur weiteren Analyse des Bruchverhaltens wurde eine FE-Simulation eines detaillierten mechanisch-geometrischen Modells vorgenommen, das auch eine Visualisierung von Beanspruchungen und Verformungen erlaubt.

Die so gewonnenen Belastungsgrenzen wurden dann mit weitergehenden FE-Simulationen abgeglichen, sodass letztlich anhand eines statischen FE-Modells eine Bemessung und Beurteilung von verschiedenen geformten Tragwerken in ebenso vielfältigen Lastsituationen ermöglicht wird. Von diesem justierten statischen Modell wurde dann bei einer Untersuchung des Prototypen und des entworfenen Forschungspavillon Gebrauch gemacht. Für beide Tragwerke wurden verschiedene Lastfälle und die Auswirkungen auf das Tragsystem untersucht.

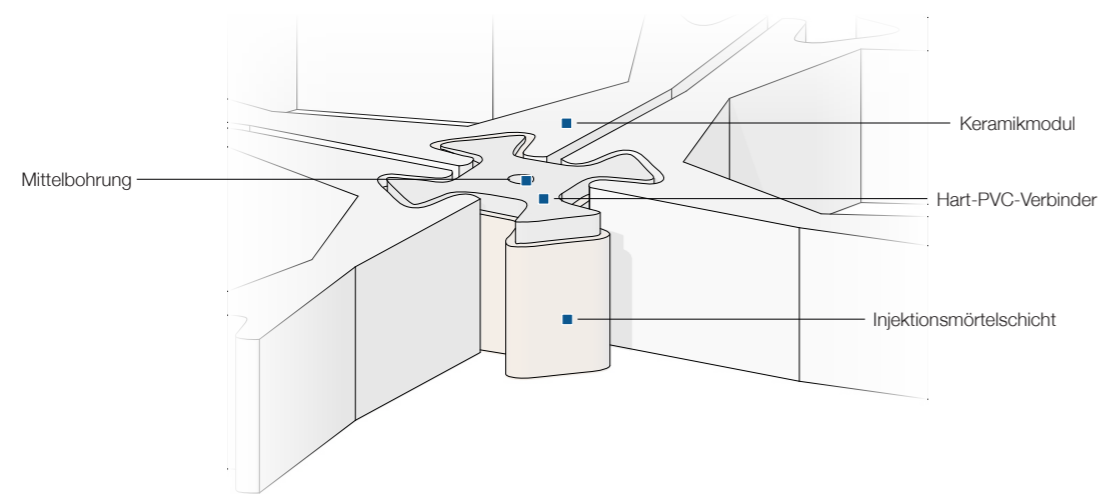
5.1 CeramicTranslation: Statische Aspekte der Knoten

Fügeprinzip | CeramicTranslation unterscheidet sich auf Grund der Modulgeometrie und der Modulfügung von klassischen Keramikgewölben bzw. Bögen, da letztlich alle Kontaktflächen senkrecht stehen. Auch bei günstigen Tragwerksformen treten neben den Druckkräften auch Scherbeanspruchungen aus der Querkraft auf.

Die Scherkräfte werden durch die Haftwirkung des Injektionsmörtels und durch einen Mikroformschluss (Porosität und Strukturen der Keramik und durch Strukturen am PVC-Verbinder) vermittelt. Die Knotenelemente, die aus Hart-PVC gefertigt sind, können eine Druck- oder Scherbelastung bei der gewählten Dimensionierung in der Regel gut aufnehmen und weitergeben.

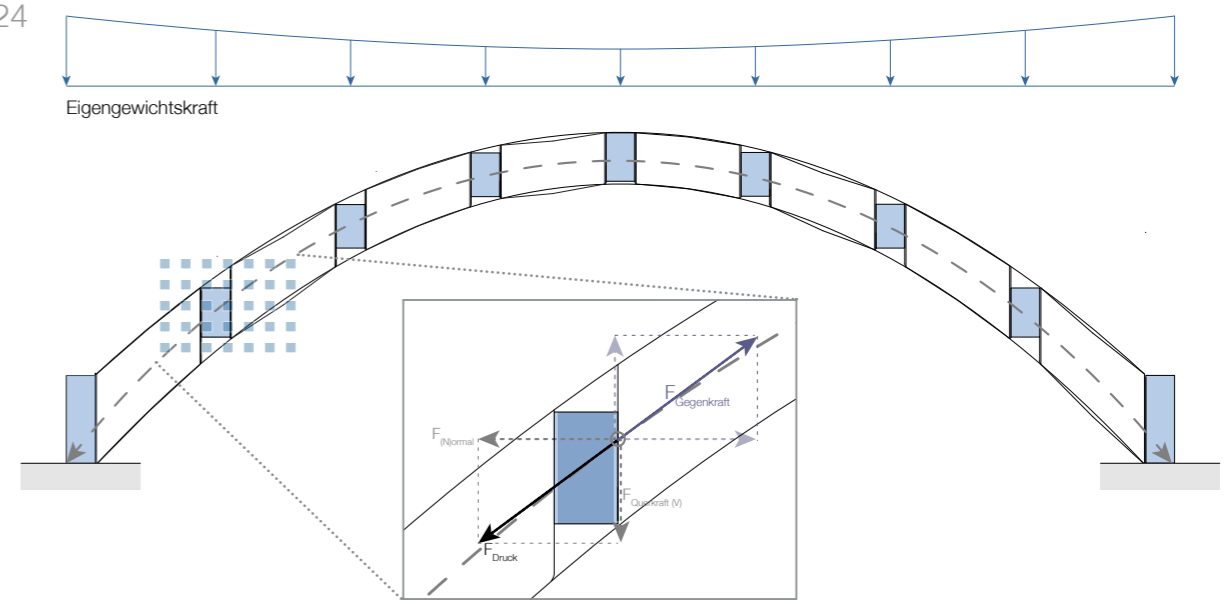
Knotenelement: Aufbau der Verbindung der Keramikmodule über PVC-Knotenprofil und Injektionsmörtel

Abb. 123



Kräfte in der Schale: Die in guter Näherung parabelförmige Drucklinie läuft in der Schale. Das Kräfteparallelogramm an einem Verbinder zeigt die Zerlegung in Normalkraft und Querkraft.

Abb. 124



Die Ableitung der Gewichtskraft erfolgt idealerweise als Druckkraft. Diese kann in die Normalkraft zwischen Modul und Verbinder und eine Querkraft zerlegt werden. Dadurch wird ersichtlich, dass in der Verbindung aus der Druckweitergabe eine Normalkraft und eine senkrecht wirkende Querkraft resultiert. Die Querkraft und die entsprechende Gegenkraft bewirken eine Scherbeanspruchung, insbesondere in der Fügung.

Mit zunehmenden Schnittwinkeln zu den Auflagern hin, wird diese Scherkraft größer. Zum einen steigen die Druckkräfte zum Auflager hin, zum anderen vergrößert sich der Winkel der Kräftezerlegung. Diesem Umstand wird beim Prototypen auch durch mehr Kontaktfläche durch die größere Höhe von Modul und Verbinder zum Auflager hin Rechnung getragen.

Anschlüsse an die Knoten | Neben der Aufgabe der Fügung der Keramikmodule kommen den Knotenelementen weitere Funktionen zu. Die regelmäßige, rasterförmige Verteilung der Knoten, bis hin zum Rand, bietet vielfältige Möglichkeiten zur Verwendung. Über eine zentrale Bohrung in jedem Knoten können z.B. an der Oberseite Halterungen für Eindeckungen angebracht werden (siehe „CeramicTranslation - Teil II - Variation und Ausformung“). Ebenso können externe Zugelemente wie Unterspannungen oder Ähnliches angeschlossen werden.

Auflager | Eine wesentliche Funktion, die den Knoten zukommt, ist jedoch immer die Lagerung, weil Anschlüsse an das Keramikmaterial selbst sonst nur schwer herstellbar sind. Bohrungen sind kaum möglich bzw. bei vielen Mechanismen würden ungünstige Punktbelastungen entstehen. Die Anzahl und Verteilung der Auflagerpunkte sind vom konkreten Anwendungsfall und der Form abhängig. Gut können jedenfalls die Rand- und Eck-Module für den Auflageranschluss verwendet werden, weil Horizontalkräfte gut abgeleitet werden können.

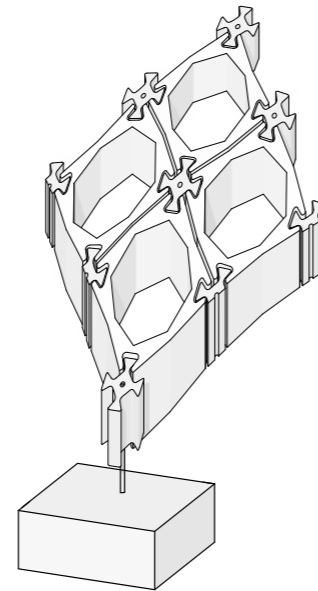


Abb. 125
Verwendung eines Verbinders zur senkrechten Lastableitung zu einem Auflager

Die Abbildung 125 entspricht den Auflagern des Prototypen, bei dem ein einziger Knoten an jedem der vier Ecken zum Anschluss der Auflager dient. Dieser Anschluss der Auflager über die Gewindeanschlüsse bietet sich als höhenjustierbare Lagerung an. Für das Ableiten von Horizontalkräften ist eine solche Lagerung bei entsprechender Dimensionierung der Gewinde und einer Einspannung geeignet. Die am Gewinde auftretenden Scherkräfte oder resultierende Momente können vermieden werden, wenn die Lagerung in Höhe der Drucklinie angreift. Beim entworfenen Forschungspavillon wird dies durch eine komplementär zum Eckverbinder geformte Fassung realisiert.

Abhängig von der Form des Tragwerks können die Beanspruchungen in einer Translationsgeometrie durch unverschiebliche Auflager teilweise erheblich reduziert werden. Ein Vergleich zwischen verschieblicher und unverschieblicher Lagerung wird für den Prototyp unter 5.11 angestellt.

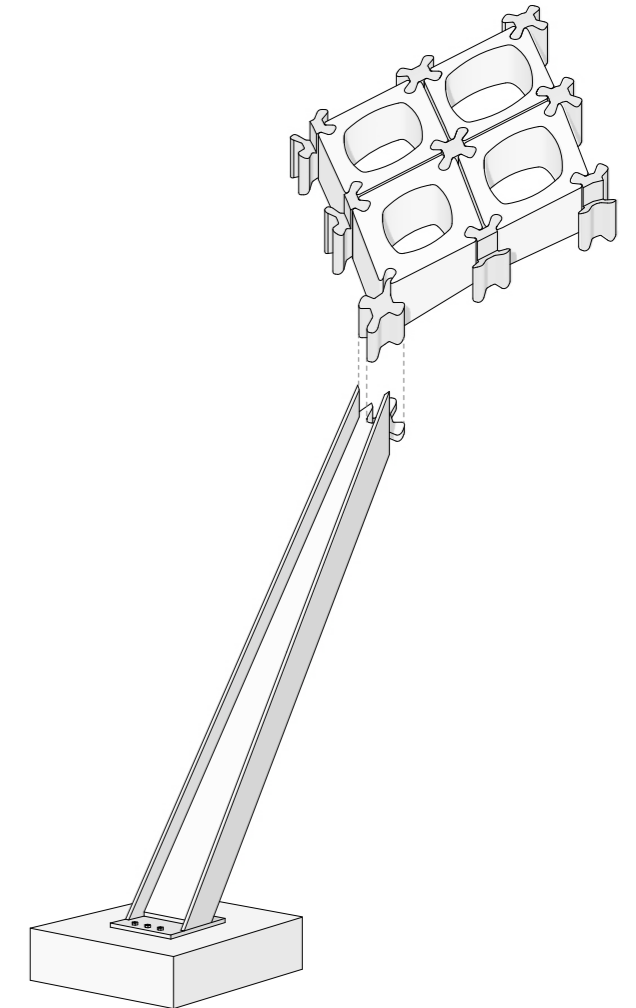


Abb. 126
Knotenfassung für Eckmodul am Stützenkopf, Stütze schubstarr gelagert

5.2 Erste Belastungsversuche

Modul und Material | Es wurden Vorversuche unternommen, um die Belastbarkeit der Module zu evaluieren und Ansatzpunkte für Verbesserungen zu finden. Bei ersten Tastversuchen, wie in Abbildung 127 gezeigt, konnte das Modul bei einem Abstand der Auflager von 14 cm mittig mit etwa 1.500 N ohne Bruch belastet werden und gibt damit einen Hinweis auf die Biegezugfestigkeit des Keramikmaterials.



Abb. 127
Einfacher Belastungstest am Modul

Fügung und Modul | Ein erster Belastungsversuch der Fügung ist in Abbildung 130 gezeigt. Dabei wurden drei Module mit Fischer VIS 300 T und jeweils mit einem 2 cm hohen PVC-Verbinder je Knotenpunkt zu einem Träger gefügt. Zur gleichmäßigen Lasteinleitung wurden sowohl an den Auflagern wie auch an den Belastungspunkten XPS-Formstücke als Puffer verwendet. Die Spannweite betrug 45 cm. Die mittige Belastung wurde mittels zunehmender Gewichtskraft (10 N-Schritte mittels Wassermenge) bis 350 N gesteigert (Abbildung 129). Durch die Aufhängung wurde die Kraft gleichmäßig auf beide Keramikstege verteilt. Bis zu der zuvor genannten Belastung von 350 N ist es zu keinem Bruch gekommen.



Abb. 128
Überspannende Konstruktion aus drei Modulen



Abb. 129
Einfacher Belastungstest an Brückenkonstruktion (Wassergewichte)

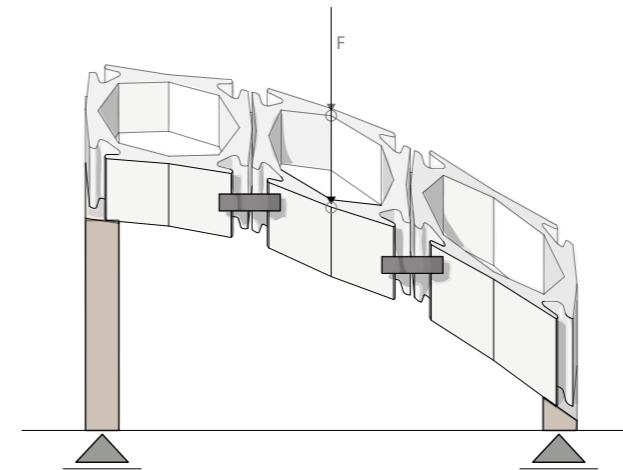


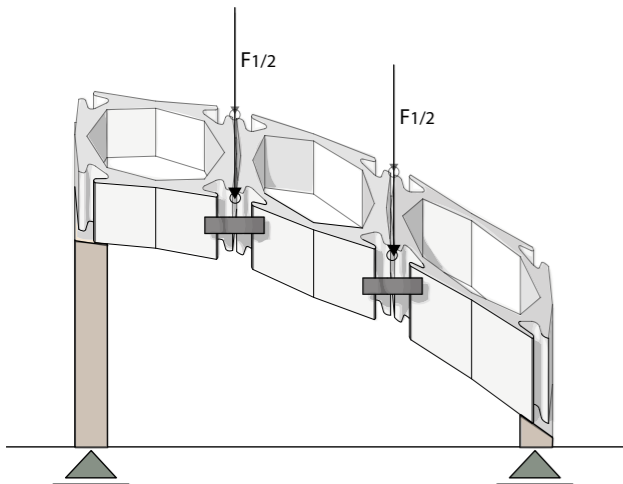
Abb. 130
Skizze: Belastungstest an Brückenkonstruktion



131
Zerstörende Belastung an Brückenkonstruktion



132
Bruchstellen



133
Einfacher Belastungs-Test an Brücken-Konstruktion

Eine höhere Belastung wurde mit der Versuchsanordnung nicht aufgebracht, weshalb die Brückenkonstruktion mit den gleichen Auflagern wie in Abbildung 130 qualitativ weiter belastet wurde (Abbildung 131). Bei einer Gesamtlast von etwa 600 N erfolgte der Bruch (Abbildung 134 und 135),



134
Bruchstelle am Verbinder, ausgehend von der inneren Kerbstelle



135
Bruchstelle im Eck des Moduls

Primär war ein Bruchverhalten, wie in Abbildung 134, zu beobachten. Der kleeblattförmige Verbinder hat an der Unterkante der Keramik zu einem Bruch durch Zugbeanspruchung geführt. Der Ausgangspunkt für das Versagen der Keramik war die in Abbildung 134 gekennzeichnete Kerbstelle in der Fügung. Die Rissausbreitung scheint dann durch Materialinhomogenitäten innerhalb eines Bereiches variabel.

Der in Abbildung 135 gezeigte Bruch über die Moduldiagonale ist erst nach dem Versagen des Trägers aufgetreten.

Aus dem beobachteten Bruchverhalten waren bereits einige Ansatzpunkte für statische Verbesserungen der Modulform ersichtlich (Kapitel 4.8). Es konnte auch das Haftverhalten des Injektionsmörtels an Keramik bzw. PVC beurteilt werden. Der Injektionsmörtel konnte mechanisch wieder sehr gut von den PVC-Oberflächen gelöst werden, was prinzipiell die Wiederverwendung bzw. das Recycling der Kunststoffteile ermöglicht.

Biegezugversuch Einfeldträger

5-Modul Einfeldträger | Zu Analysezwecken wurde ein Einfeldträger aus fünf ebenen Modulen gebaut. Die Module wurden ebenso, wie die des Prototypen, bei 1200 °C gebrannt. Bei diesen Brenntemperaturen wird eine nahezu vollständige Versinterung und eine hohe Festigkeit erreicht (Restwasseraufnahme von ca. 3 %). Die Brenntemperatur wurde so gewählt, dass mit der verwendeten Tonmasse die höchste zu erwartende Festigkeit erreicht werden konnte.

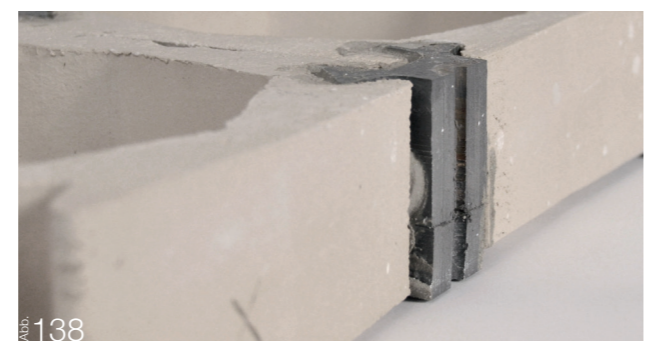
Es wurden die gleichen Hart-PVC-Verbinder wie beim Herstellen des Prototypen verwendet. Da die RFEM-Simulationen gezeigt haben, dass die Verformung der Verbinder im Wesentlichen die Verformung des Trägers bestimmen, wurden die Randverbinder halbiert. Ganze Knoten an beiden Holmen würden eine nicht proportionale Verringerung der Durchbiegung bewirken, da sich der effektive PVC-Querschnitt gegenüber der Keramik verdoppeln würde. Die Verbinder und die Module wurden mit Fischer VIS 300 T Montagemörtel vollflächig verklebt.



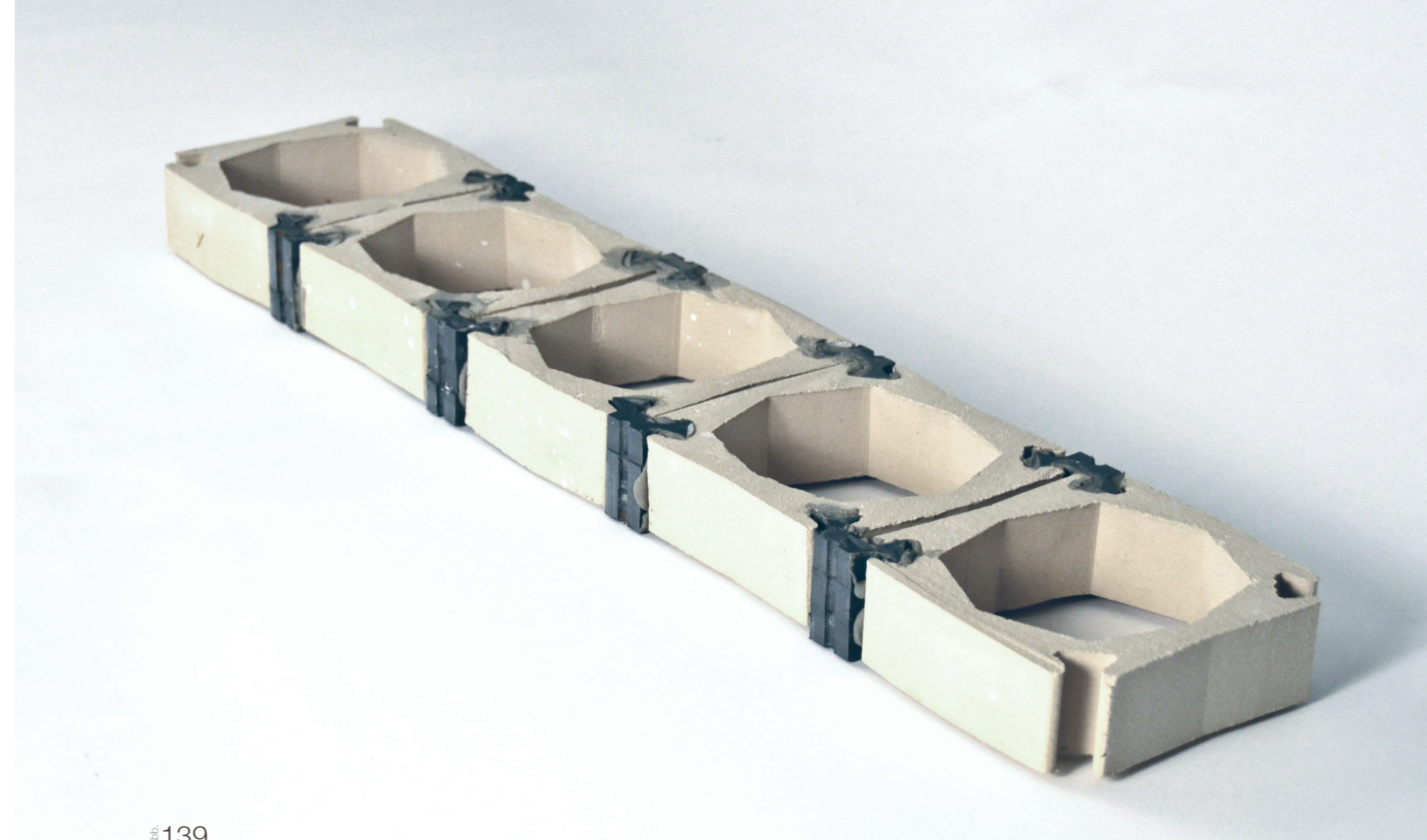
136
Gerade geschnittene Module für Einfeldträger



137
Halbierter Knoten für den Einfeldträger vor der Verklebung



138
Knoten und Verklebung auf ganzer Höhe der Keramik



139
Fertiger Einfeldträger aus fünf Modulen für den Biegeversuch

Bei einer ungeraden Anzahl von Modulen ergeben sich, durch die formbedingte Moduldrehung, zwei mögliche Anordnungen. Je nach Anordnung des mittleren Moduls ist lt. Simulation mit einem geringen Unterschied in der maximalen Belastbarkeit der Modulmitte zu rechnen. Beim Träger wurde bewusst die ungünstigere Variante gewählt, um eventuelle Schwächungen in die Auswertung mit einbeziehen zu können.



Abb. 140

Einzelträger im 3-Punkt-Biegezugversuch #1

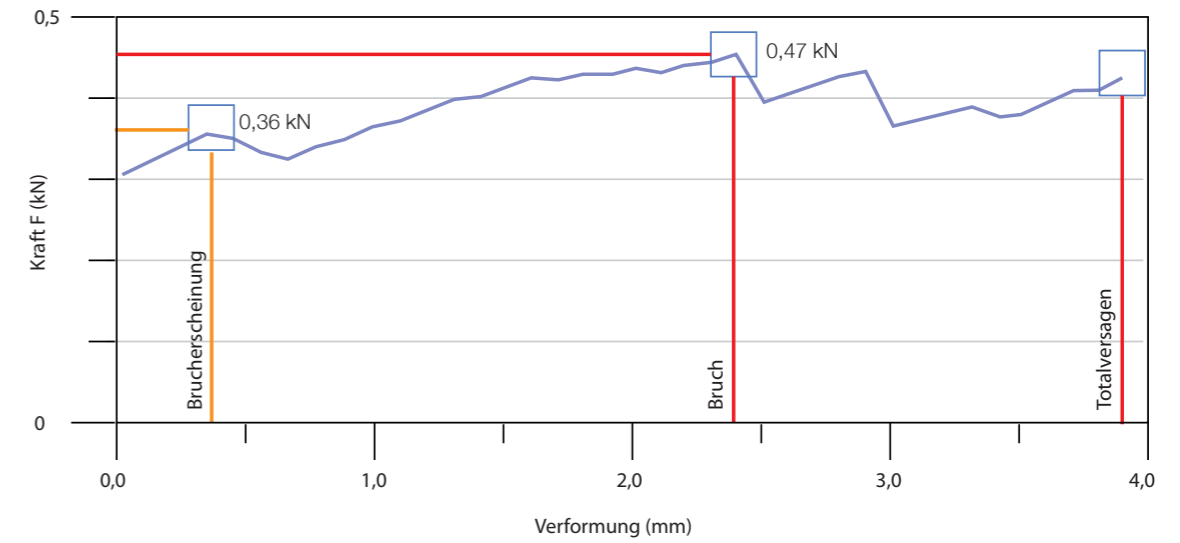


Abb. 141

Belastungs-/Biegediagramm des 5-Modul-Einzelträgers | #1

Der gebaute Träger wurde anschließend in einem Biegezugversuch auf einer Testmaschine (Walter + Bai AG, SBP 300 - Prüflabor Graz Korösi) bis zum Bruch belastet. Das Bruchverhalten des Einzelträgers zeigte eine gewisse Komplexität: Es kommt während der zunehmenden Belastung zur Verformung und zu kleinen Brüchen, etwa in der Mörtelschicht, was als akustisches „Knacken“ wahrgenommen wird. Auch noch nach dem Auftreten erster kleiner Brucherscheinungen in der Keramik konnte die Belastung noch weiter gesteigert werden.

Selbst nach dem Bruch der Keramik in den Verbindungsstellen fällt der Träger nicht sofort zusammen. Mörtel, Restkeramik und evtl. der zweite Holm konnten eine gewisse Resttragkraft aufrechterhalten, bis zum Totalversagen. Es wurde beobachtet, dass der Verbinder durch den Schichtaufbau nicht immer als Ganzes wirkt und so die Fügung nicht immer als Ganzes versagt.

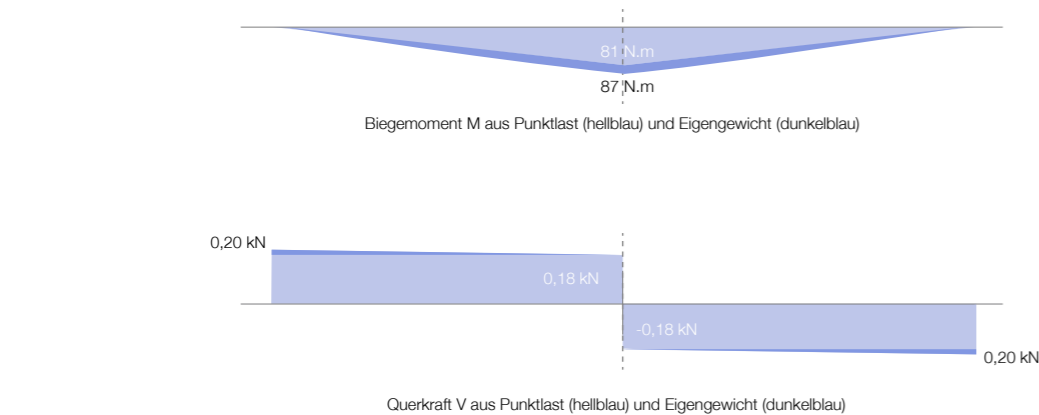
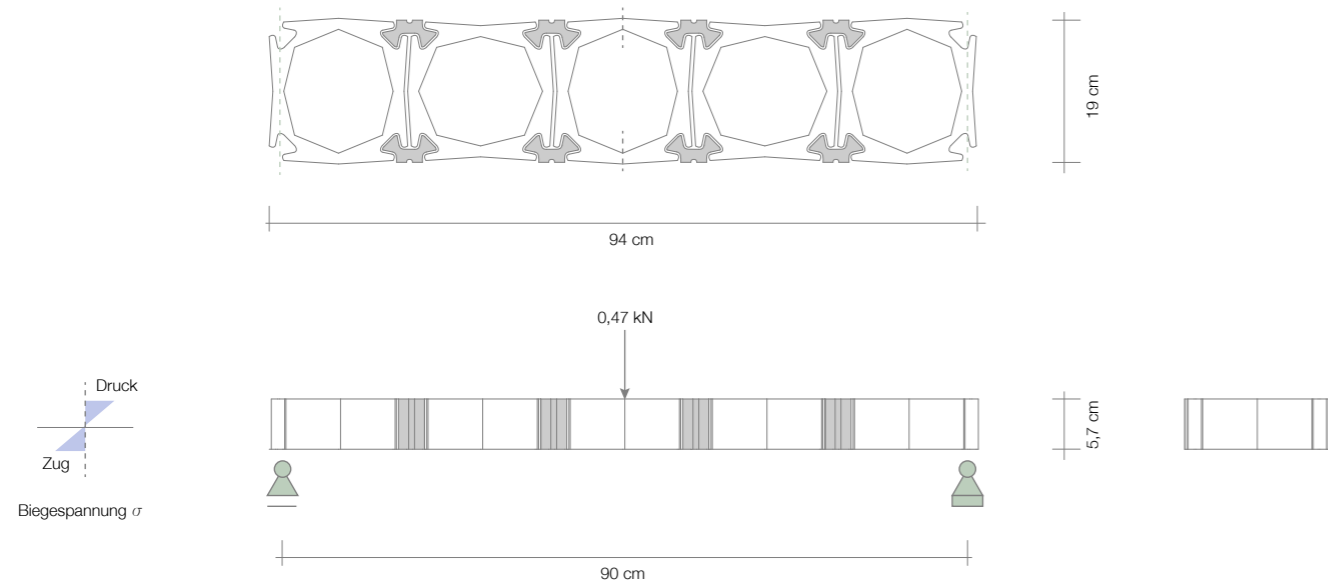


Abb. 142
Geometrie (M1:10) und Kräfte im Einfeldträger als 1,5D-Modellsystem

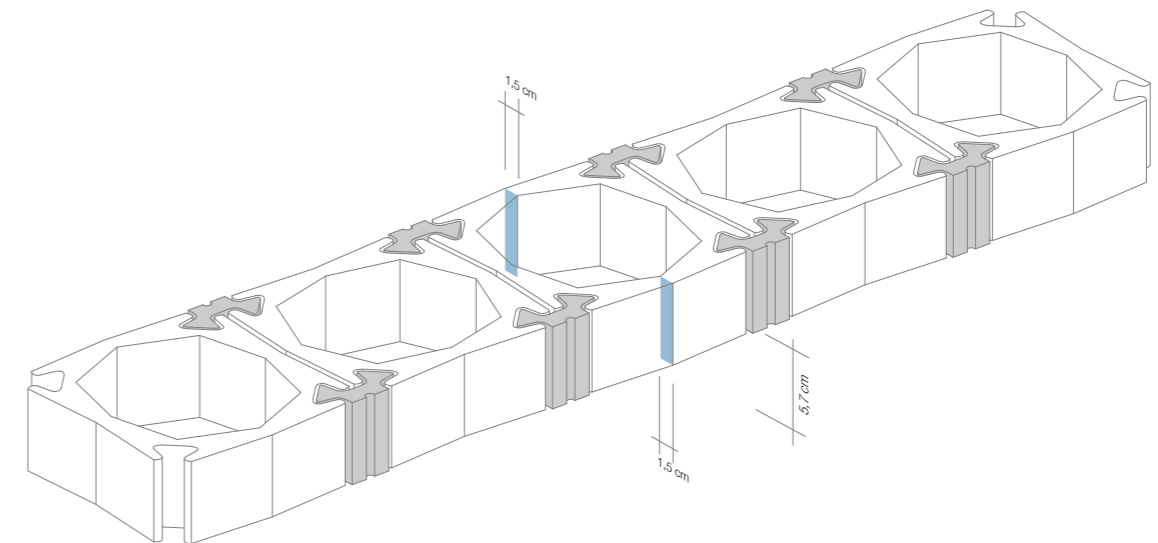


Abb. 143
Effektiver Keramik-Querschnitt in Trägermitte ($2 \times 8,25 \text{ cm}^2 = 16,5 \text{ cm}^2$) und für Verformung relevante PVC-Querschnitte (je 9 cm^2)

Schnittkräfte und Zugspannung | Die Schnittkräfte, die im belasteten Einfeldträger herrschten, wurden ermittelt. Über eine Betrachtung der Trägermitte als rechteckigen Keramik-Querschnitt kann die Zugbeanspruchung, wie nebenstehend, mit $5,4 \text{ N/mm}^2$ berechnet werden. Bei dieser Zugbelastung der Keramik ist es an dieser Stelle des geringsten Querschnittes nicht zum Bruch gekommen, woraus eine Mindestbiegezugfestigkeit des Tonmaterials abgeleitet werden kann.

$$\begin{aligned}
 W &= b \cdot h^2 / 6 \\
 &= 2 \times 1,5 \text{ cm} \times (5,7 \text{ cm})^2 / 6 \\
 &= 16,24 \text{ cm}^3 \\
 \sigma_u &= M / W \\
 &= 0,87 \text{ N.cm} / 16,24 \text{ cm}^3 \\
 &= 0,054 \text{ N/cm}^2 = 0,54 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

3-Modul Einfeldträger | Mit dem verbleibenden, unbeschädigten Rest des Trägers wurde ein weiterer Biegezugversuch durchgeführt. Die Absolutwerte sind wegen der geringeren Spannweite nicht mit dem 5-Modul-Träger vergleichbar. Die Belastbarkeit liegt in der selben Größenordnung, eventuell sogar etwas höher. Das generelle Verhalten mit vorhergehenden Brucherscheinungen und erst späterem Totalversagen hat sich ebenso wie beim Einfeldträger aus fünf Modulen abgezeichnet.

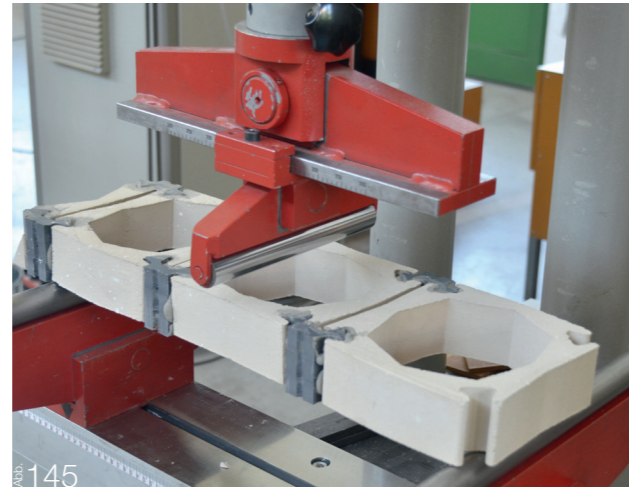


Abb. 145
Einfeldträger im 3-Punkt-Biegezugversuch | #2

Abb. 144
Belastungs-/Biegediagramm des 3-Modul-Einfeldträgers

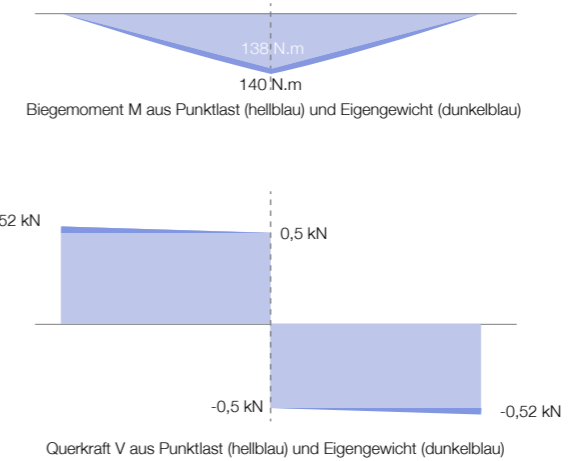
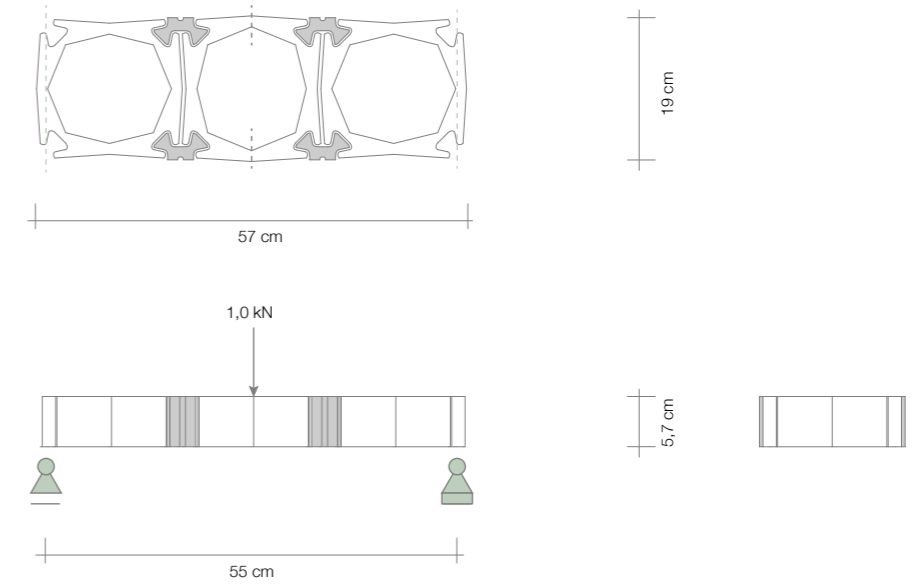
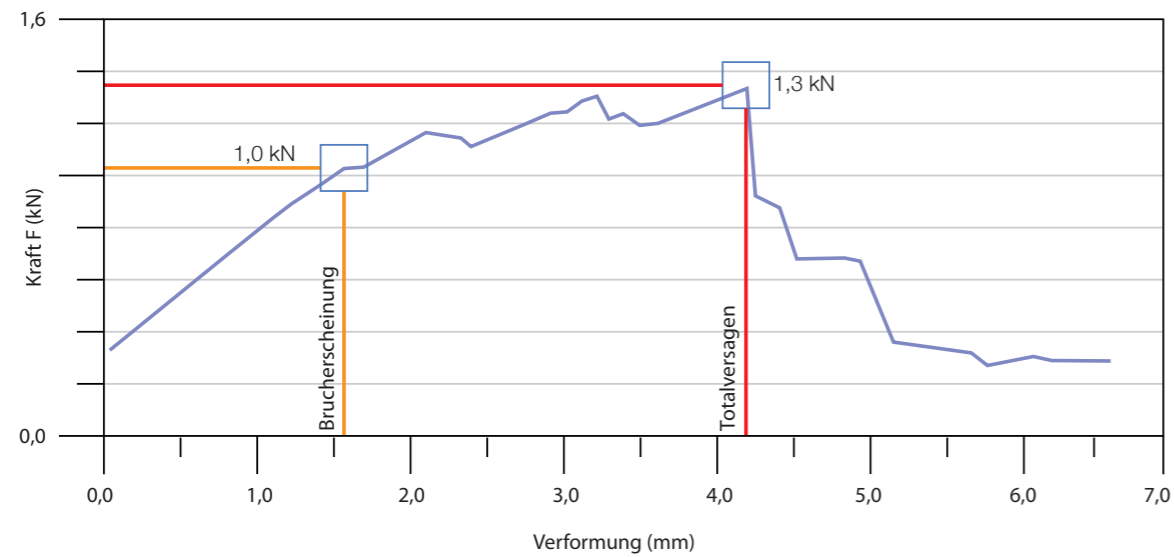


Abb. 146
Geometrie (M1:10) und Belastung des 3-Modul-Einfeldträgers als 1,5D-Modellsystem

Schnittkräfte und Zugspannung | Die Schnittkräfte, die im Einfeldträger mit Belastung herrschten, wurden ermittelt. Über eine Betrachtung der Trägermitte als rechteckigen Keramik-Querschnitt kann die Zugbeanspruchung, wie untenstehend, mit $0,86 \text{ kN/cm}^2$ berechnet wird. Dieser Wert kann auch mittels RFEM-Simulation berechnet werden, wobei die FE-Simulation einen Wert von $0,84 \text{ kN/cm}^2$ ergibt. Bei dieser Zugbelastung der Keramik ist es an dieser Stelle des geringsten Querschnittes nicht zum Bruch gekommen, woraus eine Mindestbiegezugfestigkeit des Tonmaterials abgeleitet werden kann.

$$\begin{aligned}
 W &= b \cdot h^2 / 6 \\
 &= 2 \times 1,5 \text{ cm} \times (5,7 \text{ cm})^2 / 6 \\
 &= 16,24 \text{ cm}^3 \\
 \sigma_u &= M / W \\
 &= 1,4 \text{ N.cm} / 16,24 \text{ cm}^3 \\
 &= 0,086 \text{ N/cm}^2 = 0,86 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

Bruchverhalten | Hinsichtlich des Verhaltens des Systems bei zunehmender Belastung und aus dem Bruchbild konnten folg. Erkenntnisse gewonnen werden:

- Es wurden zwei verschiedene Arten von Bruchverhalten beobachtet (Abbildung 148 und 149). Beide gehen prinzipiell von den Innenwinkeln der Fügung aus. Die Rissausbreitung erfolgt dann je nach Materialinhomogenität in Richtung Innenkante (Abbildung 148) oder zur Außenfläche hin (Abbildung 149), woraus sich statische Verbesserungen ableiten lassen (Punkt 4.8).
- Es kommt kaum zu einem spontanen nicht vorangekündigten Bruch, wie er für eine rein keramische Konstruktion oder eine Keramikstückprobe zu erwarten wäre. Nach den ersten akustischen Anzeichen kann die Belastung sogar noch um etwa 20% gesteigert werden. Abbildung 150 lässt auf einen teilweise schichtweisen Bruch durch den Schichtaufbau der Verbinder schließen.
- Es kommt es zu keinem Bruch in der Modulmitte. Daraus lassen sich über die Querschnittsflächen Mindest-Biegezugfestigkeiten des Keramik-Materials ableiten.
- Der Injektionsmörtel haftet an PVC und Keramik etwa gleich gut und leistet einen Beitrag zum Tragverhalten (Abbildung 151).



Abb. 147
Bruchbelasteter Einfeldträger im 3-Punkt-Biegezugversuch

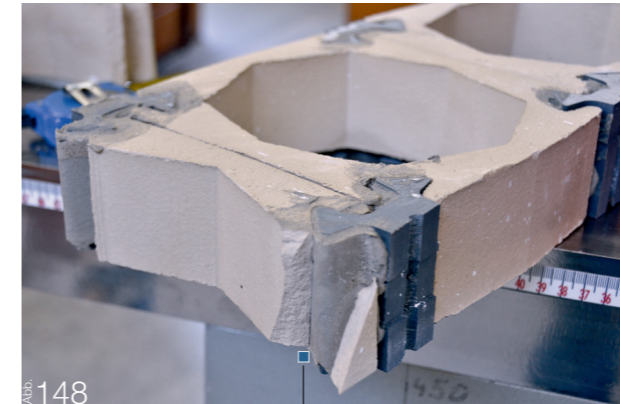


Abb. 148
Bruchstelle #1: Bruchstellen an der Fügung

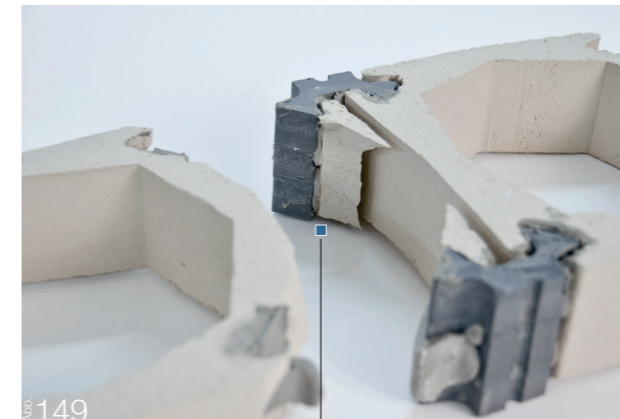


Abb. 149
Bruchstelle #2: Bruchstellen an der Fügung - Bruchbild 2 | #2



Abb. 150
Bruchstelle #2 - Schichtaufbau wirkt sich auf den Bruch aus



Abb. 151
Bruchstelle #2 - Injektionsmörtelkörper trägt zum Tragverhalten bei

Porosität | Eine maßgebliche Größe für die Beurteilung von Keramiken oder anderen Werkstücken aus Sinterprozessen ist die verbleibende Porosität nach dem Sintern bzw. Brennen. Für das Material und den Brennprozess, der bei der Herstellung des Prototypen angewandt wurde, wurde eine Dichte von $2,1 \text{ g/cm}^3$ ermittelt. Daraus lässt sich auf eine Porosität von etwa $5 \pm 3 \%$ schließen.

Die relevanten Materialeigenschaften, das E-Modul und die Zugbelastbarkeit hängen neben dem eigentlichen Material (Korngröße, Kornverteilung, Verunreinigungen) sehr stark von der Porosität und damit den Brennbedingungen ab.

E-Modul | Neben der Zugfestigkeit, die die maximale Belastbarkeit beschreibt, ist bei den Berechnungen vor allem der E-Modul entscheidend. Der E-Modul beschreibt, wie stark die Verformung beim Anlegen einer Kraft im linear-elastischen Bereich ist. Keramiken weisen einen sehr kleinen linear-elastischen Bereich bei sehr großem E-Modul auf - also eine geringe Verformung bis zum Bruch. Für die Berechnungen wurden die RFEM-Bibliothekswerte für Klinker bzw. Hart-PCV verwendet.

Zugfestigkeit | Die Zugfestigkeit bzw. Biegezugfestigkeit - je nach Ermittlungsmethode - beschreibt die Belastbarkeit eines Materiales auf Zug bis zum Bruch. Keramiken weisen eine vergleichsweise niedrige Zugfestigkeit auf, weshalb CeramicTranslation-Tragwerke so konstruiert werden sollten, dass möglichst geringe Zugkräfte auftreten.

Typisch für Keramiken ist, dass für die Zugbelastbarkeit etwa ein Zehntel der Druckbelastbarkeit angesetzt werden kann. So kann eine Abschätzung von Klinker-material erfolgen. Porzellan im Vergleich dazu weist durch seine Reinheit, seine engere Kornverteilung und den dichten Brand höhere Belastbarkeiten auf. Poren in der Keramik werden dabei nahezu vollständig geschlossen, sodass die Kontaktflächen zwischen den Gefügekörnern so groß wie möglich sind.

Prototyp-Tonmaterial | Für Keramiken müssen insbesondere bei der Ermittlung von Zugbelastbarkeiten relativ große Streuungen der Prüfwerte akzeptiert werden. Die große Streuung, die man bei Materialprüfungen erhält, entstehen durch die statistische Verteilung von Fehlerstellen, von denen letztlich eine Rissausbreitung und der Bruch erfolgt.

Eine explizite Prüfung von Materialproben wurden nicht durchgeführt, jedoch lassen sich aus den 3-Punkt-Biegezugversuchen Mindestbiegezugfestigkeiten ableiten. Bei den Versuchen ist es jeweils in der Trägermitte zu einer Zugbelastung an der Unterseite des Mittelmoduls gekommen, ohne dass dieses dabei gebrochen wäre. Die maximale Zugfestigkeit des Materials liegt also über dieser Zugspannung. Die Ermittlung der Spannungen wurde mittels FE-Software und außerdem, wie unter Punkt 5.3, rechnerisch durchgeführt. Die Spannungen beim vollständigen Bruch der Fügung lagen in Modulmitte sogar noch etwa um 20% höher.

- Biegezugfestigkeit Vers #1^{Pkt.5.3}: $> 0,54 \text{ kN/cm}^2$
- Biegezugfestigkeit Vers #2^{Pkt.5.3}: $> 0,86 \text{ kN/cm}^2$
- Biegezugfestigkeit Vers. #1^{RFEM}: $> 0,57 \text{ kN/cm}^2$
- Biegezugfestigkeit Vers. #2^{RFEM}: $> 0,84 \text{ kN/cm}^2$

Klinker (bei 1400°C gebrannt)

- E-Modul: 2.700 kN/cm^2 ⁶²
- Druckfestigkeit: $3-6 \text{ kN/cm}^2$ ⁶³
- Zugfestigkeit = $1/10 = 0,3 - 0,6 \text{ kN/cm}^2$

Porzellan ⁶⁴

- E-Modul: 4.800 kN/cm^2
- Zugfestigkeit: $1,0 - 2,5 \text{ kN/cm}^2$

Hart-PVC

- E-Modul ⁶⁵: $100 - 350 \text{ kN/cm}^2$
- E-Modul ^(RFEM): 325 kN/cm^2
- Biegezugfestigkeit: $5,0 - 7,5 \text{ kN/cm}^2$

Allgemeines zu FE-Methoden ⁶⁶ | Finite Element-Methoden haben sich in den vergangenen Jahrzehnten in sehr vielen Bereichen der Ingenieurwissenschaften zu einem wichtigen Werkzeug entwickelt. Die mathematischen und theoretischen Grundlagen der Methode existierten zwar schon in den 1940ern, wobei die begrenzte Rechenleistung eine breite Anwendung noch verhinderte.

Dies änderte sich im Laufe der Zeit zunehmend, wobei es erste Anwendungen im Bauwesen bereits 1960 gab. Entwicklungen an den Universitäten, Anregungen aus der Ingenieurpraxis sowie die zunehmende verbilligte Rechenleistung ebnete hierfür den Weg. Prinzipiell beruht die Methode darauf, dass das aus unendlich vielen Materieteilchen bestehende Tragwerk in eine endliche (finite) Anzahl von Elementen modelliert wird, die untereinander verbunden sind. Das mechanische Verhalten wird dann durch Näherungen für die Elemente berechnet. Beschrieben wird das Verhalten des Systems durch die Knoten, die ein Element begrenzen. Schlussendlich wird durch den Bezug auf diese Knoten das Verhalten in einem endlichen System von Gleichungen abbild- und lösbar. Für ein dreidimensionales System werden jedem Knoten sechs Freiheitsgrade zugewiesen, drei Verschiebungs- und drei Verdrehungsfreiheitsgrade.

Reale Werkstücke bestehen aus einer nahezu unendlichen Anzahl von Atomen, Molekülen oder Gefügekörnern. Die Vereinfachung der Bauteile durch eine Verringerung auf eine endliche Anzahl von Elementen und Knoten bilden die Grundgedanken der FE-Methode. Genau diese Knoten an den Kontaktpunkten der Elemente werden für die Berechnung verwendet. Die FE-Software geht dabei meist wie folgt vor ⁶⁷:

1. Einteilung des Tragwerkes in endliche Finite Elemente durch Generierung eines Elementnetzes

2. Beschreibung der mechanischen Eigenschaften des Einzelelementes an den Knotenpunkten, einschließlich der Diskretisierung der Elementbelastungen. Das Ergebnis ist die Steifigkeitsbeziehung des Einzelelementes (Die Dimension der Elementsteifigkeitsmatrix ergibt sich aus der Anzahl der Knotenpunkte multipliziert mit den darin enthaltenen Freiheitsgraden)

3. Zusammensetzung der einzelnen Elemente zur Gesamtstruktur unter Wahrung der kinematischen Verträglichkeitsbedingungen und der statischen Gleichgewichtsbedingungen sowie Generierung des Gesamtbelastungsvektors. Das Ergebnis ist die Steifigkeitsbeziehung des Gesamtsystems (Die Dimension des so entstandenen Gesamtgleichungssystems ergibt sich aus der Anzahl aller Knoten multipliziert mit den Freiheitsgraden / Knoten).

4. Einbau der Lagerungsbedingungen

5. Lösen des Gleichungssystems, d.h. die Ermittlung des Verschiebungsvektors

6. Rückrechnung auf das Einzelelement und Ermittlung der Schnittgrößen

Die graphische Darstellung von FE-Berechnungen an Bauteilen erfolgt sehr oft durch Farben an Flächen und Volumen. Lagerreaktionen und Belastungen sind der Einfachheit halber direkt in den Grafiken angezeigt bzw. im Text erläutert.

Verformungen lassen sich durch eine überzeichnete Darstellung gut illustrieren, die durch eine Farbskala weiter veranschaulicht werden können.

Auf die Darstellung von nicht belastungskritischen Größen, die von der FE-Software ermittelt wurden, wurde verzichtet (z.B. Normalspannungen oder Scherkräfte).

⁶² Vgl. Wikipedia: „Klinker“

⁶³ Vgl. <http://www.elkage.de/src/public/showterms.php?id=1132>, abgerufen am 01.02.2016

⁶⁴ Vgl. http://www.engineeringtoolbox.com/ceramics-properties-d_1227.html, abgerufen am 01.02.2016

⁶⁵ Vgl. Datenblatt Kunststoffe Fa. Zultner, S. 1

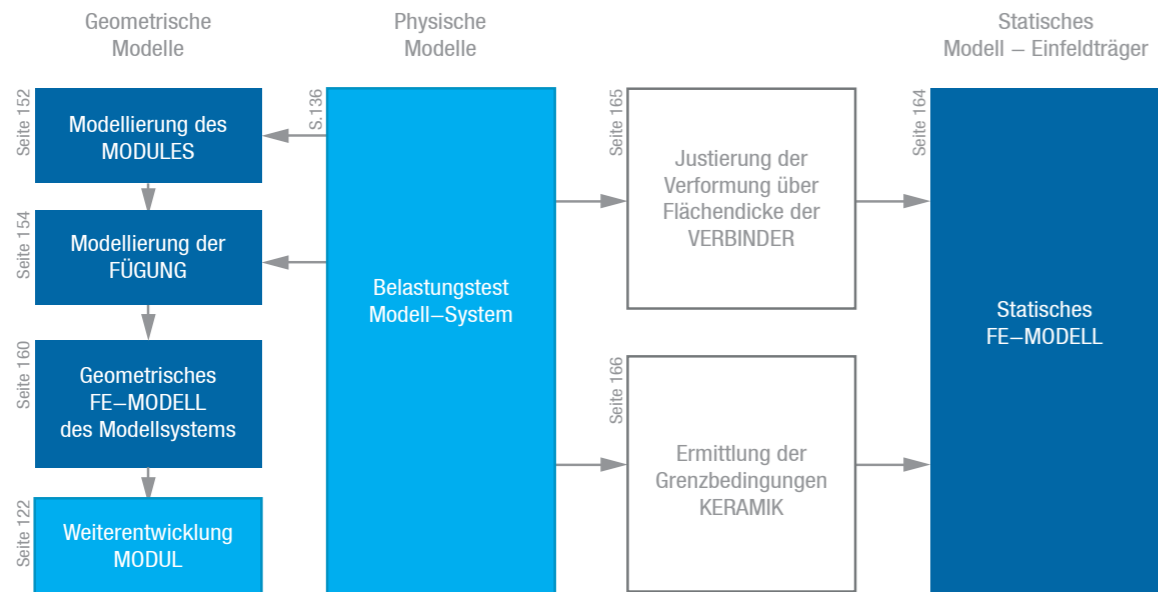
⁶⁶ Vgl. Barth, Rustler S.7

⁶⁷ Barth, Rustler S.8-9

FE-Modelle & Versuche | Es wurden FE-Modelle mit verschiedenen Detaillierungsgraden erstellt und jeweils so angepasst, dass eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen Modell und Bruchversuchen bestand. Über das detaillierte geometrische Modell ließen sich Einblicke in die statischen Beanspruchungen innerhalb von Modul und Fügung gewinnen und so statische Verbesserungen am Modul ableiten. Mit den geometrischen Modellierungen konnte auch die

Aussage getroffen werden, dass durch ein proportionales Vergrößern von Modul und Knoten keine prinzipielle Veränderung der Art der Zug-Beanspruchungen entsteht.

Im entwickelten und justierten statischen Modell konnten die Effekte und Werte, die im Bruchversuch ermittelt wurden, reproduziert werden. Das statische Modell kann somit zur Beurteilung von neuen Konstruktionen und Tragwerken dienen.



3D-Volumenmodell | Um Einblick in die mechanischen Belastungen innerhalb eines Keramikmoduls zu gewinnen, wurde ein einzelner Baustein in RFEM geometrisch modelliert. Zur Verringerung des Rechenaufwandes für die Simulation wurde dabei die Anzahl der Knoten an wenig relevanten Stellen erheblich reduziert. So ergibt sich ein Modell, in dem die Innenradien an den Verbindungsstellen durch Polynome angenähert sind.

Das für die nachfolgenden Berechnungen verwendete FE-Netz wird in Abbildung 152 gezeigt. Die Software erstellt und zeigt eine sinnvolle Verdichtung der Volumenelemente nahe den Verbindungsstellen. Das Volumenelement wurde für die nachfolgenden Simulationen von Belastungsversuchen von Fügung (Punkt 5.7) und den Einfeldträgern (Punkt 5.8) verwendet.

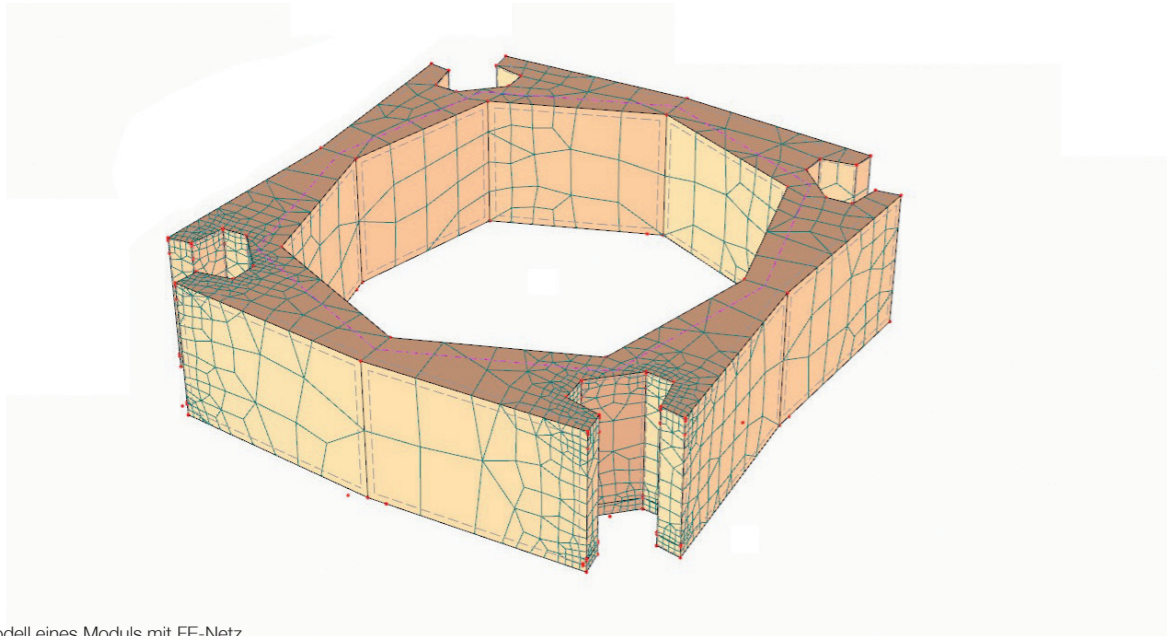


Abb. 152
Volumenmodell eines Moduls mit FE-Netz

Zur Vereinfachung des Querschnitts wurde die Anzahl der Knoten in den Rundungen verringert. Rundungen sind damit also durch Polylinien angenähert. In Abbildung 153 sind die Querschnitte dargestellt. Bei der geometrischen Vereinfachung wurde darauf geachtet die Querschnittsverhältnisse und die bruchkritischen Kerbstellen in den Ecken nicht zu stark zu simplifizieren. Bei zu stark vereinfachtem Querschnitt etwa wird in der Berechnung eine maximal belastete Stelle erzeugt, die im realen Modul so nicht vorhanden ist. Gute Übereinstimmungen mit den Bruchversuchen liefert der in Abbildung 153 gezeigte Querschnitt. Der Rechenaufwand für die geometrischen Modelle sinkt dadurch auf ein annehmbares Maß, wobei die Bruchstellen dennoch mit den Versuchen übereinstimmen. Da jedoch speziell in den Rundungen am Knoten Vereinfachungen vorgenommen werden, können quantitative Beurteilungen einer Tragwerksbelastung so nicht vorgenommen werden.

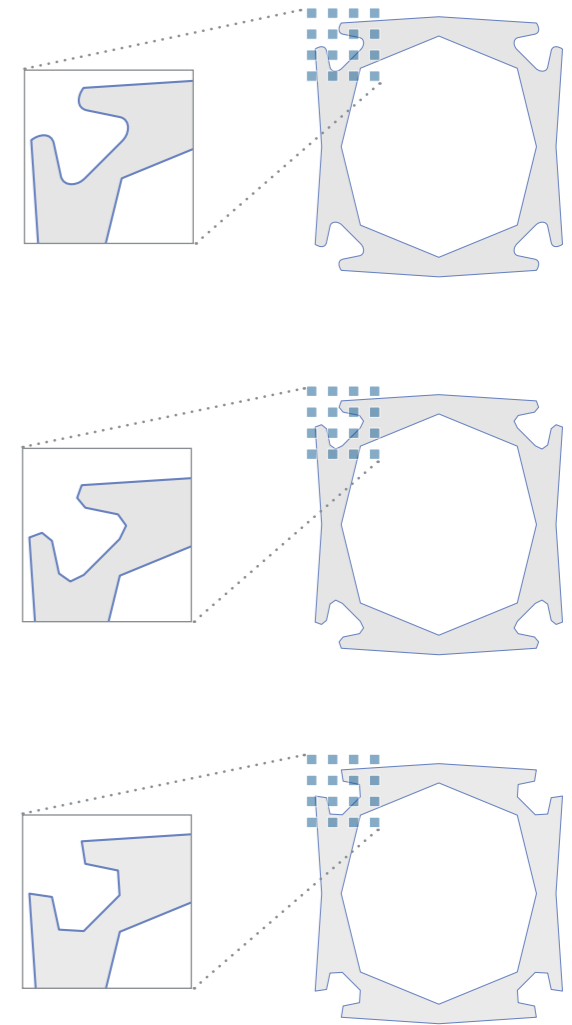


Abb. 153
Vereinfachungen des Querschnitts zur Modellierung in RFEM

Fügung | Ein 3-Punkt-Biegezugversuch an einem Einfeldträger aus zwei Modulen wurde mit RFEM simuliert, um Einblicke in die Spannungsverteilungen in den Verbindungsstellen zu erhalten. Dabei wurden folgende Optionen in RFEM verwendet:

- Keramik (Kennwerte Klinker)
- Hart-PVC-Knoten (Kennwerte Hart-PVC)
- verschiebliche Lagerung
- Mittige Linienlasten (ca. Belastungsgrenze)
- Die Berechnung erfolgte iterativ

Verbinder ohne Kontaktvolumen | Die Geometrie des PVC-Verbinders wurde entsprechend der Modulgeometrie ebenfalls vereinfacht. Bei der ersten Berechnung wurde die Verbindung zwischen Keramik und Verbinder als voll kraftschlüssig modelliert. Die Weitergabe von Kräften erfolgt an den Berührungsflächen in der Berechnung dann uneingeschränkt und an allen Berührungsflächen gleichermaßen. Dies führt zu Maximalbelastungen an Stellen, an denen diese Zugkräfte am realen Tragwerk nicht auftreten. Vor allem die uneingeschränkte Weitergabe von Zugkräften entspricht nicht dem Verhalten der Injektionsmörtelverklebung. Die Modellierung der Fügung wurde deshalb weiterentwickelt.

Kontaktvolumen | Zwischen dem verkleinerten PVC-Verbinder und der Keramik wurden „zugfreie“ Kontaktvolumina eingefügt. Dieser Kontaktkörper bildet die realen Verhältnisse der Injektionsmörtel-Verklebung besser ab, da über die Kontaktfläche von PVC und Injektionsmörtel nur sehr eingeschränkt Zugkräfte übertragen werden können, Druckkräfte jedoch in vollem Umfang. Die Fügung wirkt dadurch auch in der Simulation vornehmlich durch ihren Formschluss, der zur Zugbelastung in der Keramik an den bruchkritischen Stellen, übereinstimmend mit dem Bruchversuch, führt.

Verbinderquerschnitt | Um die Verformung in den Knoten des Einfeldträgers adequat zu berechnen, wurde an den Rändern der Verbinder halbiert. Durch das Halbieren der Verbinder werden die Verhältnisse der relevanten Querschnittsflächen von Verbinder und Keramik berücksichtigt. Die Belastung in den Verbindungsstellen steigt dabei nur geringfügig an, weil die höhere Verformung zu etwas größeren Zugbelastungen führt, wobei die kritischen Stellen unverändert bleiben (Abbildung 156 und 157). Diese Modellierung wurde in den folgenden geometrischen Modellen verwendet.

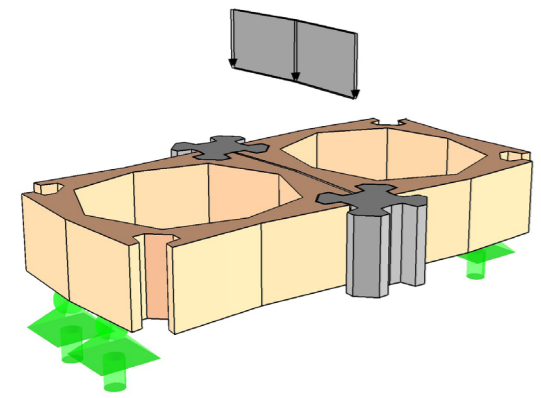


Abb. 154
Simulierter Biegezugversuch mit zwei Modulen

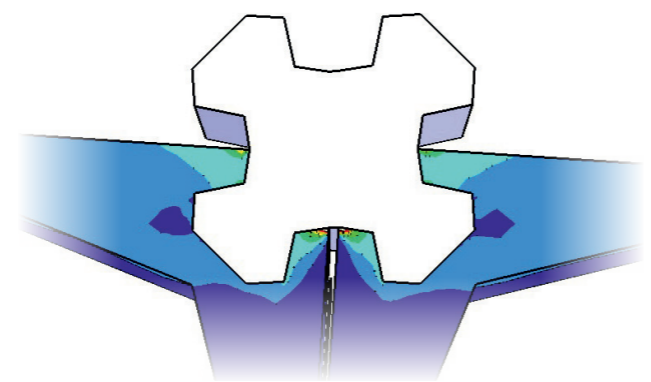


Abb. 155
Untersicht der Verbindung mit PVC-Knoten ohne Kontaktvolumen

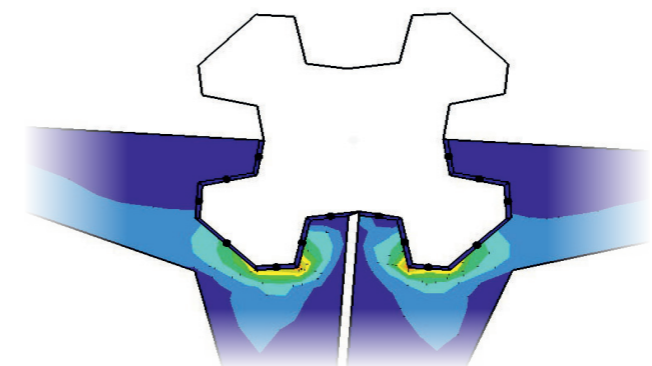


Abb. 156
Untersicht der Verbindung mit PVC-Knoten mit Kontaktvolumen

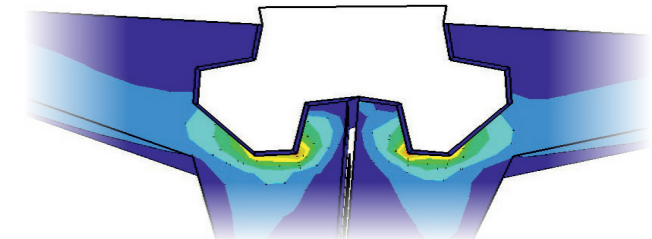


Abb. 157
Untersicht der Verbindung mit PVC-Knoten mit Kontaktvolumen und halbiertem Verbinder

Lokale Verformung | Die Keramikelemente erlauben, durch ihren hohen E-Modul und die niedrige Zugbelastbarkeit, nur geringe Verformungen. Als günstig erweist sich in diesem Zusammenhang jedoch die Kombination mit den HD-PVC-Verbindern. Diese weisen einen niedrigeren E-Modul und eine vergleichsweise hohe Elastizität auf. So ergibt sich für die Gesamtkonstruktion eine Verformbarkeit und die Möglichkeit der Lastumlagerung. Das bedeutet für die untersuchte Schalengeometrie ein gutes Lastverteilungsverhalten. Weiters erlauben die ausreichend starren Knoten eine gute Schalentragwirkung.

Über die E-Moduln der Materialien kann abgeschätzt werden, dass die lokale Verformung bei Belastung der Konstruktion größtenteils in den PVC-Verbindern erfolgt. Das Keramikmaterial weist einen ca. achtmal höheren E-Modul als PVC - bei vergleichsweise niedriger Zugbelastbarkeit - auf. Die maximale Zugbelastbarkeit der Kunststoffverbinder wird dabei nie erreicht, weil sie wesentlich höher liegt, als die der Keramik. (siehe dazu Materialkennwerten, Punkt 5.4).

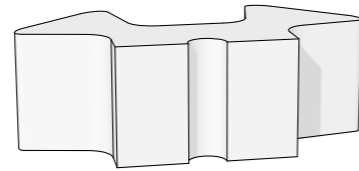


Abb. 158
Unverformter, halber Verbinder

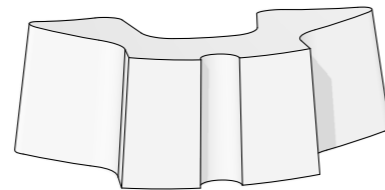


Abb. 159
Verformter, halber Verbinder bei Biegebeanspruchung lt. FE-Simulation
50fach überzeichnet

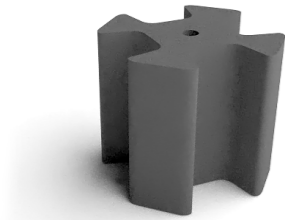
Abbildung 158 zeigt einen unverformten halben Verbinder, wie er beim Prototypen am Rand und bei den Biegezugversuchen verwendet wurde. Die Verformung hängt von der jeweiligen Belastung des Verbinders ab. Beispielsweise ist die Verformung bei einer Biegebeanspruchung in Abbildung 159 dargestellt.

Verbindermaterial | Dem Bausystem entsprechend wurden alle FE-Simulationen mit Hart-PVC als Knotenmaterial durchgeführt. PVC bietet wesentliche vorteilhaften Eigenschaften hinsichtlich der mechanischen Bearbeitung (Fräsen und Schneiden) sowie eine gute Verklebbarkeit.

Gegebenenfalls könnten für das Bausystem jedoch auch andere Materialien für die Verbinder verwendet werden, was Auswirkungen auf die Statik des Systems hätte. Im Folgenden werden vier mögliche Alternativen zu Hart-PVC als Verbindermaterial simuliert. Die FE-Berechnung wurde, wie in Abbildung 154 dargestellt, mit einem Einfeldträger aus zwei Modulen und zwei Verbindern unter Biegezugbelastung durchgeführt. Die Simulation erlaubt eine Abschätzung der statischen Auswirkungen von alternativen Materialien. Materialien, mit vergleichbar hohen E-Moduln wie die Keramik verringern dabei die kritischen Zugkräfte in den Modulen. Andere wesentliche Eigenschaften, wie Verarbeitbarkeit, Kosten und „Keramikverträglichkeit“ spielen daneben jedoch eine entscheidende Rolle für die Anwendbarkeit und werden diskutiert.

Rendering, Verbinder aus Hart-PVC

Abb. 160



Hart-PVC-Profil | Dem Bausystem entsprechend wurden alle FE-Simulationen mit diesem Knotenmaterial durchgeführt. PVC bietet vorteilhaften Eigenschaften hinsichtlich der mechanischen Verarbeitung (Fräsen und Schneiden) sowie eine gute Verklebbarkeit. PVC ist ein günstiger, haltbarer Massenkunststoff mit sehr passenden, keramikverträglichen Eigenschaften.

Die lokale Verformung passiert im Tragsystem durch den niedrigen E-Modul hauptsächlich in den PVC-Knoten. Durch die Verformung entstehen jedoch etwas höhere Zugspannungen in den Keramikmodulen.

- E-Modul: 325 kN/cm²
- Modell: RFEM wie unter 5.7 (mit Kontakvolumen)
- Verformung Konstruktion: 0,17 mm
- Max. Zugspannung in Keramik: 0,79 kN/cm²

Rendering, Verbinder aus PMMA ("Acrylglas")

Abb. 161



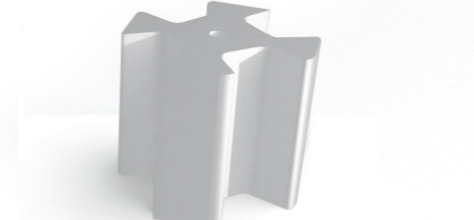
PMMA-Profil | Polymethylmethacrylat (Acrylglas) wurde in den Vorversuchen verwendet, weil es mittels Lasercutter geschnitten werden kann. Auch die Verklebung der Schichten mit Dichlormethan, der aus Plattenmaterial geschnittenen Teile zu einem längeren Profil, funktioniert gut.

In der Fügung verhält sich PMMA lt. Simulation (durch den ähnlichen E-Modul) wie Hart-PVC. Die Bruchfestigkeit von PVC liegt etwas höher, als die von PMMA. Bei den angelegten Belastungen brechen beide Kunststoffe nicht. Zuvor wird die Zugbelastbarkeit der Keramik überschritten.

- E-Modul: 330 kN/cm²
- Modell: RFEM wie unter 5.7 (mit Kontakvolumen)
- Verformung Konstruktion: 0,15 mm
- Max. Zugspannung in Keramik: 0,78 kN/cm²

Rendering, Verbinder aus Aluminium

Abb. 162

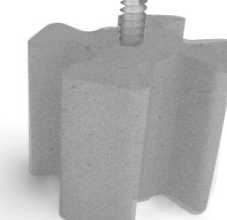


Aluminium-Profil | Der E-Modul von Aluminium liegt um Größenordnungen höher als der von Kunststoffen. In der Simulation kommt es deshalb zu wesentlich geringeren Punktbelastungen in der Keramik an Verbindungsstellen. Aluminium-Profile müssen nicht zwingend als Vollprofile, wie in der Simulation, gefertigt sein. Nachteilig bei Aluminium ist die große Wärmeausdehnung, die zu einer problematischen Kombination mit Keramik führen kann. Bei der gegebenen Geometrie wäre durch eine Ausdehnung des Verbinders bei Erwärmung ein „Aufsprengen“ der Keramik wahrscheinlich.

- E-Modul: 7.170 kN/cm²
- Modell: RFEM wie unter 5.7 (mit Kontakvolumen)
- Verformung Konstruktion: 0,03 mm
- Max. Zugspannung in Keramik: 0,47 kN/cm²

Verbindungsstelle mit Betonmörtel vergossen mit Gewindeanschluss

Abb. 163



Mörtel-Verguss mit Bewehrung | Mittels Ausgießen mit Betonmörtel mit einer entsprechenden Zugbewehrung lässt sich eine sehr gute Verbindung zur Keramik herstellen. Betonmörtel weist je nach Zusammensetzung einen nahezu identen E-Modul wie die Keramik auf, was zu geringen Verformungen und Zugspannungen führt.

Neben den statischen Vorteilen weist diese Fügemethode jedoch verarbeitungstechnisch gravierende Nachteile auf (Verarbeitungszeit, Optik, Abdichtung der Fügestelle). Details dazu sind unter Punkt 4.5 dargestellt.

- E-Modul: ca. 2.700 kN/cm²
- Modell: RFEM wie unter 5.7 (mit Kontakvolumen)
- Verformung Konstruktion: 0,06 mm
- Max. Zugspannung in Keramik: 0,49 kN/cm²

RFEM: Detailmodell Einfeldträger

Einfeldträger | Zu Vergleichs- und Analysezwecken wurde der Einfeldträger, der im Biegezugversuch getestet wurde, modelliert. Dabei wurden die entwickelten Modellierstrategien für die Module und für die Fügungen verwendet, die unter 5.7 beschrieben sind. Als Belastung wurde die gleiche Kraft wie im Biegezugversuch mittig angelegt. Sie wirkt zusätzlich zum Eigengewicht des Trägers, das mit dem physischen Modell übereinstimmt. Art und Abstand der Auflager entsprechen ebenfalls dem Biegezugversuch, der unter Punkt 5.3 beschrieben ist.

Mit RFEM wurde die globale Verformung des Trägers simuliert. Quantitativ ließen sich die berechneten Werte jedoch kaum verwenden. RFEM ermittelt beispielsweise mit 2,7 mm eine größere Verformung, als im Belastungsversuch beobachtet wurde (ca. 1 mm). Die Injektionsmörtelschicht scheint eine nicht modellierte Stabilisierung gegen Verformung und Bruch zu bewirken. Um diesen Effekt in der Simulation mitberücksichtigen zu können, wäre eine genauere Untersuchung der mechanischen Eigenschaften des Injektionsmörtels und der Haftwirkung notwendig. Es zeigte sich aber deutlich, dass die Trägerverformung zum Großteil auf einer Verformung der Knotenelemente beruht.

Eckdaten des modellierten Einfeldträgers:

- Nennspannweite: 90 cm
- Höhe: 5,7 cm
- Last: Eigengewicht + 360 N
- Verbinder: PVC-U (hart)
- Module: Keramik (RFEM-Kennwerte)
- Lagerung: frei / bestimmt
- Berechnung: iterativ

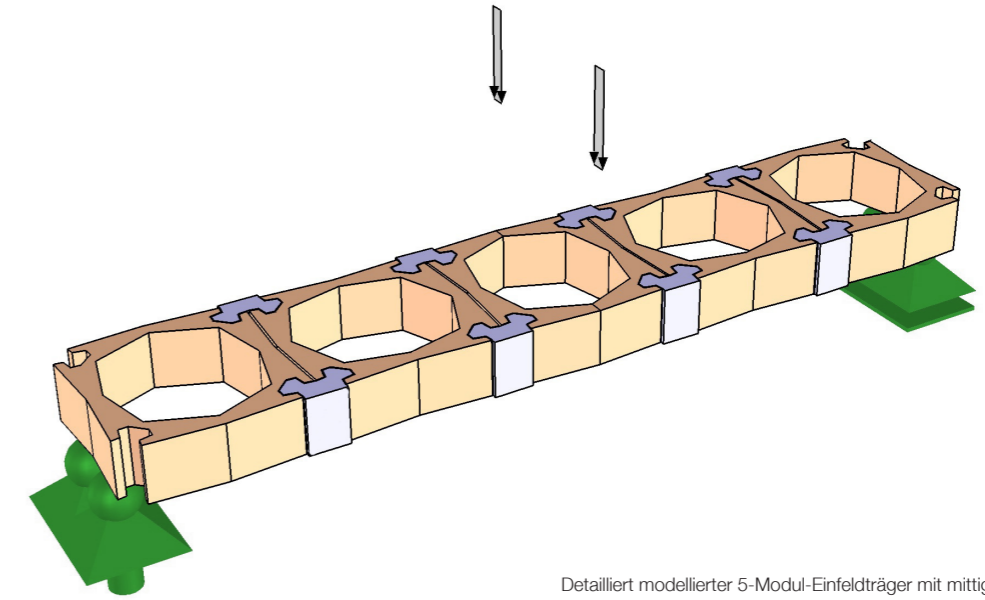
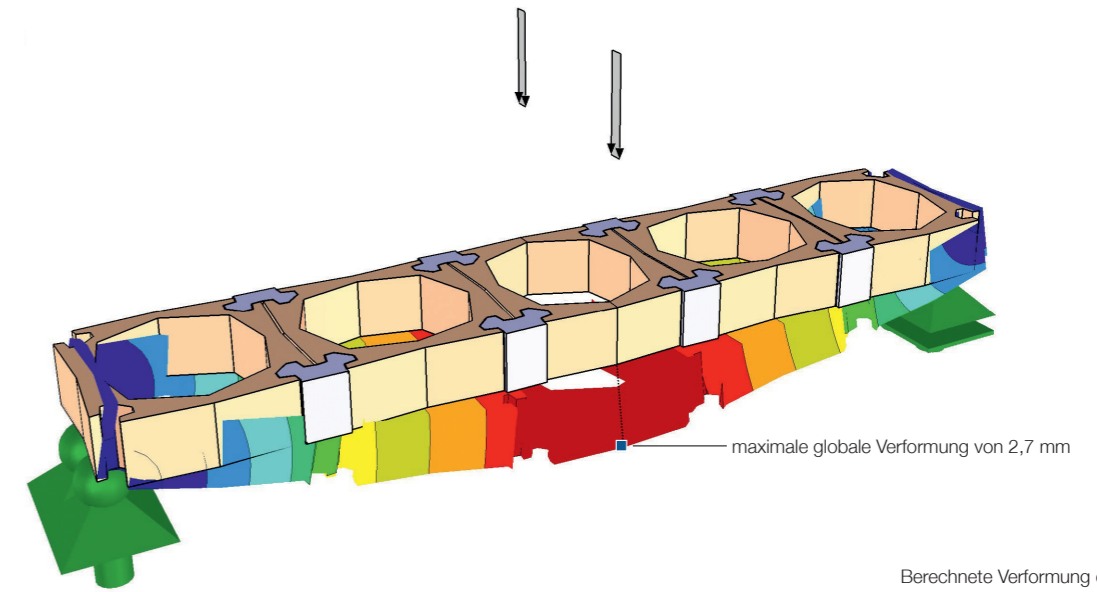


Abb. 164
Detailliert modellierter 5-Modul-Einfeldträger mit mittiger Belastung (360 N)



maximale globale Verformung von 2,7 mm

Abb. 165
Berechnete Verformung des Trägers

Die maximale Zugspannung wird mit $1,6 \text{ kN/cm}^2$ an der Fügung simuliert und erscheint hoch, weil sie deutlich über den Maximalzugfestigkeiten, etwa von vergleichbarem Klinkermaterial liegt. Der Schluss, dass das verwendete Tonmaterial damit eine vergleichbare Zugbelastbarkeit, wie hochwertiges Porzellan besitzt, kann kaum gezogen werden. Wahrscheinlicher ist, dass der stabilisierende Einfluss des Injektionsmörtelkörpers mitmodelliert werden müsste, wozu jedoch weitergehende Untersuchungen notwendig wären. Werte zur Festigkeit und zur Haftwirkung des Injekti-

onsmörtelkörpers sind quantitativ nur schwer zu erheben. Für die absolute Ermittlung der Tragkraft eines Tragwerkes ist damit ein „justiertes“ statisches System zweckmäßiger, als die Verwendung von Absolutwerten am geometrischen Modell.

Über die Spannungsverteilung im Träger können jedoch in den Ecken und in den Modulmitten Ansatzpunkte für statische Verbesserungen abgelesen werden. Diese Punkte wurden beim Vergrößern und statischen Anpassen des Moduls bearbeitet (Punkt 4.8).

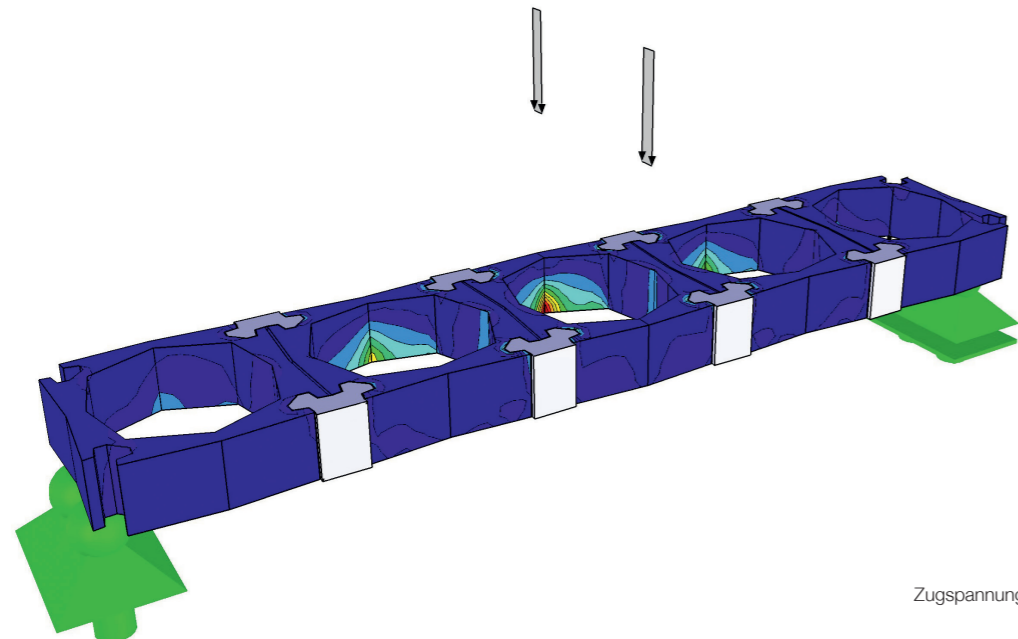


Abb. 166
Zugspannungen im belasteten Träger

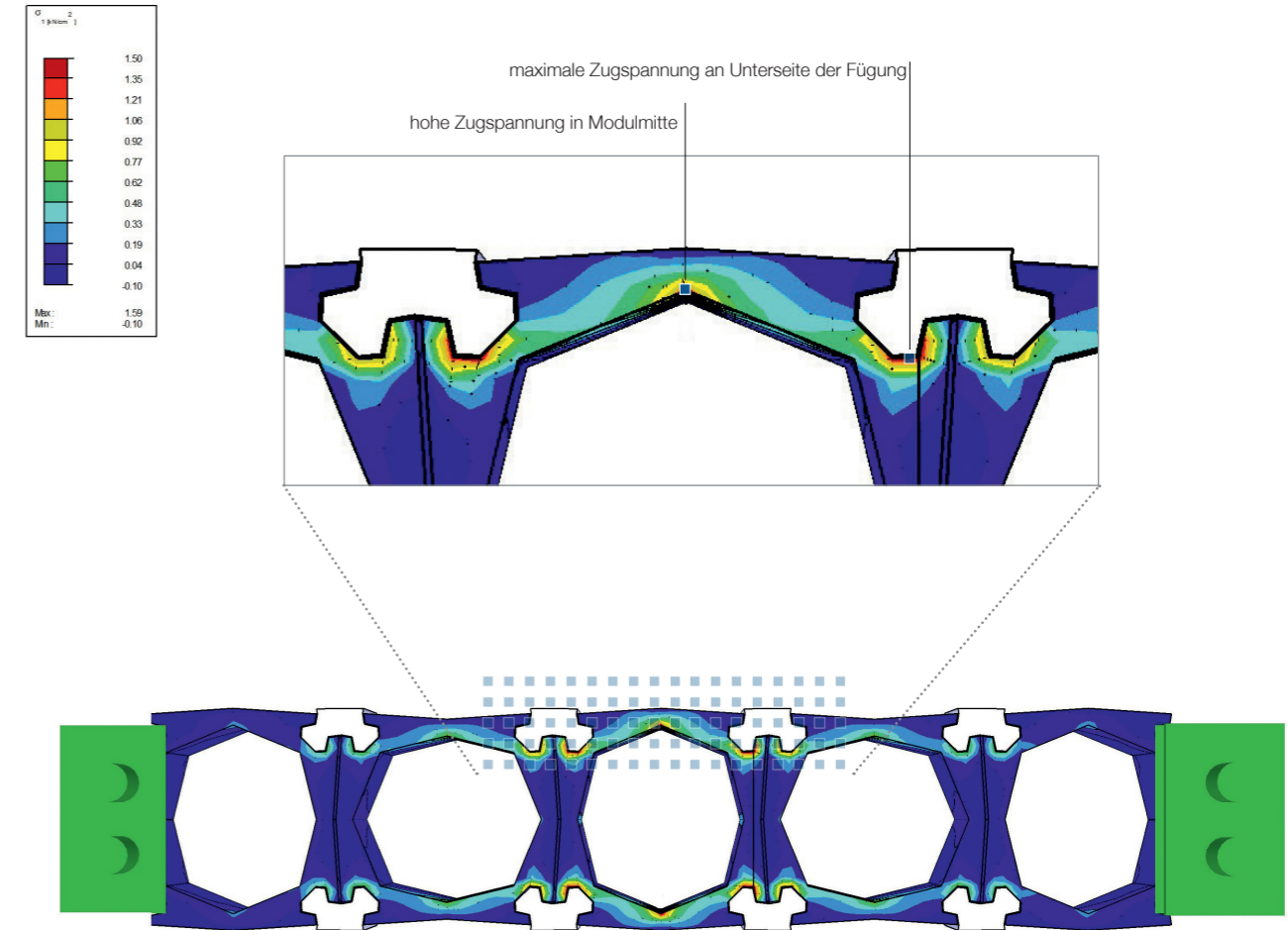
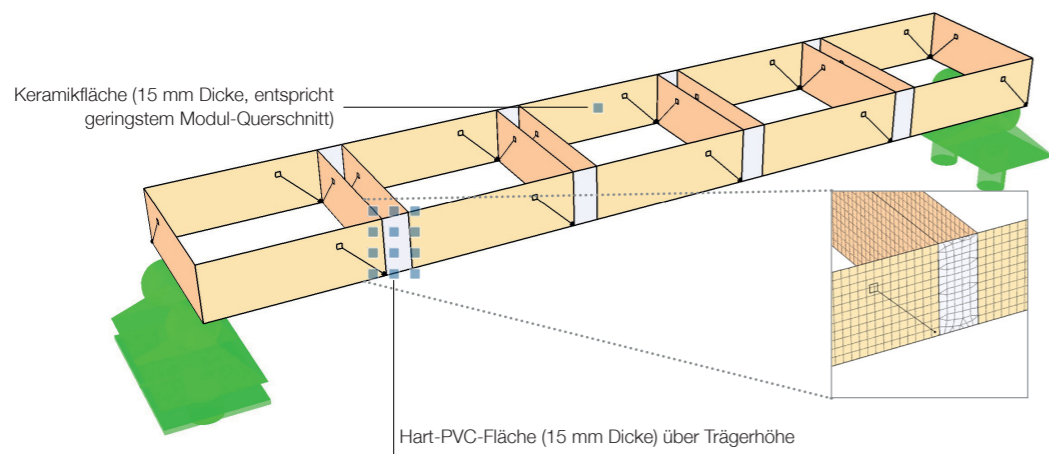


Abb. 167
Zugspannungen an der Unterseite des Trägers

RFEM: Statisches Modell

Neben dem detaillierten Volumen-Modell (Punkt 5.8) für die RFEM-Berechnung wurde ein statisches Modell entwickelt. Die Notwendigkeit eines solchen Modells für die Beurteilung ergibt sich, da bereits für den Einfeldträger aus nur fünf Modulen und acht Verbindern ein hoher Computer-Rechenaufwand zu leisten ist. Die detaillierte Modellierung und Berechnung ist damit eher für kleinere Tragwerke und die Analyse von Detailpunkten anzuwenden. Für die Beurteilung größerer und komplexerer Tragwerke kann durch das entwickelte statische Modell ein erheblicher Simulationsaufwand eingespart werden. Das Modell erlaubt auch eine Simulation unterschiedlichster Lastsituationen und Lagerungen.

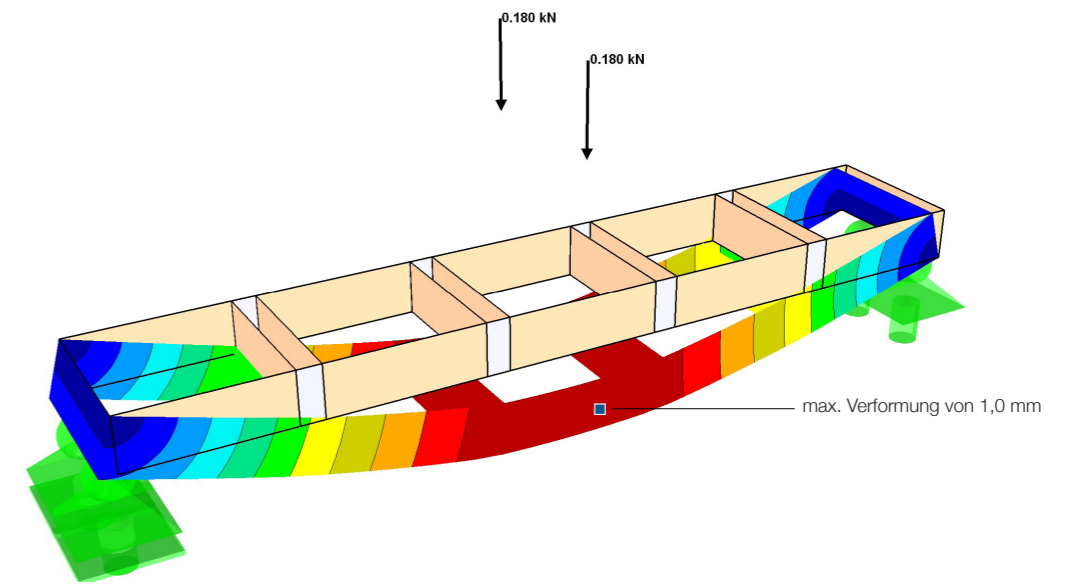
In statischer Hinsicht weist das Modell die gleichen Eigenschaften des Detailmodells und besonders auch des gebauten Einfeldträgers auf bzw. wurde darauf justiert. Es wurde als Flächenmodell entwickelt. Die Module werden dabei aus einem Rahmen aus vier Flächen repräsentiert. Die mechanischen Eigenschaften für die Simulation entsprechen einer Flächendicke von 15 mm Klinkermaterial. Die Module sind über Flächen (entsprechend 15 mm Hart-PVC) verbunden. Auf alle Flächen wurde eine Netzverdichtung mit einer Zielelementgröße von 0,5 cm angewendet, was einen guten Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Auflösung darstellt.



168
Statisches System des 5-Modul-Einfeldträgers

Justierung: Verformung | Die geometrischen Verhältnisse wurden so gewählt, dass die Verformung dem reale Verhalten, sowie dem des Detail-Volumenmodells, nahe kommt. Dies ist empirisch gut erreichbar, da die Verformung einer Konstruktion nahezu ausschließlich in den PVC-Verbindern passiert, kaum jedoch in den Keramik-Modulen. Über die Dicke der als Flächen modellierten Verbinder (und der damit für die Verformung relevanten Querschnittsfläche) kann die Verformung damit gut justiert werden.

Die reale Verformung konnte während der Bruchversuche gemessen werden und diente als Referenz. Die globale Verformung in der Trägermitte wurde auf 1 mm justiert. Sie entspricht dem Mittelwert beim Auftreten erster Brucherscheinungen in den beiden Biegezugversuchen (5.3). Die mittels geometrischer Simulation ermittelte Verformung wurde nicht berücksichtigt, weil der Einfluss des Injektionsmörtelkörpers nicht enthalten ist.



169
Statisches System des 5-Modul-Einfeldträgers - Verformung bei 15 mm Flächendicke der PVC-Verbinderflächen

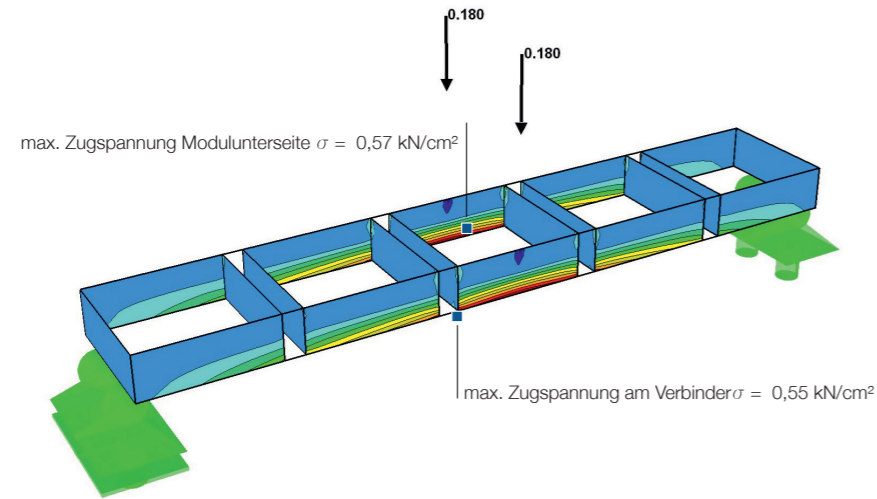
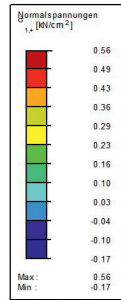


Abb. 170
Statisches System - Zugspannungen im 5-Modul-Einfeldträger

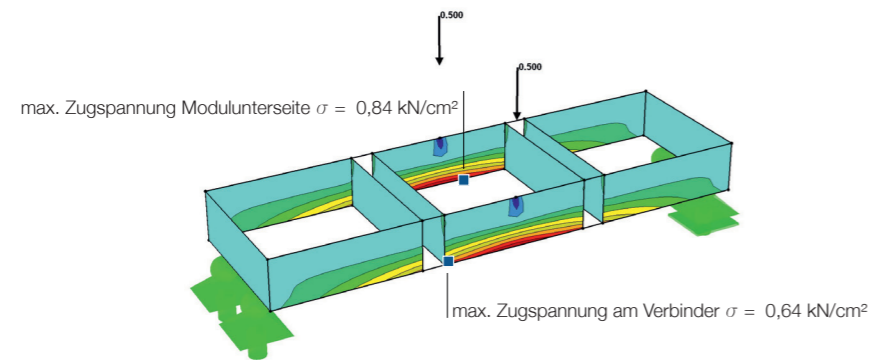
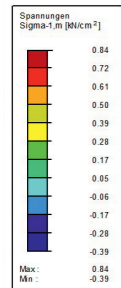


Abb. 171
Statisches System - Zugspannungen im 3-Modul-Einfeldträger

Grenzbedingungen: Spannungen | In den Abbildungen 170 bis 177 werden die sich ergebenden Spannungen in den berechneten Trägern bei der Belastung lt. Bruchlast aus den physisch getesteten Trägern gezeigt. Diese Spannungen an den kritischen Punkten wurden als Grenzbedingungen zur folgenden Beurteilung der Tragwerke verwendet. Dies sind die Zugspannungen an den Verbindungsstellen der Keramik, sowie die Unterseiten der Keramikmodule in der Trägermitte.

Da die beiden Bruchversuche statistisch nicht abgesichert sind, wurde bei den Tragwerksbeurteilungen immer der niedrigste Spannungswert verwendet, an dem die Fügung versagt hat bzw. erste Risse aufgetreten sind ($0,55 \text{ kN/cm}^2$).

Da die Simulationen die Modulmitten ebenfalls als sehr bruchkritisch angezeigt haben, und hier die maximalen Zugbelastungen herrschen, wird dieses Kriterium ebenfalls als Grenzwert verwendet.

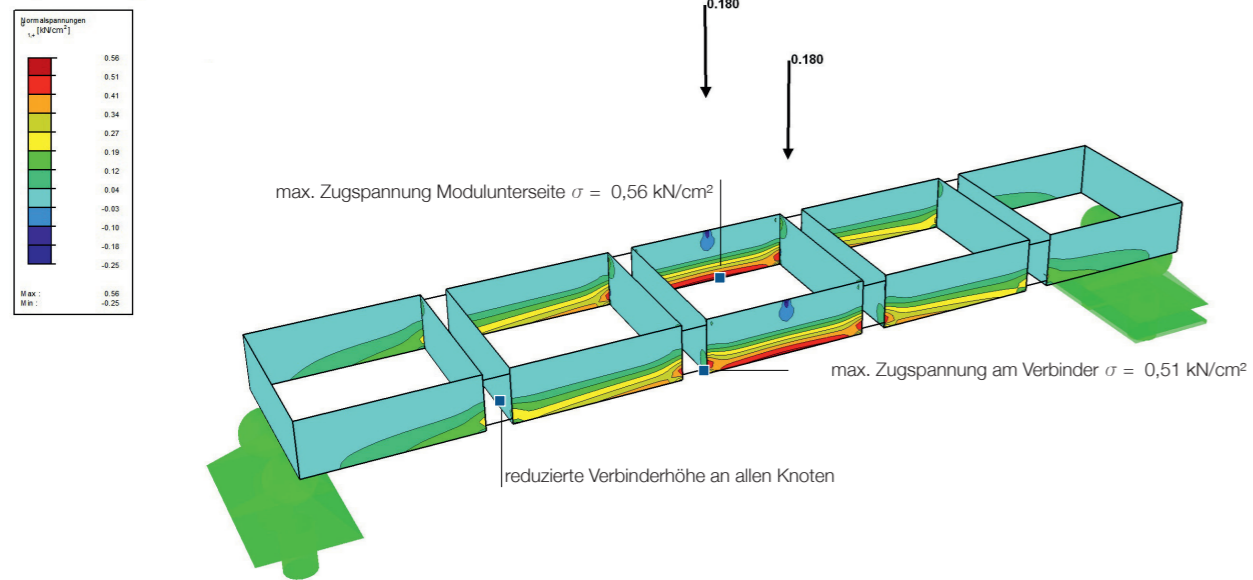


Abb. 172
Spannungen im 5-Modul Einfeldträger mit niedrigeren Verbindern

Verbinderhöhe | In Abbildung 172 ist das gleiche Modell mit etwas niedrigeren Verbindern (5,7 cm Keramik, 4,4 cm PVC-Verbinder) simuliert. Dies wurde zur Ermittlung des Einflusses dieser Bauart durchgeführt, die beim Prototypen verwendet wurde. Die Kräfteinleitung erfolgt auf einer etwas kleineren Fläche, jedoch an einer etwas günstigeren Stelle der Keramik, sodass die max. Zugspannung mit $0,51 \text{ kN/cm}^2$ sogar geringfügig sinkt.

Hinsichtlich der Zugbelastung an den Verbindern scheint es sogar vorteilhaft, wenn die Kräfteinleitung nicht am äußersten Rand der Module erfolgt. Die teilweise geringere Verbinderhöhe wurde somit in den nachfolgenden statischen Modellen vernachlässigt, weil sie das Tragverhalten nicht nachteilig beeinflusst.

5.10 RFEM: Tragwerksbeurteilung

Die gesammelten Informationen aus den Bruchversuchen (Verformung, Bruchlasten) und aus den FE-Simulationen können zur statischen Beurteilung neu entworfener Tragwerke verwendet werden. Das statische FE-Modell kann in prinzipiell gleicher Art und Weise für andere entworfene Ceramic Translation-Tragwerke mit geringem Aufwand erstellt werden. Damit lässt sich eine FE-Simulation durchführen und das Tragverhalten kann beurteilt werden.

Das statische Modell wurde mit den Bruchlasten aus den Biegezugversuchen „justiert“. Über einen Abgleich mit dem Bruchversuch konnten Grenzwerte für das Tragsystem ermittelt werden. Dabei wurden die für Keramik kritischen Zugspannungen an den bruchkritischen Stellen betrachtet.

Zugbeanspruchungen | Hinsichtlich der maximalen Belastbarkeit ergeben sich folgende Kriterien, um sicherzustellen, dass es nicht zum Versagen kommt:

- Die berechnete maximale Zugspannung in Modulmitte muss unterhalb der Biegezugfestigkeit der Keramik liegen. Diese wurde unter 5.9 mit mindestens 0,57 kN/cm² ermittelt, liegt in den meisten Fällen jedoch wesentlich höher (da es noch nicht zum Bruch gekommen ist).
- Die maximale Zugspannung an der Verbindungsstelle zwischen Keramik und PVC-Verbinder muss unterhalb der niedrigsten ermittelten Bruchlast liegen. Diese wurde im Modell mit mindestens 0,55 kN/cm² beim Auftreten der ersten Bruchanzeichen ermittelt.

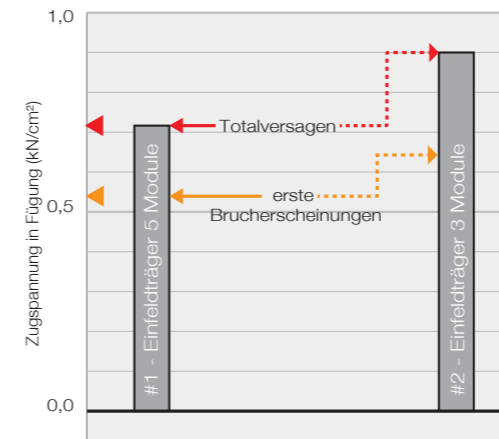
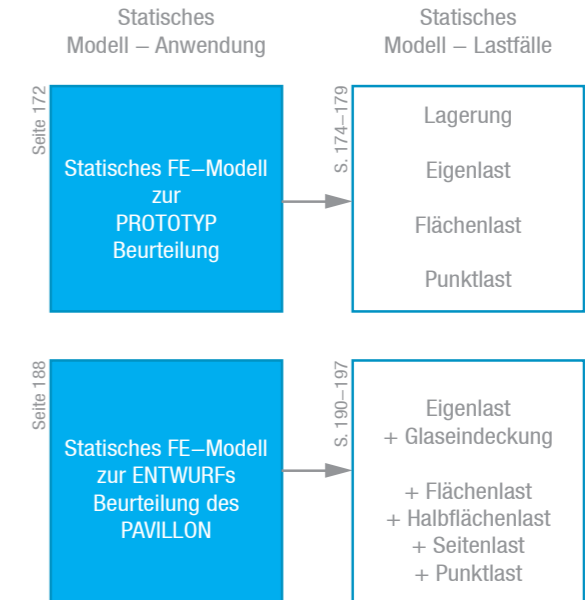


Abb. 173
Zugbeanspruchungen im statischen Modell an der Fügung bei Belastungen aus den Biegezugversuchen



5.11 RFEM: Statisches Modell des Prototypen

Eigenlast und unverschiebliche Lagerung | Mittels der Statik-Software Dlubal RFEM 5 wurde der gebaute Prototyp analog zu dem Einfeldträger als statisches Modell konstruiert. Im Fall einer idealen, unverschieblichen Lagerung wird eine gute statische Leis-

tung erreicht. Das Eigengewicht wird gut als Druckkraft in die Auflager abgeleitet. Der Prototyp bleibt bei dieser Lagerung weit unterhalb der maximalen Belastbarkeit (Abbildung 176).

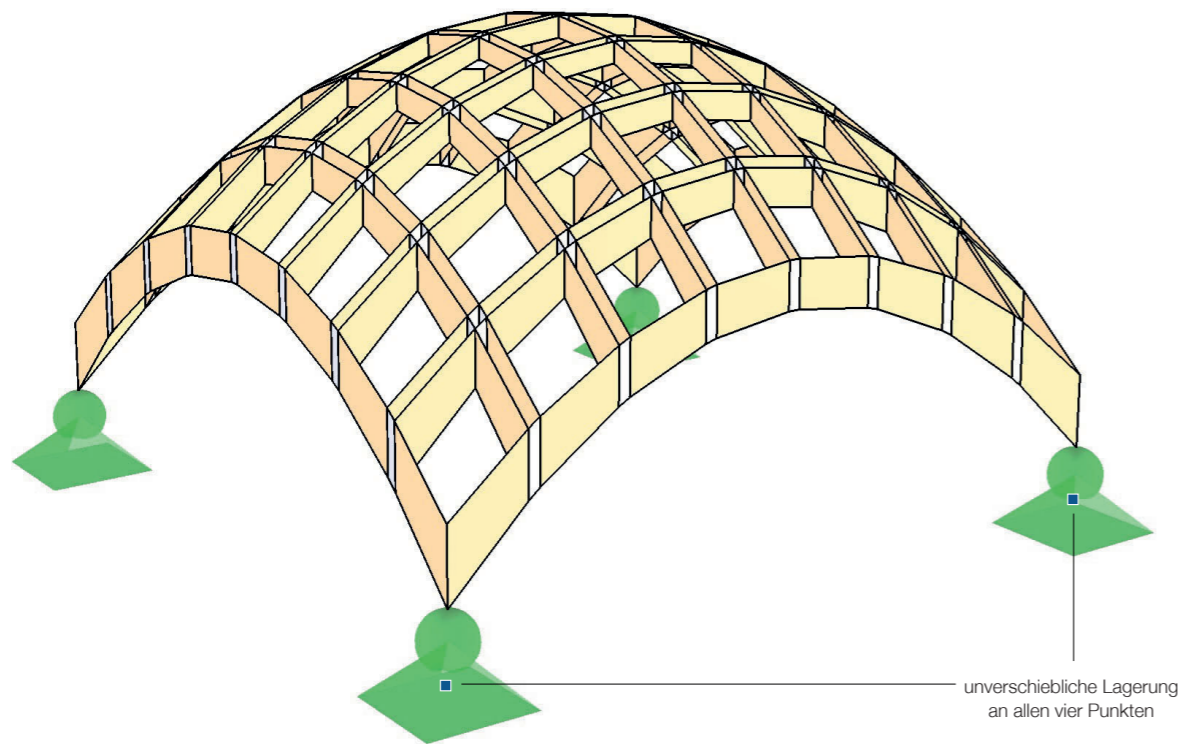


Abb. 174
Statisches Modell der Prototyp-Translationsschale mit unverschieblichen Lagern

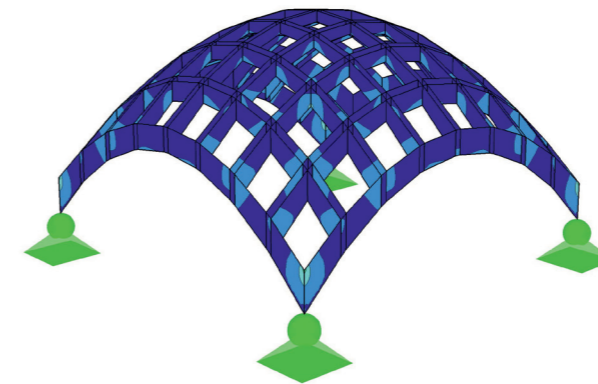


Abb. 175
Zugspannungen unter Eigenlast (Maximum: 0,16 kN/cm²)

Zugspannungen | Bei unverschieblichen Lagern an allen vier Auflagepunkten treten so gut wie keine Zugspannungen auf. Die unter Eigenlast auftretende maximale Zugspannung liegt bei 0,16 kN/cm² und liegt damit bei etwa 25% der Belastung in der Fügung bei der es zum Bruch kommen kann.

Bei einer sehr ungünstigen Punktbelastung in der Schalenmitte oben wäre die Biegezugfestigkeit an einigen Stellen bei einer Zusatzbelastung von 500 N erreicht. Die Schale könnte eine Person gerade nicht tragen.

Verformung | Die berechnete Verformung liegt unter 0,1 mm. In Schalen und auch Gitterschalen kommt es durch die effektive Lastabtragung als Druckkraft innerhalb der Konstruktion nur zu geringen Verformungen.

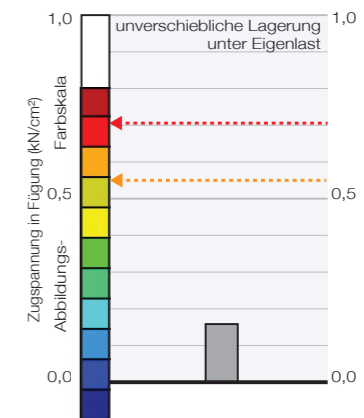


Abb. 176
Maximale Zugspannungen in Fügung unter Eigenlast bei unverschieblichen Lagern

Eigenlast und verschiebliche Lagerung | Eine an drei Punkten verschiebliche Auflagerung führt, wie zu erwarten, zu einer ganz erheblichen Verschlechterung des Tragverhaltens. Vor allem an den Unterseiten der Schalenränder treten dann lt. Simulation Zugspan-

nungen auf. Die maximale ermittelte Spannung liegt bei etwa 50 % der Biegezugfestigkeit unter Eigenlast.

Beim gebauten Prototyp bestehen also wesentlich niedrigere Reserven, weil die Lagerung sehr oft quasi verschieblich war (z.B. Abbildung 119).

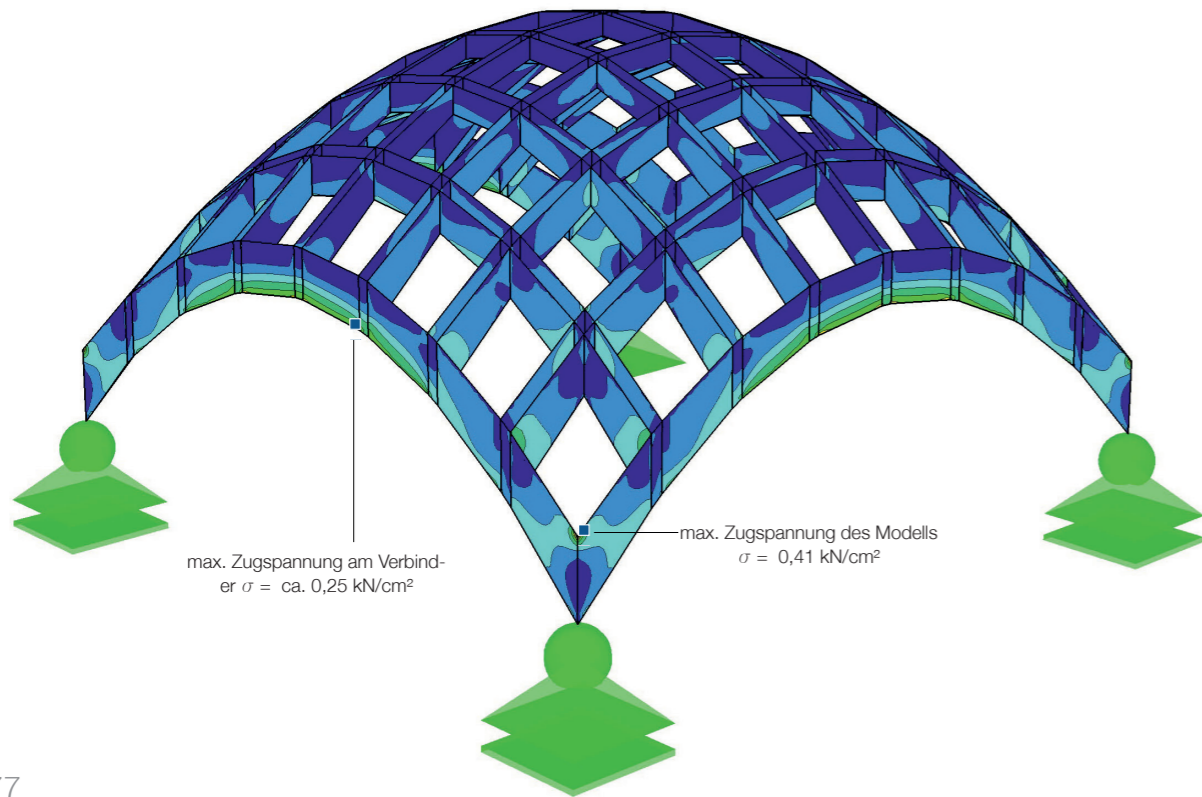


Abb. 177
Statisches Modell des Prototypen mit verschieblichen Auflagern

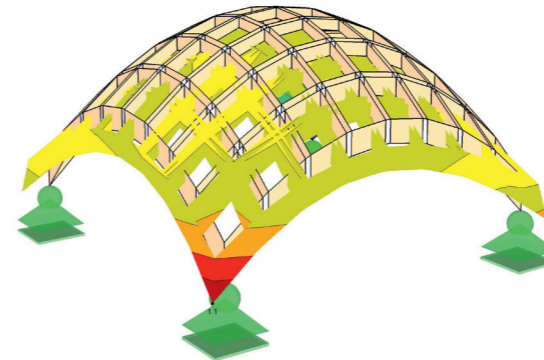


Abb. 178
Verformung unter Eigenlast mit verschieblichen Auflagern

Verformung | Die Verformung wird mit 1,1 mm berechnet. In Abbildung 178 ist die berechnete globale Verformung überzeichnet dargestellt. Unter Punkt 5.1 ist die lokale Verformung detaillierter beschrieben. Die Verformung der Schale geht auf Grund der unterschiedlichen E-Module der Materialien zum Großteil auf eine Verformung der PVC-Verbinder zurück, während sich die Keramikmodule kaum verformen.

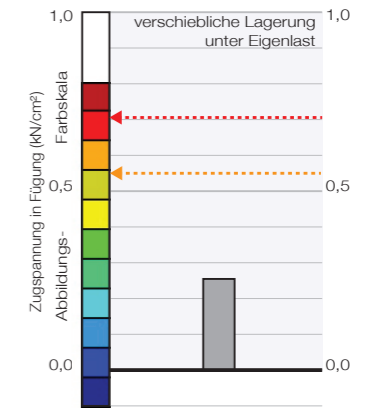


Abb. 179
Maximale Zugspannungen in Fügung unter Eigenlast bei unverschieblichen Lagern

Eigenlast + Flächenlast | Das statische Modell des Prototypen wurde zusätzlich zur Eigenlast mit einer gleichmäßigen Flächenlast von insgesamt 3,0 kN beaufschlagt. Die Kräfte greifen im Modell als Linienlasten, verteilt auf alle Elemente, gleichmäßig an und wirken senkrecht nach unten.

Solche flächig verteilten Lasten stellen für Schalen und Gitterschalen sehr günstige Lastfälle dar, da dabei die Ableitung der Druckkräfte weiterhin innerhalb der Konstruktion erfolgt und im Idealfall keine Zugkräfte auftreten.

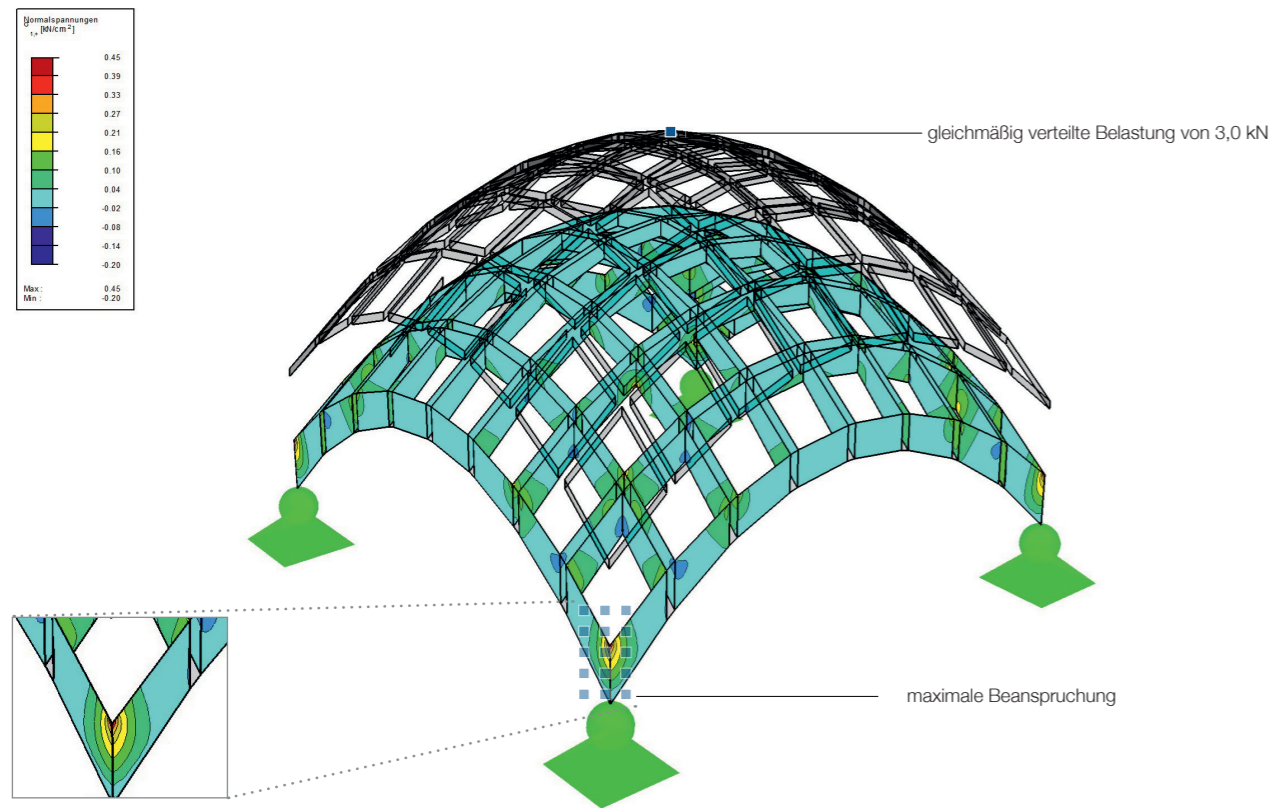
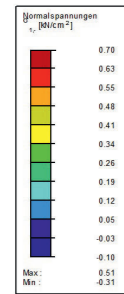


Abb. 180
Statisches Modell der Prototyp-Translationsschale unter Flächenlast

Maximale Belastung | Durch die gute Ableitung der Lasten als Druckkräfte kommt es lt. Simulation kaum zu Zugspannungen in den Keramikeilen oder Fügungen. Nur die Grenzbedingungen für solche Zugspannungen wurden ermittelt und justiert. Bei realer Belastung würde lt. Simulation ein Versagen durch übermäßige Druck- oder Scherbeanspruchung in den Eckmodulen erfolgen. Laut FE-Berechnung kommt es zur Situation, dass die Schale leicht verformt wird und dann gewissermaßen über das Auflager „hinausschiebt“, und so ein Zug an der Moduloberseite entsteht (Abbildung 180 - Eckbelastung).

Es zeigt sich, dass die Prototypform einer solchen gleichmäßigen Flächenlast, wie sie etwa durch eine Eindeckung und eine Schneelast hervorgerufen werden würde, gut widerstehen kann. Die Verformung wird in RFEM mit 0,1 mm berechnet und bleibt damit erwartungsgemäß gering.

Statisches Modell - Punktlast | Das statische Modell des Prototypen wurde mit einer mittigen Punktlast beaufschlagt. Solche Lasten stellen für Schalen und Gitterschalen sehr ungünstige Lastfälle dar, da dabei die Drucklinie außerhalb der Konstruktion rückt und es zu Biege- und Zugbeanspruchungen kommt.



Punktlast von 1,0 kN

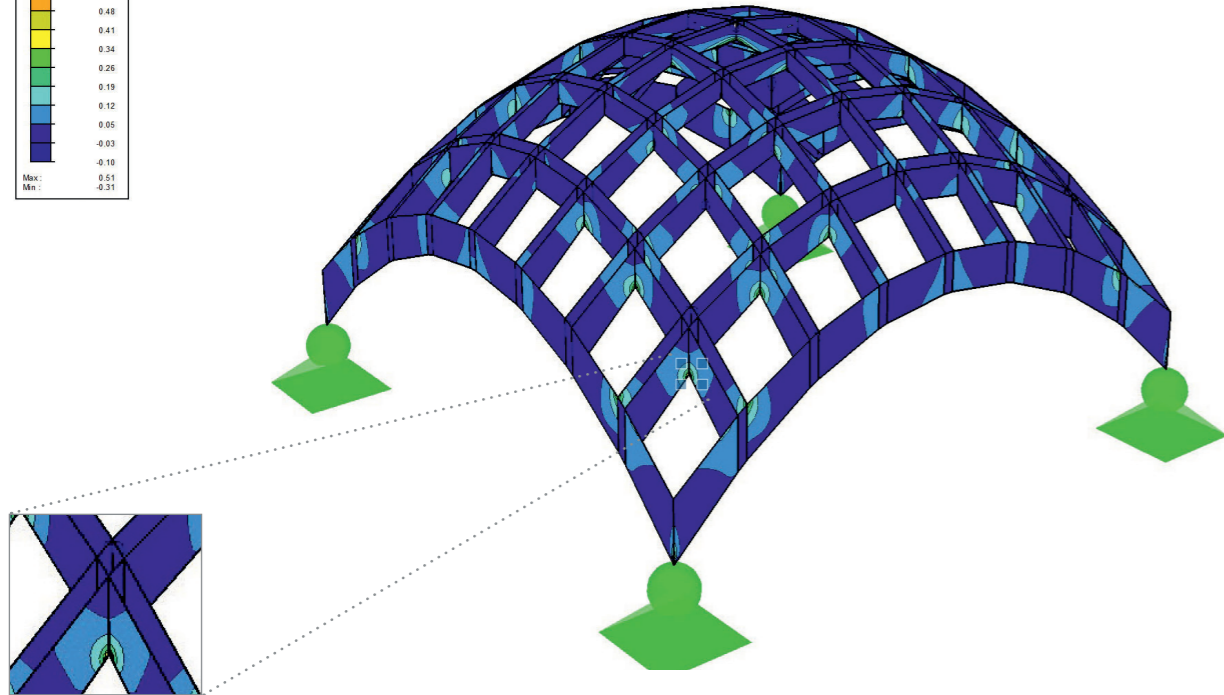


Abb. 181

Statisches Modell der Prototyp-Translationsschale unter Flächenlast

Maximale Belastung | Laut der FE-Simulation tritt bei 1,0 kN Punktbelastung in der Schalenmitte an mehreren Stellen eine erhebliche Zugkraft auf. Die maximale Zugspannung liegt lt. Simulation bei 0,51 kN/cm² und liegt damit knapp unterhalb der Belastungsgrenze der Fügung.

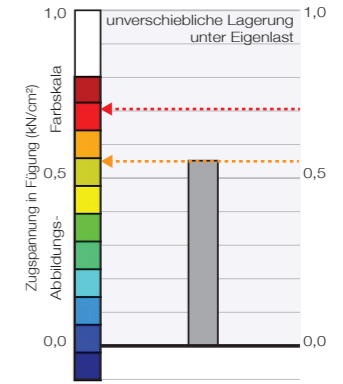


Abb. 182

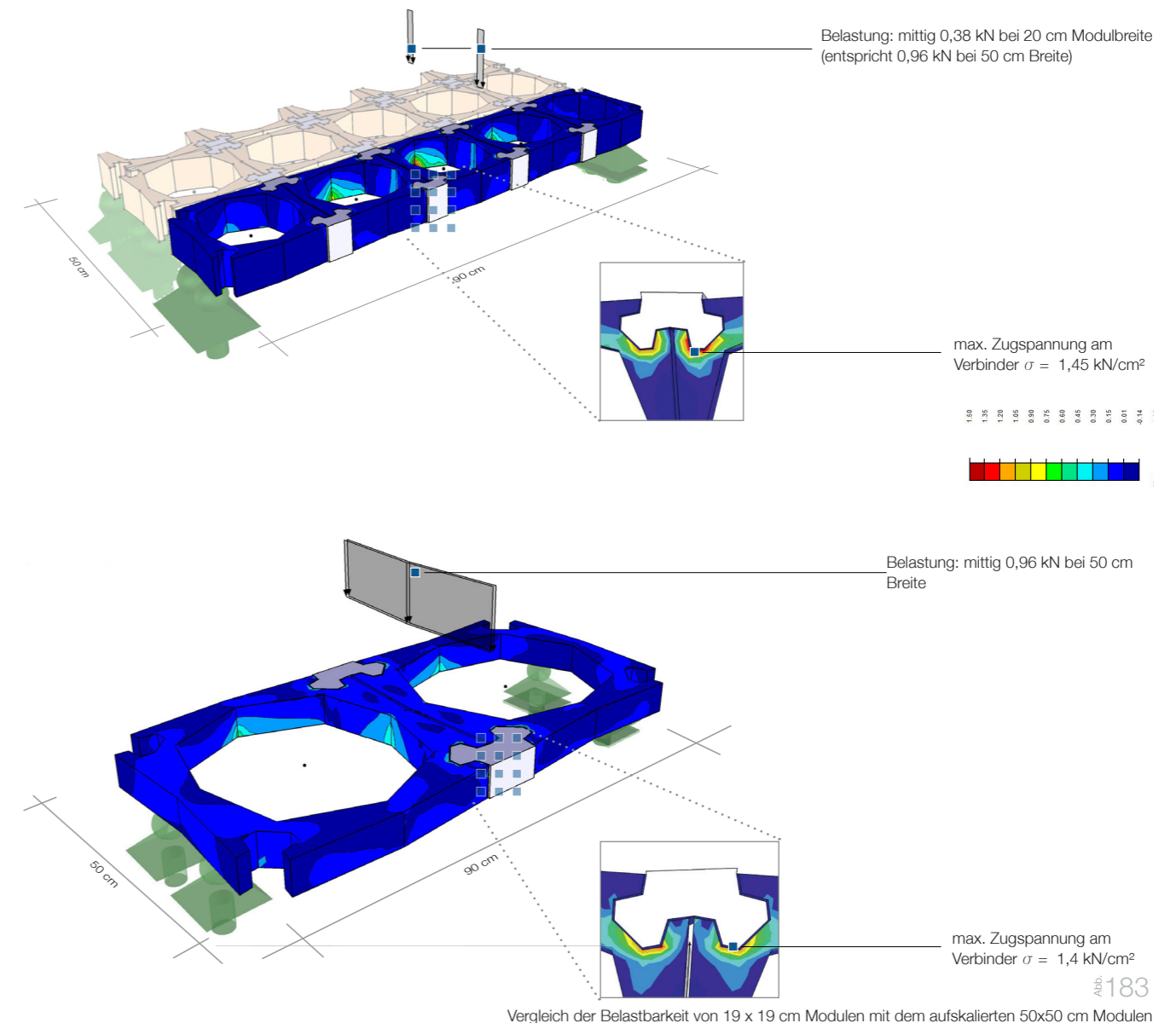
Maximale Zugspannungen in Fügung unter Eigenlast bei unverschieblichen Lagern

5.12 RFEM: Weiterentwickeltes Modul

Anpassung & Vergrößerung | Das weiterentwickelte und auf 50x50 cm vergrößerte Modul (Punkt 4.9) wurde entsprechend den zuvor genannten Erkenntnissen in RFEM modelliert, um einen Vergleich zum kleineren Modul des Prototypen herstellen zu können. Für die Modellierung wurden an den Verbindungsstellen Kontaktvolumen (Abbildung 156) (nur Zugkräfte werden übertragen) in der Fügung verwendet. Die Simulation des angepassten und vergrößerten Moduls wurde mit dem getesteten Prototypmodul verglichen. Für beide Berechnungen (Abbildung 183) wurden die Bruchbelastungen aus dem Biegezugversuch verwendet und die gleiche Nennspannweite von 90 cm gewählt (siehe Punkt 5.10 - Tragwerksbeurteilung). Um einen Vergleich der beiden Konstruktionen zu ermöglichen, wurde die Prototyp-Trägerbreite auf 50 cm hochgerechnet, was der Breite des Trägers aus den vergrößerten Modulen entspricht.

Die beiden in Abbildung 183 dargestellten Situationen ergeben sehr ähnliche Zugspannungen im mittleren Verbinder. Obwohl die Belastung bei einer Spannweite von ca. 90 cm etwas ungünstiger erfolgt (weil der Knoten in der Trägermitte liegt), werden dennoch gleiche bis geringfügig niedrigere Zugspannungen ermittelt. Auch für die Verformung wird ein sehr ähnliches Verhalten ermittelt, wobei für die großen Module mit 2,4 mm (vs. 2,7 mm) etwas niedrigere Werte ermittelt werden.

Aus dem nahezu identischen statischen Verhalten kann abgeleitet werden, dass das entwickelte statische System ebenso skaliert und in guter Näherung verwendet werden kann. Die Belastbarkeitsgrenzen können wie zuvor aus den Biegezugversuchen (Punkt 5.3 und 5.10) verwendet werden.

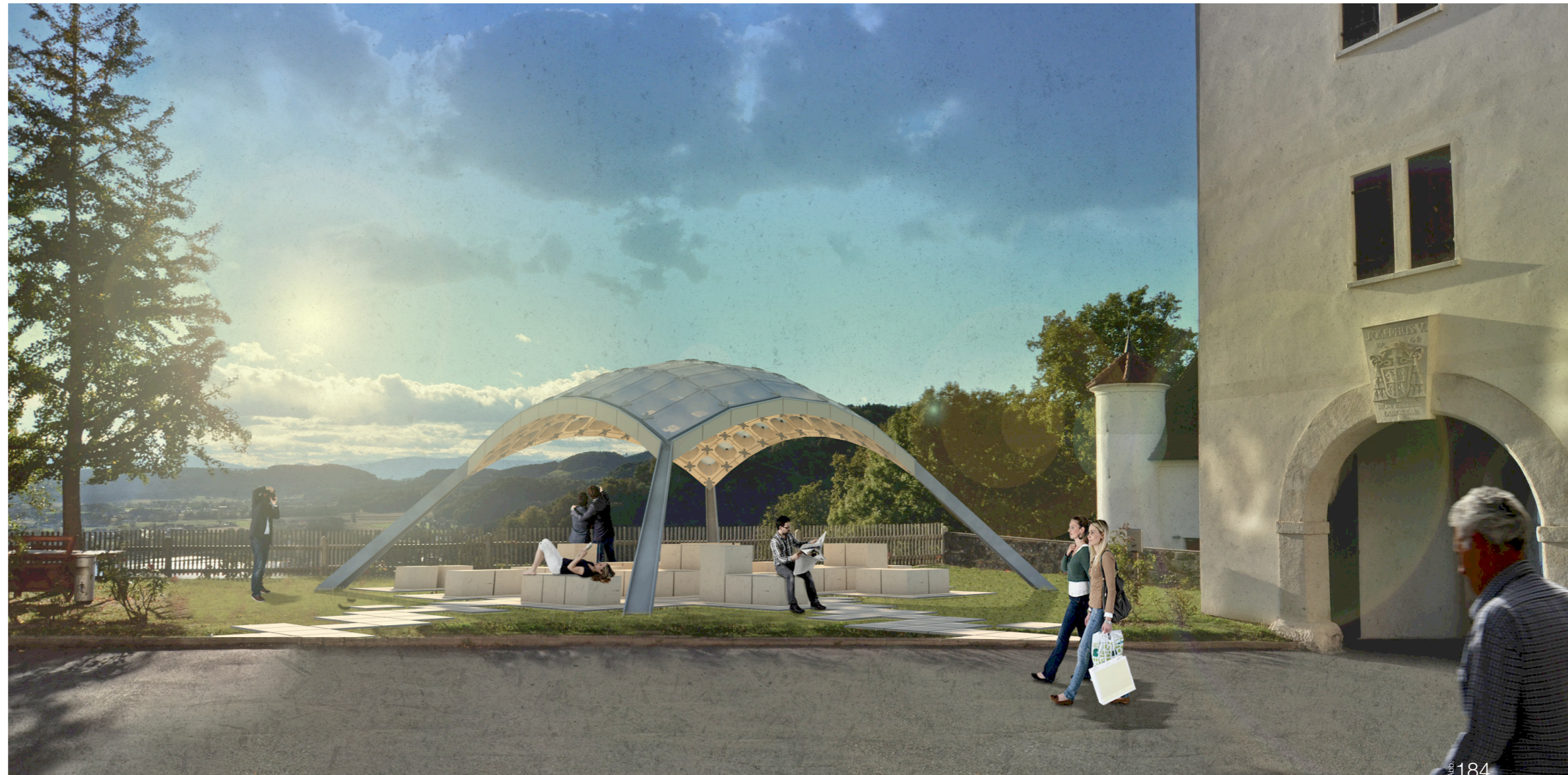


5.13 RFEM: Forschungspavillon

Forschungspavillon Schloss Seggau | Für den Innenhof des Schloss Seggau in Seggauberg (Leibnitz/Steiermark), wurde mit dem Bausystem ein Forschungspavillon entworfen. Anhand dieser konkreten Bauaufgabe wurde das System zur Anwendung gebracht und verschiedene Detailpunkte verfeinert und weiterentwickelt. Neben einer komplexeren Gesamtform durch die Verwendung von rautenförmigen Modulen wurden reale Anforderungen, wie Eindeckung zur Wasserableitung sowie Stützen und Fundamente zur Lagerung, abgedeckt. Der Pavillon nimmt dabei die Proportionen des Bauplatzes auf und erzeugt am Rande des historischen Stiftshofes einen Raum zum Verweilen.

Für die Besucher des Schloss Seggau, für Gäste des dort untergebrachten Hotels bzw. die zahlreichen Teilnehmer von Seminaren bietet der Pavillon Möglichkeit einen Blick auf das Bausystem zu werfen. Vom Pavillon aus bietet sich - eingebettet in das Grün des Hofes - auch ein wunderbarer Blick auf die historischen Arkadengänge, als auch eine Aussicht über den Sulmsee ins steirische Hügelland.

Details dazu finden sich in der Masterarbeit „Ceramic-Translation - Teil II - Variation und Ausformung“.



Visualisierung des Forschungspavillon im Hof des Schloss Seggau

Konstruktion des Pavillons | In Abbildung 185 ist das konstruktive Prinzip des Pavillons dargestellt. Es handelt sich um eine im Grundriss rautenförmige Translationsschale mit Seitenlängen von 5 m für den Grundraster. Die Module entsprechen grundsätzlich denen aus 4.8, enthalten jedoch, neben der Rautenform, noch einige weitere formale Anpassungen in Form von Abrundungen (siehe ebenfalls „Ceramic-Translation - Teil II - Variation und Ausformung“). Über die Verbinders sind mit demselben System geschnittene Randsteine angebracht, die ebenfalls eine statische Funktion übernehmen. Daneben zeigen sie nach außen - durch die Randmodule - ein einheitliches Bild der Keramik. Auch ermöglichen sie durch ihre angepassten, systemimmanenten Schnitte eine gezielte Wasserableitung in einer Rinne hin zu den Stützen, über die letztlich die Ableitung erfolgt.

Die Eindeckung erfolgt über ebene Glasplatten, die mit einem entwickelten System befestigt sind und der oberen Schnittführung der Module folgen. Da eine der oberen Randkurven über zwei Module linearisiert sind, können jeweils zwei Felder zusammen gefasst werden, was die Herstellung vereinfacht und die Anzahl der Sillikonfugen und der Haltepunkte verringert.

Die Stützen sind in der Höhe der Schale mit Eindeckung konstruiert und bilden mit einem konstruktiv günstigen I-förmigen Profil (2 cm Flächendicke) eine tangentielle Verlängerung der diagonalen Drucklinien und können dadurch recht schlank gehalten werden. Am Stützenfuß sind diese unmittelbar eingespannt und übernehmen auch die Wasserableitung zum Boden.

Eckdaten des Pavillons:

Masse Keramik:	4.070 kg
Masse Glaseindeckung (1 cm)	750 kg
Fläche Pavillon:	23 m ²
Masse Verbinder (PVC):	450 kg
Masse Stützen:	850 kg
Spannweite Seite:	5,0 m
Spannweite Diagonale:	8,7 / 5,3 m
Stützweite Diagonale:	13,0 m / 7,9 m
Stützhöhe:	1,95 m
Durchgangshöhe:	2,8 m
Höhe Mitte:	3,6 m

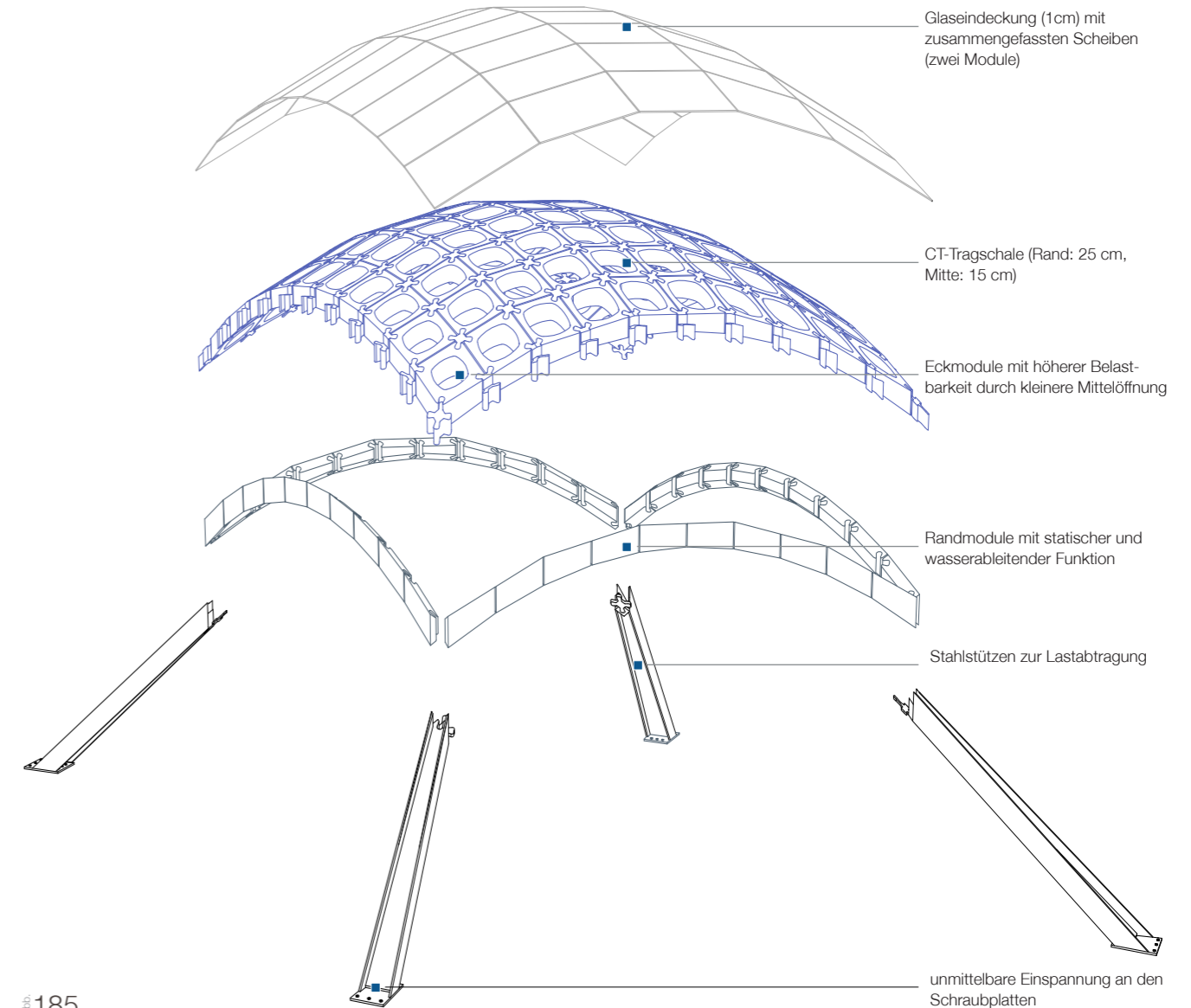


Abb. 185
Konstruktive bzw. statische Elemente des Pavillons

Lagerung und Fundamente des Pavillons |

Die vier Eckstützen der Translationsschale bieten am Kopfende durch eine komplementäre Fassung eine Aufnahmemöglichkeit für die Eckknoten der Translationsschale. Dadurch und durch die der Krümmung folgenden Stütze, können die Schubkräfte gut abgeleitet werden. Am Fußende der etwas verbreiterten Stütze befindet sich eine in Spannrichtung vergrößerte Stirnplatte. Dadurch wird eine unmittelbare Einspannung erreicht. Über dieses Profil erfolgt oberflächlich auch die Wasserableitung zu Schlitzungen am Stützenfuß. Die Ableitung erfolgt dann durch ein einbetoniertes Rohr. Zur Weitergabe der Schubkräfte ist an der Fußplatte eine Schubknagge angebracht. Nach der Justierung wird der Stützenfuß mit Mörtel vergossen.

Aus der Berechnung für Abbildung 190, also unter Eigenlast inklusive der Glaseindeckung, ergibt sich für die Lager folgende Belastung je Einzellager:

Auflagerreaktion an kurzer Diagonale:

Vertikalkraft:	17 kN
Horizontalkraft:	11 kN

Auflagerreaktion an langer Diagonale:

Vertikalkraft:	20 kN
Horizontalkraft:	20 kN

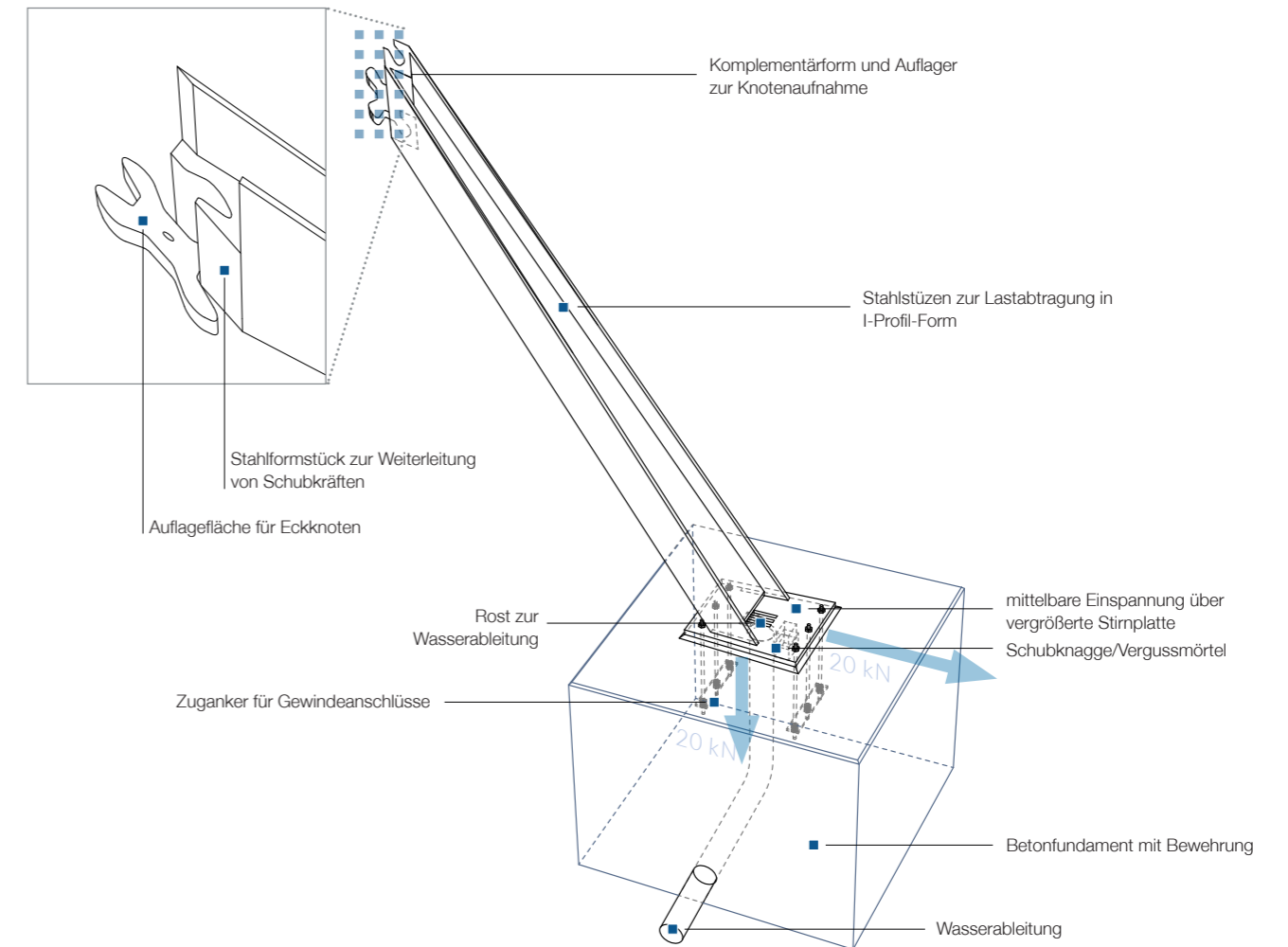


Abb. 186
Stütze und Fundament des Forschungspavillons

Statisches Modell - Entwurf | An dieser Stelle soll, mit den zuvor entwickelten Methoden, eine statische Analyse und Beurteilung des Entwurfes vorgenommen werden. Das Modell wurde dabei gemäß den zuvor erarbeiteten Prinzipien konstruiert und die Simulation durchgeführt. Die FE-Elementgröße wurde mit 5 cm festgelegt, um die Anzahl der FE-Elemente in der gleichen Größenordnung, wie beim Modell des Prototypen, zu halten. Die in der Masterarbeit „CeramicTranslation - Teil II - Variation und Ausformung“ für den Entwurf verwendeten Module unterscheiden sich - abgesehen von der Größe - auch leicht in der Form von denen des Prototypen. In den Simulationen wurden die Kennwerte der bisher beschriebenen Module verwendet, weil die in der Visualisierung verwendeten weder gefertigt noch getestet wurden.

Während des Entwerfens haben sich aus den Simulationen dabei auch Feedback-Schleifen ergeben, und die gewonnenen Erkenntnisse sind wiederum in den Entwurf eingeflossen. Im Wesentlichen sind das folgende Punkte:

- Die Gesamtform beruht, wie schon beim Prototypen, auf einer vorteilhaften Schalenform mit zu Grunde liegenden parabelförmigen Randkurven, die eine sehr geringe Verformung und niedrige Zugbeanspruchungen der Keramikmodule ergeben.

- Es wurden für die oberen und unteren Begrenzungsflächen unterschiedliche Randkurven verwendet. Die Schale weist dadurch eine größere Dicke zu den Auflagerpunkten hin auf, während die Schalenmitte schlanker und leichter ist.

- Die Eckmodule sowie die beiden jeweils angrenzenden Module wurden gemäß der ermittelten Beanspruchung adaptiert und weisen durch eine Verkleinerung der mittigen Öffnungen verstärkte Stege auf. So konnte auf eine auf mehrere Knoten verteilte Lagerung verzichtet werden.

- Die vier Stützen sind so ausgebildet, dimensioniert und ausgerichtet, dass sie die Kräfte - trotz schlanken Querschnitts - gut ableiten können und nur eine geringe Einspannung benötigen.

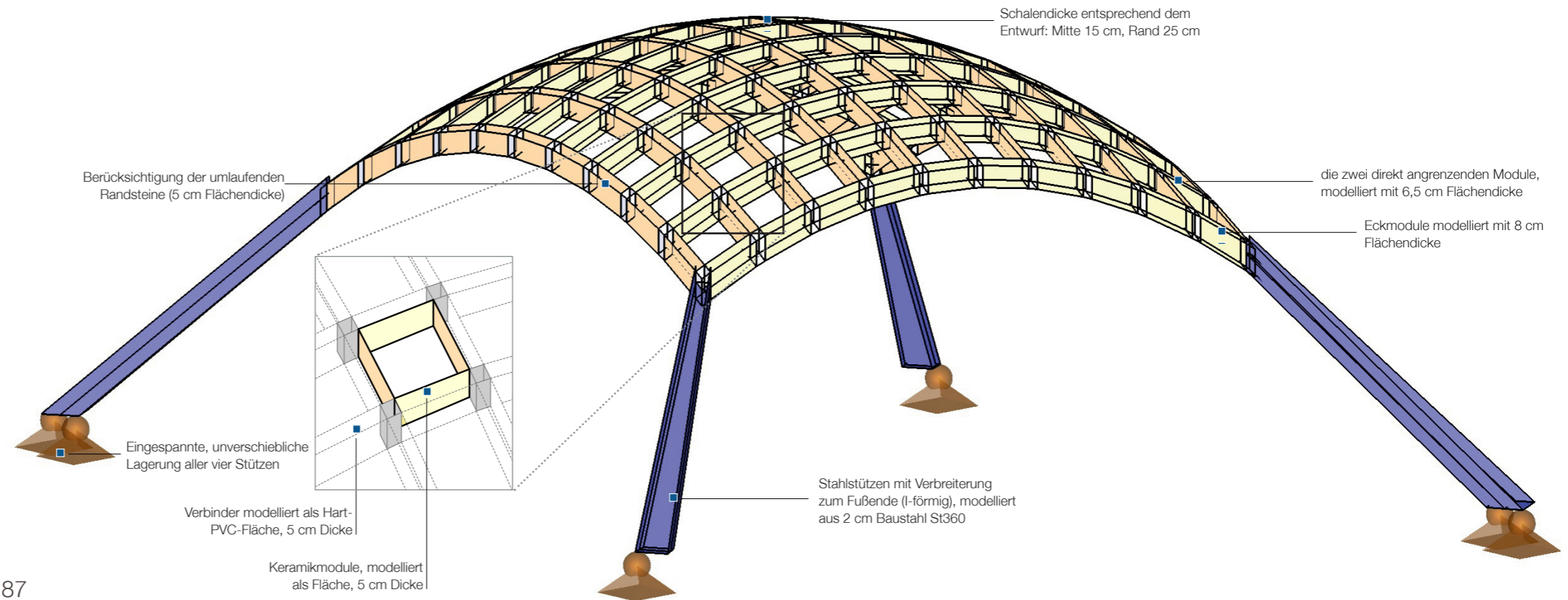


Abb. 187
Statisches Modell des Forschungspavillon

Statische Beurteilung - Eigenlast | Trotz der beschriebenen Maßnahmen ist ersichtlich, dass die Beanspruchungen zu den Auflagerpunkten hin zunehmen, weil sich die Druck- und Gewichtskräfte auf immer weniger Module verteilen können. An den Eckmodulen liegt die Zugspannung bei etwa 75 % (0,41 kN/cm²) der maximalen Zugspannung von 0,54 kN/cm² an der Fügung (siehe Punkt 5.10 - Tragwerksbeurteilung).

Verformung | Die Verformung der Schale unter Eigenlast ist in Abbildung 189 gezeigt und liegt laut RFEM-Simulation bei maximal 0,7 mm. Die Verformung entspricht grundsätzlich einer gleichmäßigen „Setzung“ der Schalenmitte, die durch eine Biegung in den PVC-Knoten entsteht.

Einspannung der Stützen | Ob die Stützen eingespannt sind oder nicht, hat bei der entwickelten Geometrie lt. FE-Simulation nur einen recht geringen Einfluss auf die Spannungen und Verformungen der Translationsschale. Leichte Vorteile ergeben sich bei der gewählten unmittelbaren Einspannung.

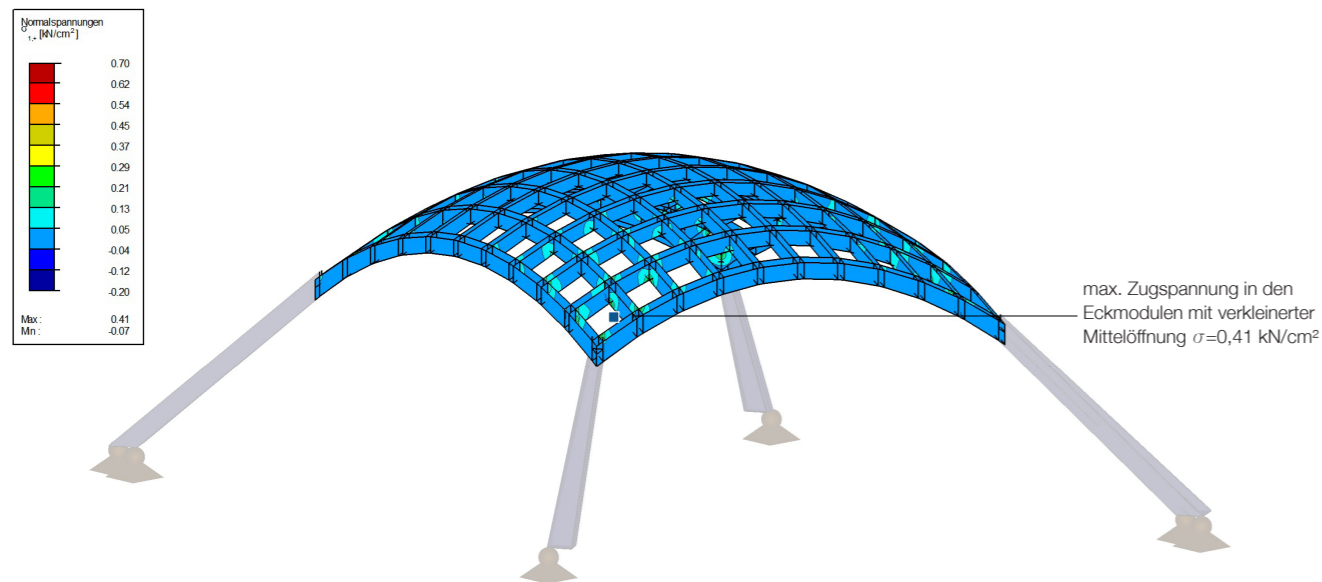


Abb. 188
Zugspannungen in der Translationsschale des Pavillons

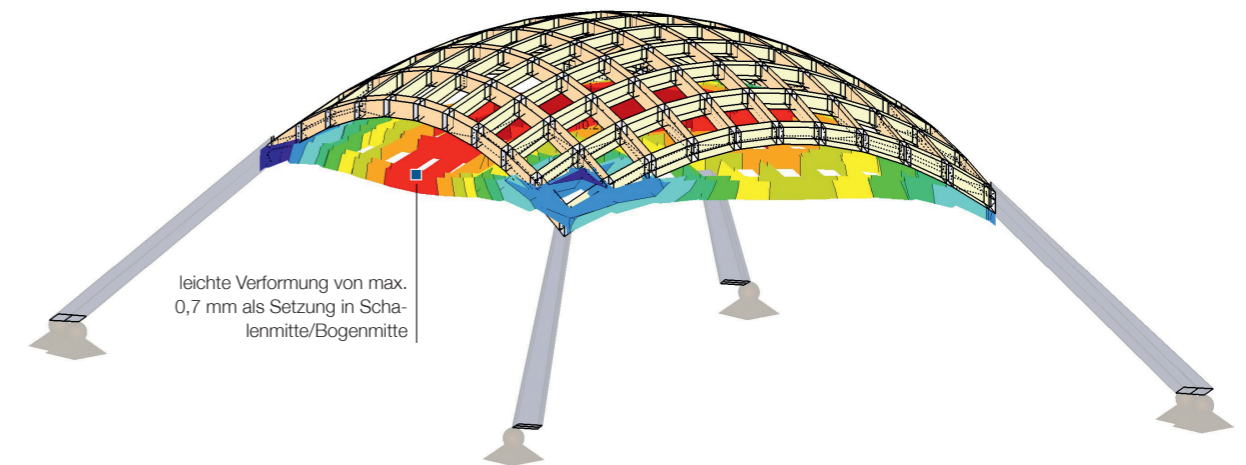


Abb. 189
Überzeichnete Verformung in der Translationsschale des Pavillons

Eigengewicht + Flächenlast (Glas) | Es wurden zwei Fälle mit einer gleichmäßigen Flächenlast berechnet. In Abbildung 190 greifen gleichmäßig verteilte Lasten an den Knoten an, was einer Glaseindeckung mit Befestigung an den Verbindern entspricht. Die Gewichtslast durch die Glaseindeckung beträgt zusätzlich zur Eigenlast 8,3 kN. Es ergibt sich eine maximale Zugspannung in der Keramik von 0,47 kN/cm². Die globale Verformung beträgt in der Simulation maximal 0,8 mm in Schalenmitte.

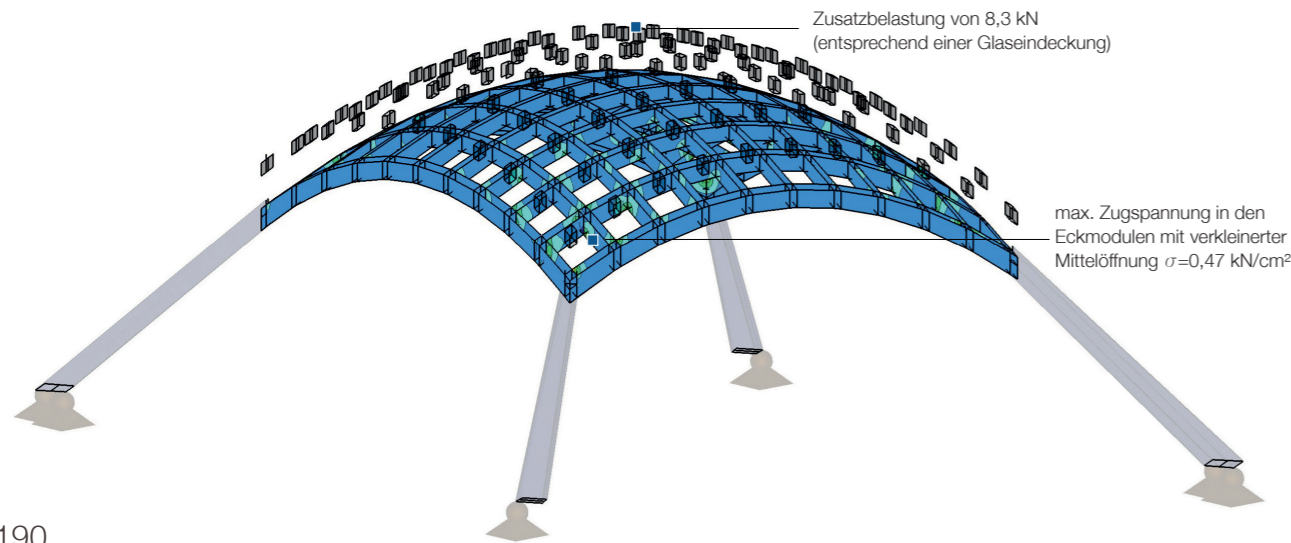
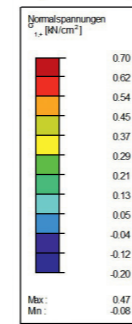


Abb. 190
Zugspannungen in der Translationsschale des Pavillons (mit Glaseindeckung)

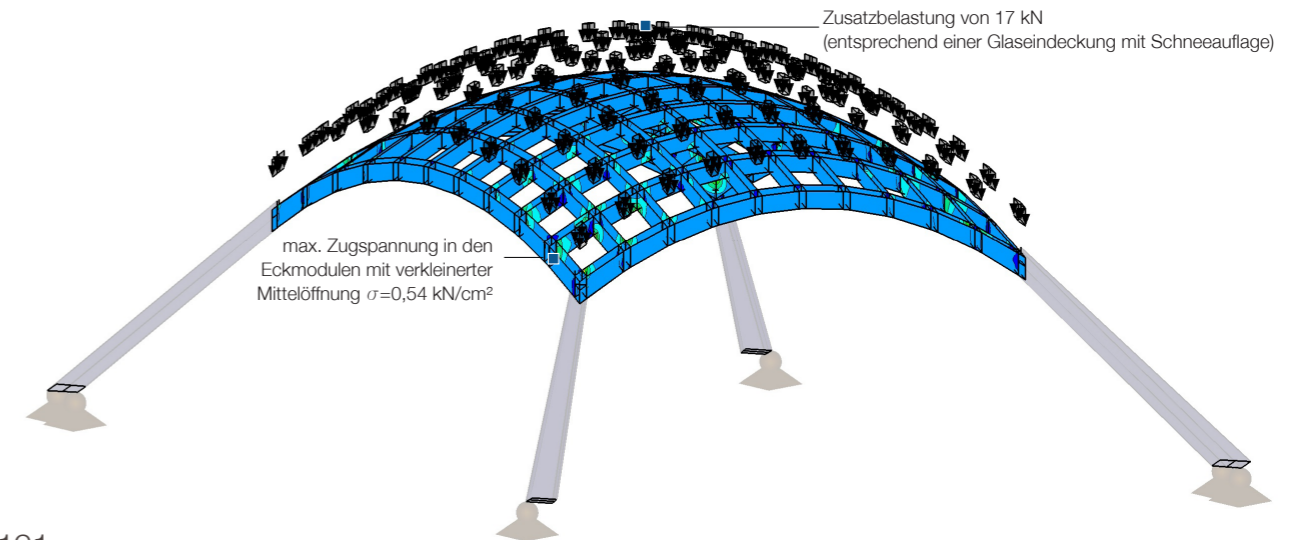


Abb. 191
Zugspannungen in der Translationsschale des Pavillons (mit Glaseindeckung + Schneelast 0,36 kN/m²)

Eigengewicht + Flächenlast (Glas + Schnee)

Verdoppelt man diese Flächenlast auf ein Maß, das einer zusätzlichen Schneelast von 0,36 kN/m² entspricht, so erhöht sich die Verformung auf 0,9 mm. Dies entspricht etwa der doppelten Flächenlast der reinen Glaseindeckung. Die maximale Zugspannung in der Keramik steigt im Eckmodul auf 0,54 kN/cm² und erreicht damit die Belastungsgrenze.

Eigengewicht + Halbflächenlast | Einen ungünstigeren, aber durchaus realistischen Fall, stellt eine Halbflächenlast dar. Die gesamte Flächenlast auf einer Schalenhälfte wurde mit 13,8 kN angesetzt. Trotz geringerer Gesamtlast als bei der Vollflächenlast vergrößert sich die maximale Zugspannung an der Fügung bereits auf 0,54 kN/cm².

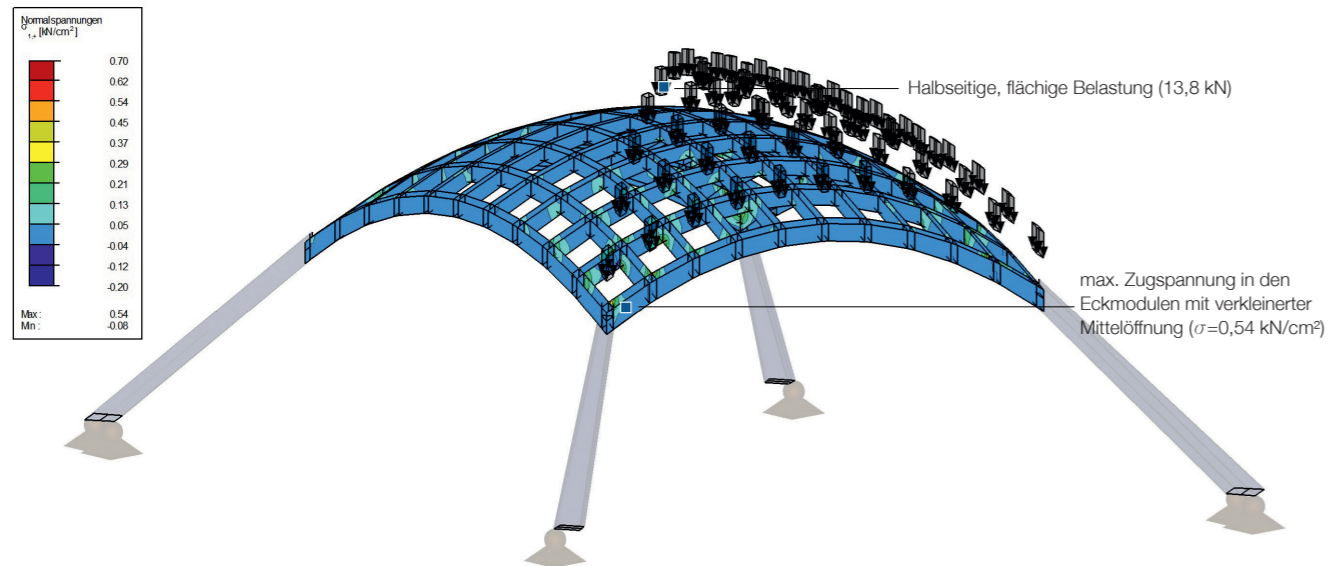


Abb. 192
Zugspannungen in der Translationsschale unter Halblast und Eigengewicht

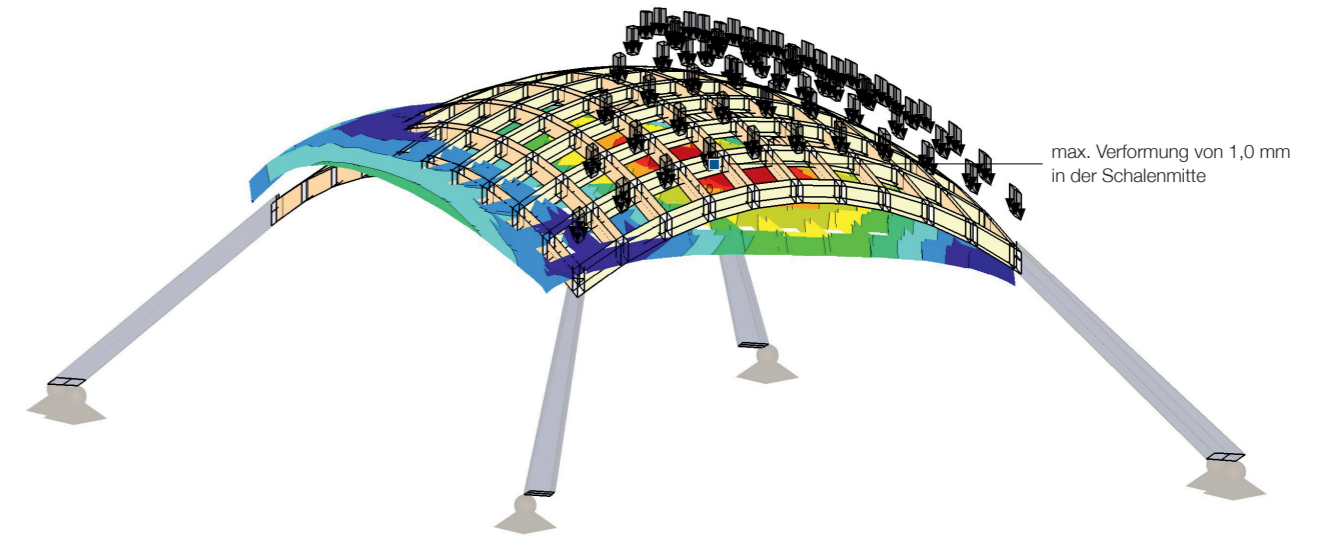


Abb. 193
Verformung der Translationsschale des Pavillons unter einer Halbflächenlast

Die Verformung der Schale wird durch die Halbflächenlast stark asymmetrisch und beträgt in der Simulation maximal 1,0 mm in der Mitte der Bögen bzw. der belasteten Halbschale (Abbildung 193). Die Verformung liegt damit höher als bei der insgesamt größeren vollflächigen Last.

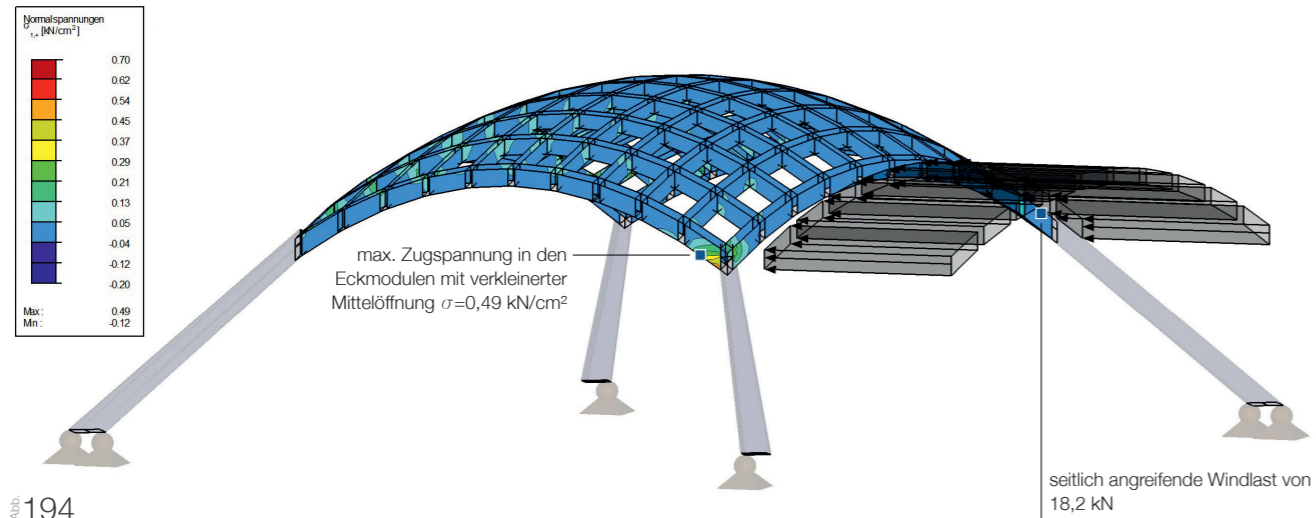


Abb. 194
Zugspannungen in der Translationsschale des Pavillons mit angelegter Seitenlast/Windlast

Eigengewicht + Windlast | In der Simulation wurde an die Seitenfläche eine seitliche Last von insgesamt 18,2 kN angelegt. Die Belastung stört das Kuppeltragverhalten und die Zugbeanspruchungen an den ungünstigsten Stellen steigen von 0,41 kN/cm² auf 0,49 kN/cm². Die tatsächliche Beanspruchung, die durch einen Seitenwind entsteht, müsste durch genauere Untersuchungen des Strömungsverhaltens ermittelt werden. Eventuelle entstehende Sogkräfte oder Ähnliches sind also nicht berücksichtigt.

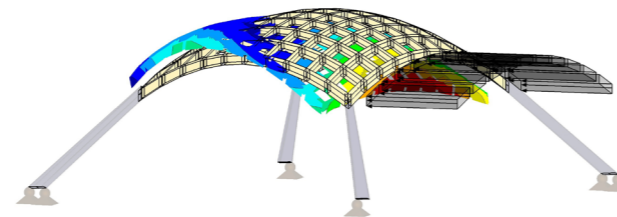


Abb. 195
Verformung in der Translationsschale bei einer seitlichen Last

Eigengewicht + Punktlast | Zusätzlich zur Eigenlast wurde eine mittige Punktlast von 1,0 kN (entspricht etwa einer Person) angelegt. Für Druckkonstruktionen stellt dies eine relativ ungünstige Belastung dar, ist aber in Relation zum Eigengewicht noch gering. Dies bewirkt eine Vergrößerung der auftretenden Zugspannungen in der Keramik um ca. 0,01 kN/cm² auf 0,42 kN/cm².

Bis zur Zugspannung von 0,54 kN/cm² an der Keramikfügung kann die Punktlast lt. Simulation auf 9 bis 10 kN erhöht werden. Die Module mit der höchsten Belastung finden sich auch dabei in den Ecken sowie im Bereich der Krafteinleitung am Verbinder. Bei dieser Belastung liegt die globale Verformung des berechneten Modelles bei maximal 1,5 mm in der Schalenmitte.

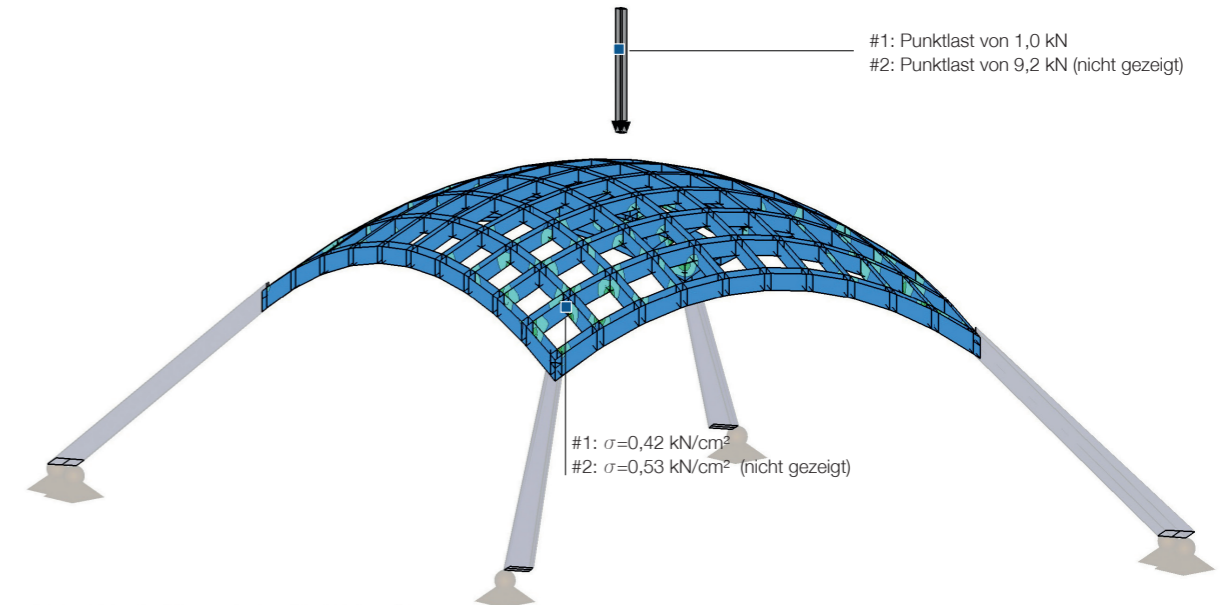


Abb. 196
Zugspannungen in der Translationsschale des Pavillon bei einer mittigen Punktlast

Fazit zu Teil I - Tragwerksentwurf und Konstruktion | Es konnte mit dem Bau des Prototypen und den statischen Betrachtungen gezeigt werden, dass CeramicTranslation ein realisierbares Tragwerkssystem darstellt. Die folgenden Erkenntnisse konnten im Rahmen der Masterarbeit gewonnen werden:

- Je nach Form sind noch größere Spannweiten als beim gebauten Prototyp möglich. Der entworfene Forschungspavillon nähert sich dabei laut FE-Simulation den statischen Grenzen des Systems hinsichtlich der Zugbelastbarkeit der Keramik an. Es wurden unterschiedliche Lastsituationen simuliert, bei denen die Belastungsgrenzen erreicht werden.
- Das entwickelte statische Modell konnte für die Beurteilung des Entwurfes dienen. Weiters konnten die Erkenntnisse aus Simulationen schon während des Entwurfsprozesses einfließen. Von neuen Tragwerksformen kann mit dem entwickelten statischen FE-System eine Beurteilung hinsichtlich kritischer Zugbeanspruchungen vorgenommen werden.
- Es sind in allen Fällen unverschiebliche Auflager vorteilhaft. Ganz besonders trifft dies zu, wenn günstige Formen für die Gesamtkonstruktion verwendet werden, die den Prinzipien unter 3.1 bis 3.3 (Schale, Gitterschale) folgen.
- Die Modulgeometrie konnte mittels der durchgeführten Belastungsversuche und Simulationen verbessert werden. Die unter Punkt 4.8 beschriebene Weiterentwicklung berücksichtigt die im Zuge der statischen Betrachtung gewonnenen Erkenntnisse.
- Die Parameter bei der Herstellung haben hinsichtlich Zugfestigkeit einen wesentlichen Einfluss. Der Ton sollte möglichst homogen und fehlerfrei verarbeitet werden (keine Luftporen oder Extrusionsfehler). Höhere Brenntemperaturen führen in der Regel zu höheren Versinterungsgraden und damit Festigkeiten.
- Grundsätzlich verbessert eine Glasur die statische Belastbarkeit der Keramikmodule positiv. Im Wesentlichen werden dabei oberflächliche, kleinste Risse verschlossen, sodass weniger initiale Bruchstellen bestehen. Auch einem unterkritischen Risswachstum wird damit bei unbeschädigten Modulen vorgebeugt.
- In statischer Hinsicht bleibt CeramicTranslation hinter etablierten Materialien und Systemen, wie Stahl oder Holz, zurück. Es bietet jedoch gewisse, formale Möglichkeiten, um architektonisch interessante Tragstrukturen zu entwerfen. Mit etablierten, industrienahe Verfahren lassen sie sich vergleichsweise einfach herstellen.

Ausblick auf Weiterentwicklungen | Neben diesen behandelten Punkten bietet das System hinsichtlich der Statik noch einiges an Potentiale zur Leistungssteigerung. Diese könnten in künftigen Untersuchungen und Weiterentwicklungen bearbeitet werden:

- Die konkreten Auswirkungen von stärker veränderten Knotenformen, wie sie in „Teil II - Variationen und Ausformung“ vorkommen werden, wäre in einem Belastungsversuch zu erproben.
- Das statische Modell ist für die Module des Prototypen justiert und müsste mittels Belastungstest an den skalierten und angepassten Modulen überprüft, justiert und abgesichert werden.
- Über die maximale Scherbelastbarkeit der Fügungen, müsste über weitere angepasste Belastungsversuche eine Aussage getroffen werden, um sie in den FE-Modellen berücksichtigen zu können.
- Bei einer Entwicklung hin zu einem realen Bausystem sollten Untersuchungen zum Langzeitverhalten (mit oder ohne Witterungseinfluss) angestellt werden. Des Weiteren müssten die Belastungsversuche, die an Keramiken vorgenommen wurden, statistisch abgesichert werden.

- Die verwendete Tonmischung bestimmt durch die beim Brennen auftretenden chemischen und physikalischen Prozesse die Materialeigenschaften, sodass der Auswahl und Bereitung der Tonmasse wesentliche Bedeutung zufällt. Eine Evaluierung anderer Tonmassen wäre ein weiterer Schritt in Richtung Anwendung des Bausystems.
- Interne Zugelemente, die in Form von Fasern in die Keramik eingebracht werden, finden derzeit bei Technischen Keramiken Anwendung.⁶⁸ Die Anwendbarkeit für CeramicTranslation wäre zu erproben.
- Externe Zugelemente: Die Anschlussmöglichkeiten, die CeramicTranslation bietet, bieten unter anderem auch an, Zugelemente an gewissen Stellen anzubringen. Dies können beispielsweise Zugstäbe oder Zugseile sein, die dafür sorgen, dass auf die Keramik größtenteils Druckkräfte einwirken, auch wenn die Form des Tragwerkes zu stärkeren Zugkräften in den Keramik-Modulen führen würde. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn Abweichungen von Bogen- oder Schalenformen realisiert werden. Eine Analyse, an welchen Stellen dann solche Zugelemente sinnvoll wären, könnte mithilfe des statischen Modells (Punkt 5.9) erfolgen.

Ausblick auf technologische Weiterentwicklungen | Die Weiterentwicklung des Schneidewerkzeuges zu einem Industrieroboter-Werkzeug ist in konzeptioneller Form ausgearbeitet worden.

- Eine Praxiserprobung und entsprechende Weiterentwicklung von Schneidewerkzeugen bzw. Schneidewerkzeuge für einen Roboterarm und eines Stütz- und Transportsystems für die geschnittenen Steine wäre eine weitere Aufgabe.
- Die Entwicklung einer wiederverwendbaren und adaptierbaren Schalung wäre eine weitere Aufgabe und ein Schritt in Richtung reales Bausystem.
- Eine automatisierte Erstellung von Schnittparametern wäre bei realer Anwendung eines Industrieroboters notwendig. Dabei muss zur Herstellung der Module für den Entwurf eine Spiegelung des Extrusionsstranges berücksichtigt werden, um die gleich Matrize verwenden zu können.

- Die Module mit verschiedener Mittelöffnung, wie sie beim Entwurf verwendet wurden, würden idealerweise mit einer adaptierbaren Extrusionsmatrize erstellt werden, ohne die Schablone wechseln zu müssen.

CeramicTranslation - Teil II - Variation und Ausformung

| Die zweite Masterarbeit umfasst einen detaillierteren Abriss der Geschichte von Keramik in raumüberspannenden Konstruktionen. Es erfolgt eine detaillierte Darstellung von Bogen und Gewölbeformen aus Keramikelementen.

Weiters wurde eine Vielzahl von Formvariationen des Moduls unter Verwendung des Bauprinzips entwickelt. Dabei wird die große Freiheit, die man hinsichtlich der Gestalt der Extrusionsmatrize hat, benutzt, um unterschiedlichste Tragsysteme zu erzeugen.

Weiters bietet das System zur Erzeugung von Translationsgeometrien Möglichkeiten zur Variation. Es wird gezeigt, welche gestalterischen Möglichkeiten sich durch die Unabhängigkeit der oberen und unteren Begrenzungsflächen ergeben.

Es wird das Thema der Eindeckung der Keramikstruktur ausführlich behandelt und gezeigt, wie das CeramicTranslation-Tragwerk systemimmanent mit Plattenwerkstoffen eingedeckt werden kann. Dazu wurde eine entsprechende Anschlussmöglichkeit an die Knoten entwickelt.

Es wurde für den Innenhof des Schloss Seggau in Seggau/Leibnitz (Steiermark, Österreich) ein Pavillon entwickelt und geplant. Die statischen Aspekte des Entwurfes finden sich unter Punkt 5.13. Der Pavillon bringt in einer historischen Umgebung die formalen Möglichkeiten von CeramicTranslation zur Geltung. Im Entwurf wird detailliert auf das Lösen von baulichen Anforderungen und dem Entsprechen ästhetischer Ansprüche eingegangen.



Abb. 197
Visualisierung des Forschungspavillons Schloss Seggau

6

Verwendete Quellen

Adriaenssens, Sigrid (Hg.): Shell structures for architecture: form finding and optimization, Abingdon [u.a.] 2014

Barth, Christian/Rustler, Walter: Finite Elemente in der Baustatik-Praxis, Berlin 2013

Basar, Yavuz/Krätzig, Wilfried B.: Theory of Shell Structures, Düsseldorf 2000

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

Bender, Willi F.: Lexikon der Ziegel - vom Aal-Deckenziegel bis zum Zwischenwandziegel in Wort und Bild, Wiesbaden 1995

Brownell, W.E.: Structural Clay Products, Wien-New York 1976

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

Hasegawa, Takeshi (Hg.)/Hennicke, Jürgen: Gitterschalen, Stuttgart 1974

Hülseberg, Dagmar: Keramik: Wie ein alter Werkstoff hochmodern wird, Berlin [u.a.] 2014

Kuff, Paul: Tragwerke als Elemente der Gebäude und Innenraumgestaltung, Stuttgart/Berlin/Köln 2001

Lienhard, Julian/Knipppers, Jan/Cremers, Jan/Gabler, Markus: Atlas Kunststoff + Membranen: Werkstoffe und Halbzeuge, Formfindung und Konstruktion, München 2010

Lushington, Nolan/Rudorf, Wolfgang/Wong, Liliane: Entwurfsatlas Bibliotheken, Basel 2016

Naboni, Roberto/Paoletti, Ingrid: Advanced Customization in Architectural Design and Construction, Berlin 2014

Pech, Anton/Gangoly, Hans/Holzer, Peter/Maydl Peter: Ziegel im Hochbau - Theorie und Praxis, Basel 2015

Salmang, H./Scholze, H./Telle, Rainer (Hg.): Keramik, Berlin-Heidelberg 2007

Friedman/Kim/Mesa: Woven Clay conference paper ACADIA 14

Quelle: http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?_id=acadia14projects_223 in papers.cumincad.org, abgerufen am 20.08.2015

Kunz/Gratwohl: „Advanced Evaluation of Push-In Data for the Assessment of Fiber Reinforced Ceramic Matrix Composites“ in: Advanced Engineering Materials Volume 3, Issue 6, 2001, S. 371–379

Leybold-Johnson, Isobel: Wie Roboter die Architektur verändern, Zürich 2014

Quelle: <http://www.swissinfo.ch/ger/eine-revolution-aufbau-en-wie-roboter-die-architektur-veraendern/38400130>, abgerufen am 03.10.2016

Pagliosa, Carlos: Versuchs-Scriptum: „Mechanisches Verhalten von Keramik“, Werkstoffpraktikum WS- SS 2003/ 2004, ETH Zürich

Reichmann, Klaus: Vorlesungs-Script TU-Graz „Materialchemie“, Graz 2015

Schwartz, Mathew/Prasa, Jason: „RoboSculpt - Unique molds for design with minimal waste „ in: Rob | Arch 2012, Wien 2013

Broschüre: Fischer Injektions-System FIS, Fischer Austria GmbH, Traiskirchen

Quelle: http://www.fischer.at/PortalData/1/Resources/service/sales-documents/documents/2012-05-31-FISV_106367-de.pdf, abgerufen am 22.08.2016

Datenblatt: Keramische Massen - G&S 254, Goerg & Schneider GmbH u. Co. KG, Siershahn
Quelle: <http://www.keramische-massen.com/de/produktliste.raw?task=download&fid=107>, abgerufen am 22.08.2016

Broschüre: Referenzobjekte, Moeding Keramikfassaden GmbH, Marklkofen, Deutschland
Quelle: http://www.moeding.de/cms/upload/info-material/Referenzliste_sept-2011.pdf, abgerufen am 09.01.2017

Wikipedia: Kettenlinie (Mathematik),
Quelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Kettenlinie_\(Mathematik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Kettenlinie_(Mathematik)), abgerufen am 03.10.2016

Wikipedia: Technische Keramik,
Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Technische_Keramik, abgerufen am 03.10.2016

Wikipedia: Kettenlinie (Mathematik),
Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Klinker>, abgerufen am 03.10.2016

Abb.	Seite	
1	13	Venus von Dolni Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b8/Vestonicka_venuse_edit.jpg , abgerufen am 17.05.2016
2	13	Früher gebrannter Tonziegel Quelle: Brownell Wayne Ernest: Structural Clay Products
3	14	Ziegel mit Inschrift Quelle: http://www.ancient.eu/uploads/images/display-2960.jpg?v=1431032488 , abgerufen am 01.03.2016
4	15	Antike und frühgeschichtliche Transport- und Aufbewahrungs-Gefäße Quelle: http://www.deutsches-museum.de/fileadmin/Content/010_DM/020_Ausstellungen/040_WerkstoffeProduktion/070_Keramik/020_Ausstellung/Geschichte_der_Keramik.jpg , abgerufen am 01.01.2016
5	16	H&D-Kaiserziegel Quelle: http://www.historic-brick.com/img/HD-Kaiserziegel.jpg
6	16	Historische Dacheindeckung Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d3/Tiled_roof_in_Dubrovnik-edit.jpg , abgerufen am 01.03.2016
7	17	Liegende Strangpresse (ca. 1800) Quelle: Willi Bender, Lexikon der Ziegel
8	18	Gewölbe der Union Station (Gustavino) Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/38/Pittsburgh_Union_Station_Rotunda_1876px.jpg/800px-Pittsburgh_Union_Station_Rotunda_1876px.jpg , 01.03.2016
9	21	Einteilung von Keramiken nach dem Gefüge Quelle: Salmang, H./Scholze, H./Telle, Rainer (Hg.): Keramik, Berlin-Heidelberg 2007
10	22	Grobkeramik: Moderner Hochlochziegel Quelle: http://www.1a-thb.de/images/sampledatabaubautechnik/Poroton_T10.jpg , abgerufen am 01.03.2016
11	24	Porzellan-Gefäße Quelle: http://www.yankodesign.com/images/design_news/2010/08/25/porzellanmit-griff01.jpg , abgerufen am 10.10.2016
12	26	Technische Keramiken Quelle: https://www.ceramtec.de/_img/content/event.amb.10.jpg , abgerufen am 01.03.2016

Abb.	Seite	
13	28	Verschiedene Tonmassen Quelle: http://www.dusyma.de/shop/images/product_images/popup_images/518539_tif.jpg , abgerufen am 01.03.2016
14	31	Messing-Pressform für die industrielle Produktion von Dachziegeln Quelle: Eigene Abbildung, Motiv: Fa. Tondach Gleinstätten
15	33	Extrudieren Quelle: Salmang/Scholze/Telle 2007
16	33	Industrielle Ziegelproduktion mittels Extrudieren und Schneiden Quelle: eigene Abbildung (Motiv: Strangextruder der Firma Tondach Gleinstätten/Wienerberger)
17	34	Typische Extrusionsfehler Quelle Salmang/Scholze/Telle 2007
18	34	Fließtextur beim Reduzieren des Strangquerschnitts Quelle: Salmang/Scholze/Telle 2007
19	37	Phasen beim Trocknen und Sintern Quelle: TU Graz, Prof. Reichmann
20	40	Quelle http://www.robarch2012.org/wp-content/uploads/2011/11/2_Robotic-Fabrication-of-Non-standard-Brick-Wall-Professorship-Gramazio-Kohler-Architecture-and-Digital-Fabrication-ETH-Zurich.jpg
21	40	Positionierung eines vorgefertigten Fassadenelementes Quelle: http://www.floornature.com/media/photos/38/7617/innovative_design_gramazio_kohler_gantenbein_wall.jpg , abgerufen am 01.03.2016
22	41	Weingut Gantenbein Quelle: http://c1038.r38.cf3.rackcdn.com/group5/building41989/media/uqig_weinbau_gantenbein_fassade.jpg , abgerufen am 01.03.2016
23	42	3D-Druck Quelle: http://www.imprimalia3d.com/sites/default/files/imagenes/BBVA-OpenMind-Ventana-Impresoras-3D-construccion-3.jpg
24	42	Gestapelte Module Quelle: http://www.wired.com/wp-content/uploads/2014/06/printed-clay-04.jpg , abgerufen am 01.03.2016

Abb.	Seite	
25	43	Weben mittels Roboter Quelle: http://www.wired.com/wp-content/uploads/2014/06/printed-clay-10.jpg , abgerufen am 01.03.2016
26	43	WovenClay Detailansicht Quelle: http://www.wired.com/wp-content/uploads/2014/06/printed-clay-01.jpg , abgerufen am 01.03.2016
27	44	Presswerkzeug Quelle: Linkliterative Prozesse zur Herstellung von wiederverwendbaren Schalungsformen für doppelt gekrümmte Betonbauteile, Florian Landsteiner, 2015
28	44	Roboter-Arm beim Formen Quelle: Linkliterative Prozesse zur Herstellung von wiederverwendbaren Schalungsformen für doppelt gekrümmte Betonbauteile, Florian Landsteiner, 2015
29	45	Abtragen mit einem Schneidewerkzeug Quelle: http://www.smart-art.org/cadop/Robosculpt_Minimal_Waste_Manufacturing.pdf
30	45	Polystyrol-Unterbau mit Wachstonmasse Quelle: http://smart-art.org/file/2015/05/RoboSculpt_Overview_1-864x576.jpg , abgerufen am 01.03.2016
31	46	Stereolithographischer Druck Quelle: http://www.3ders.org/images2016/tethon-3d-releases-porcelite-ceramic-3d-printing-resin-for-sla-dlp-3d-printers-1.jpg , abgerufen am 01.03.2016
33	50	Bogenkonstruktionen Quelle: Hasegawa 1974
32	50	Ideale Bogenform und Kugelkonstruktion Quelle: Hasegawa 1974
34	52	Systematik der Flächen Quelle: Lienhard/Knippers/Cremers/Gabler 2010
35	53	Parabelbasierte Translations- bzw. Rotationsfläche Quelle: eigene Abbildung
36	54	Hängemodell mit Tuch bzw. Netz Quelle: Hasegawa 1974

Abb.	Seite	
37	57	Gitterdach des British Museum Quelle: http://www.detail.de/inspiration/sites/inspiration_detail_de/uploads/imagesResized/projects/780_2013070910243752fb7f9974d4ef7f8de0b0a89ab2b8df7ce8ca68.jpg
38	58	Translationsnetz der Schale Quelle: https://www.bauforumstahl.de/upload/galleries/Translationsnetz-Schindelzuschnitt.jpg , abgerufen am 13.10.2016
39	59	Untersicht der Translationsschale - St.Antony Quelle: https://www.bauforumstahl.de/upload/galleries/St_Antony_1063_07.jpg , abgerufen am 13.10.2016
40	59	St. Antony - Translationsschale und Ausgrabungsstätte Quelle: https://www.bauforumstahl.de/upload/galleries/St_Anthony_1063_09.jpg , abgerufen am 21.08.2016
41	60	Mansueto Library Quelle: http://www.bayerische-staatszeitung.de/uploads/RTEmagicC_mansueto_library_chicago.jpg.jpg , abgerufen am 21.10.2016
42	61	Innenraum Mansueto Library Quelle: http://img.zeit.de/studium/2016-02/hochschulen-schoensten-unis-campus-bibliothek-weltweit-fs-bilder/bitblt-880x585-b34d4e9c7095038e9b425082ffc9d-f8cc1cc8163/universitaeten-weltweit-12.jpg , abgerufen am 21.08.2016
43	65	Erzeugung einer Translationsfläche Quelle: eigene Abbildung
44	66	CeramicTranslation Systemerklärung 1 Quelle: eigene Abbildung
45	67	CeramicTranslation Systemerklärung 2 Quelle: eigene Abbildung
46	68	Linearisierte Translationsfläche Quelle: eigene Abbildung
48	69	CeramicTranslation-Modul Quelle: eigene Abbildung
47	69	CeramicTranslation-Querschnitt Quelle: eigene Abbildung

Abb.	Seite	
49	70	Modulraster und Schnittwinkelermittlung Quelle: eigene Abbildung
50	71	Schnittwinkel der Module Quelle: eigene Abbildung
51	72	3D-Modell der Extrusions-Matrize Quelle: eigene Abbildung
52	72	CeramicTranslation Extrusions-Strang Quelle: eigene Abbildung
53	73	Schnittwinkel am Extrusions-Profil Quelle: eigene Abbildung
54	75	Planares Schneiden des Extrusionsstranges Quelle: eigene Abbildung
55	76	Schnittwinkel und Drahtführung bei laufender Extrusion Quelle: eigene Abbildung
56	77	Roboterarm beim Schneiden am laufenden Strang Quelle: eigene Abbildung
57	79	Unglasiertes, farbig glasiertes und weiß glasiertes Keramikmodul Quelle: eigene Abbildung
58	80	3D-Modell des Verbindungs-Profiles Quelle: Quelle: eigene Abbildung
59	81	Aus Stücken aufgebautes Profil Quelle: eigene Abbildung
60	81	Extrudiertes Profil Quelle: eigene Abbildung

Abb.	Seite	
61	81	4-fach schräg geschnittener Verbinder Quelle: eigene Abbildung
62	81	Planar geschnittener Verbinder Quelle: eigene Abbildung
63	82	Montage mit Unterbauschalung Quelle: eigene Abbildung
64	83	Montage mit weiterrückenden Schalungsrippe Quelle: eigene Abbildung
65	84	Drahtbewehrung für Vorversuche Quelle: eigene Abbildung
66	84	Verbindungsstelle mit Bewehrung Quelle: eigene Abbildung
67	85	Händisches Verteilen des Mörtels Quelle: eigene Abbildung
68	85	Ausgemörtelte Verbindungsstelle mit Bewehrung Quelle: eigene Abbildung
69	85	Belastungsversuch an der gemörtelten Fügung Quelle: eigene Abbildung
71	86	Verschiedene Spaltmaße bei Verbindern Quelle: eigene Abbildung
70	86	Lasercutten von Verbindern aus Acrylglas Quelle: eigene Abbildung
72	86	Verschiedene lasergecuttete Acryl-Verbinder Quelle: eigene Abbildung

Abb.	Seite	
74	87	Verklebter Acrylglas-Stapel Quelle: eigene Abbildung
75	87	Acrylglas-Verbinder in Keramik-Modul eingesetzt Quelle: eigene Abbildung
73	87	Verkleben eines Acrylglas-Stapels mit Dichlormethan Quelle: eigene Abbildung
76	88	Flexible, flache Mischspitze für Injektionsmörtel Quelle: eigene Abbildung
77	88	Einbringen von Injektionsmörtel Quelle: eigene Abbildung
78	90	Screenshot des Grasshopper-Scripts zur Erzeugung der Begrenzungsfl. Quelle: eigene Abbildung
79	91	Screenshot des Prototypen in der 3D-Software Rhinoceros Quelle: eigene Abbildung
80	92	Linearisierung der oberen und unteren Begrenzungsflächen des Prototypen Quelle: eigene Abbildung
81	93	Entwurf einer doppelt-symmetrischen Translationsschale Quelle: eigene Abbildung
82	94	Prototyp-Entwurf Grundriss M1:20 Quelle: Eigene Abbildung
83	94	Prototyp-Entwurf Ansicht M1:20 Quelle: Eigene Abbildung
84	95	Prototyp-Entwurf Diagonalansicht M1:20 Quelle: Eigene Abbildung

Abb.	Seite	
85	95	Prototyp-Entwurf Diagonalschnitt M1:20 Quelle: Eigene Abbildung
86	96	Viertelschale des Prototypen mit Kennzeichnungsraster Quelle: eigene Abbildung
87	96	Lasergeschnittene Matrizen-Teile Quelle: eigene Abbildung
88	96	Bearbeitete Einzelteile der Matrize Quelle: eigene Abbildung
89	97	10 kg-Tonhubbel Quelle: http://www.goerg-schneider.de/images/stories/goerg-schneider/massen/Hubel2015gr.jpg
90	98	Farben des Scherbens bei verschiedenen Brenntemperatur Quelle: Firma Georg & Schneider
91	99	Extrusionsfertige Tonmasse Quelle: eigene Abbildung
92	99	Extrusion eines CeramicTranslation-Profiles an der Strangpresse auf einen XPS-Stützkern Quelle: eigene Abbildung
93	99	Förderschnecken einer geöffneten Ton-Strangpresse Quelle: eigene Abbildung
94	101	Winkellehre für das händische Schneiden Quelle: eigene Abbildung
96	101	Händisches Schneiden mit der Tonsäge Quelle: eigene Abbildung
98	101	Lufttrocknen Quelle: eigene Abbildung

Abb.	Seite	
95	101	Schnitt am Extrusionsstrang Quelle: eigene Abbildung
97	101	Geschnittene Module Quelle: eigene Abbildung
99	101	Module auf Montage-Unterbau Quelle: eigene Abbildung
100	103	Elektrischer Brennofen Quelle: eigene Abbildung
101	103	Bourry-Diagramm Quelle: eigene Abbildung (nach „Tonkeramik und Porzellan“)
102	104	Nachbearbeiten/entgraten der gebrannten Module Quelle: eigene Abbildung
103	104	Montagefertige, gebrannte, nachbearbeitete und sortierte Module Quelle: eigene Abbildung
104	107	Verbinder-Anordnung zum Fräsen Quelle: eigene Abbildung
105	108	Software-Steuerung der CNC-Fräse Quelle: eigene Abbildung
107	108	Ende des Fräsvorganges Quelle: eigene Abbildung
109	108	Fertiger Verbinder Quelle: eigene Abbildung
106	108	Fräsvorgang Quelle: eigene Abbildung

Abb.	Seite	
108	108	Fertige PVC-Verbinder Quelle: eigene Abbildung
110	109	In Keramik eingesetzter PVC-Verbinder Quelle: eigene Abbildung
111	109	Einsetzen der Verbinder auf angeordnete Keramik-Module Quelle: eigene Abbildung
112	111	Plazieren der Module und Verbinder Quelle: eigene Abbildung
113	111	Zwei fertig verklebte Viertelschalen auf Positionierungshilfe Quelle: eigene Abbildung
114	112	Gebauter Prototyp und Charakteristika Quelle: eigene Abbildung
115	113	Gebauter Prototyp, ausgestellt im Designforum Steiermark Quelle: eigene Abbildung
116	115	Ausstellung des Prototypen im Rahmen des Design-Monat Graz 2015 Quelle: eigene Abbildung
117	116	Ausgestellter Prototyp mit Konzeptklärung Quelle: eigene Abbildung
118	118	Untersicht des Prototypen Quelle: eigene Abbildung
119	119	Gebauter Prototyp: Spannweite von etwa 1,5 m Quelle: eigene Abbildung
120	120	Ausstellung des Prototypen (HTL Ortwein, Graz) Quelle: eigene Abbildung

Abb.	Seite	
121	123	Statisch angepasstes und vergrößertes Modul Quelle: eigene Abbildung
122	124	Visualisierung: Statisch angepasstes und glasiertes 50 x 50 cm Modul Quelle: eigene Abbildung
123	128	Knotenelement: Aufbau der Verbindung der Keramikmodule Quelle: eigene Abbildung
124	129	Kräfte in der Schale: Drucklinie und Kräfte in der Fügung Quelle: eigene Abbildung
125	130	Verbinder zur senkrechten Lastableitung Quelle: eigene Abbildung
126	131	Knotenfassung für Eckmodul am Stützenkopf Quelle: eigene Abbildung
127	132	Einfacher Belastungstest am Modul Quelle: eigene Abbildung
128	133	Überspannende Konstruktion aus drei Modulen Quelle: eigene Abbildung
130	133	Skizze: Belastungstest an Brückenkonstruktion Quelle: eigene Abbildung
129	133	Einfacher Belastungstest an Brückenkonstruktion (Wassergewichte) Quelle: eigene Abbildung
131	134	Zerstörende Belastung an Brückenkonstruktion Quelle: eigene Abbildung
133	134	Einfacher Belastungstest Quelle: eigene Abbildung

Abb.	Seite	
132	134	Bruchstellen Quelle: eigene Abbildung
134	135	Bruchstellen am Verbinder Quelle: eigene Abbildung
135	135	Bruchstelle im Eck des Moduls Quelle: eigene Abbildung
136	136	Gerade geschnittene Module für Einfeldträger Quelle: eigene Abbildung
137	136	Halbierter Knoten für den Einfeldträger vor der Verklebung Quelle: eigene Abbildung
138	136	Knoten und Verklebung auf ganzer Höhe der Keramik Quelle: eigene Abbildung
139	137	Fertiger Einfeldträger aus fünf Modulen für den Biegeversuch Quelle: eigene Abbildung
140	138	Einfeldträger im 3-Punkt-Biegezugversuch #1 Quelle: eigene Abbildung
141	139	Belastungs/Biegediagramm des 5-Modul-Einfeldträgers #1 Quelle: eigene Abbildung
142	140	Geometrie und Kräfte im Einfeldträger als 1,5D-Modellsystem Quelle: eigene Abbildung
143	141	Effektiver Keramik-Querschnitt in der Trägermitte Quelle: eigene Abbildung
144	142	Belastungs/Biegediagramm des 3-Modul-Einfeldträgers Quelle: eigene Abbildung

Abb.	Seite	
145	142	Einfeldträger im 3-Punkt-Biegezugversuch #2 Quelle: eigene Abbildung
146	143	Geometrie und Kräfte im 3-Modul-Einfeldträger als 1,5D-Modellsystem Quelle: eigene Abbildung
147	145	Bruchbelasteter Einfeldträger im 3-Punkt-Biegezugversuch Quelle: eigene Abbildung
148	145	Bruchstelle #1: Bruchstellen an der Fügung 1 Quelle: eigene Abbildung
149	145	Bruchstelle #2: Bruchstellen an der Fügung 2 Quelle: eigene Abbildung
150	145	Bruchstelle #2: Schichtaufbau wirkt sich auf den Bruch aus Quelle: eigene Abbildung
151	145	Bruchstelle #2: Injektionmörtelkörper trägt zum Bruchverhalten bei Quelle: eigene Abbildung
152	152	Volumenmodell eines Moduls mit FE-Netz Quelle: eigene Abbildung
153	153	Vereinfachungen des Querschnitts zur Modellierung in RFEM Quelle: eigene Abbildung
154	154	Simulierter Biegezugversuch mit zwei Modulen Quelle: eigene Abbildung
155	154	Untersicht der Verbindung mit PVC-Knoten ohne Kontaktvolumen Quelle: eigene Abbildung
156	155	Untersicht der Verbindung mit PVC-Knoten mit Kontaktvolumen Quelle: eigene Abbildung

Abb.	Seite	
157	155	Untersicht der Verbindung mit PVC-Knoten ohne Kontaktvolumen und halbiertem Verbinder - Quelle: eigene Abbildung
158	156	Unverformter, halber Verbinder Quelle: eigene Abbildung
159	156	Verformter, halber Verbinder bei Biegebeanspruchung lt. FE-Simulation Quelle: eigene Abbildung
160	158	Rendering, Verbinder aus Hart-PVC Quelle: eigene Abbildung
161	158	Rendering, Verbinder aus PMMA Quelle: eigene Abbildung
162	159	Rendering, Verbinder aus Aluminium Quelle: eigene Abbildung
163	159	Rendering, Verbindungsstelle mit Betonmörtel vergossen mit Gewinde Quelle: eigene Abbildung
164	161	Detailliert modellierter 5-Modul-Einfeldträger mit mittiger Belastung Quelle: eigene Abbildung
165	161	Berechnete Verformung des Trägers Quelle: eigene Abbildung
166	162	Zugspannungen im belasteten Träger Quelle: eigene Abbildung
167	163	Zugspannung an der Unterseite des Trägers Quelle: eigene Abbildung
168	164	Statisches System des 5-Modul-Einfeldträgers - Verformung Quelle: eigene Abbildung

Abb.	Seite	
169	165	Statisches System des 5-Modul Einfeldträger - Verformung Quelle: eigene Abbildung
170	166	Statisches System - Spannungen im 5-Modul-Einfeldträger Quelle: eigene Abbildung
171	166	Statisches System - Spannungen im 3-Modul-Einfeldträger Quelle: eigene Abbildung
172	168	Spannungen im 5-Modul-Einfeldträger mit niedrigen Verbindern Quelle: eigene Abbildung
173	171	Zugbeanspruchungen im statischen Modell an der Fügung Quelle: eigene Abbildung
174	172	Statisches Modell der Prototyp Translationsschale mit unverschieblichen Lagern Quelle: eigene Abbildung
175	173	Zugspannungen unter Eigenlast Quelle: eigene Abbildung
176	173	Maximale Zugspannung in Fügung unter Eigenlast Quelle: eigene Abbildung
177	174	Statisches Modell des Prototypen mit verschieblichen Auflagern Quelle: eigene Abbildung
178	175	Verformung unter Eigenlast mit verschieblichen Auflagern Quelle: eigene Abbildung
179	175	Maximale Zugspannung in Fügung Quelle: eigene Abbildung
180	176	Statisches Modell der Prototyp-Translationsschale unter Flächenlast Quelle: eigene Abbildung

Abb.	Seite	
181	178	Statisches Modell des Prototypen unter Punktlast Quelle: eigene Abbildung
182	179	Maximale Zugspannung in Fügung bei Punktlast Quelle: eigene Abbildung
183	181	Vergleich der Beanspruchung bei Prototypmodul und angepasstem/skaliertem Modul Quelle: eigene Abbildung
184	183	Visualisierung des Forschungspavillon im Hof des Schloss Seggau Quelle: eigene Abbildung
185	185	Konstruktive bzw. statische Elemente des Pavillon Quelle: eigene Abbildung
186	187	Stütze und Fundament des Forschungspavillon Quelle: eigene Abbildung
187	188	Statisches Modell des Forschungspavillon Quelle: eigene Abbildung
188	190	Zugspannung in der Translationsschale des Pavillon Quelle: eigene Abbildung
189	191	Überzeichnete Verformung der Translationsschale des Pavillon Quelle: eigene Abbildung
190	192	Zugspannung in der Translationsschale (mit Glas-Eindeckung) Quelle: eigene Abbildung
191	193	Zugspannung in der Translationsschale bei Flächenlast (mit Glas-Eindeckung + Schneelast) Quelle: eigene Abbildung
192	194	Zugspannung in der Translationsschale unter Halblast und Eigengewicht Quelle: eigene Abbildung

Abb.	Seite	
193	195	Verformung der Translationsschale des Pavillons unter einer Halbflächenlast Quelle: eigene Abbildung
194	196	Zugspannung in der Translationsschale mit angelegter Seitenlast Quelle: eigene Abbildung
195	196	Verformung der Translationsschale bei einer seitlichen Last Quelle: Eigene Abbildung
196	197	Zugspannung in der Translationsschale bei einer mittigen Punkbelastung Quelle: Eigene Abbildung
197	203	Visualisierung des Forschungspavillons Schloss Seggau Quelle: eigene Abbildung