







Patrick Vinicki, BSc

## **Form folgt Schalung**

**Potenziale textiler Schalung zur Formung von Tonmaterial**

### **Diplomarbeit**

zur Erlangung des akademischen grades

Diplom-Ingenieur

Fachrichtung: Architektur

abgegeben an

**Technische Universität Graz**

Betreuerin

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Milena Stavić

Institut für Architektur und Medien

Graz, Mai 2021





## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum

---

Unterschrift



*“Das Aufkommen flexibler Schalung markiert einen radikalen Bruch in der konventionellen Architektur”*

*Mark West*



# **Potenziale textiler Schalung zur Formung von Tonmaterial**

## DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Frau Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Milena Stavrić, die meine Masterarbeit betreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

Ich bedanke mich beim Herrn Ingolf Christian für seinen Beitrag zum Verständnis von keramischen Material. Seine weite Einsicht in die Materie war vor allem am Anfang der Arbeit immens wichtig.

Ein besonderer Dank gilt meiner guten Freundin Vera, die mich beim Stricken unterstützt hat. Ihre Hilfe und Erfahrung beim Fertigen der Gewebeprouben und Ihr Know-How haben mir sehr geholfen.

Ebenfalls möchte ich mich bei Frau mag. ing. aedif. Elizabeta Samec bedanken, die mir mit viel Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite stand. Bedanken möchte ich mich für die zahlreichen interessanten Debatten und Ideen, die maßgeblich dazu beigetragen haben, dass diese Masterarbeit in dieser Form vorliegt.

Ein großes Dankeschön geht an meine Freundin Mariam für ihre Unterstützung, Kritik und große Motivation.

Ein weiteres Dankeschön geht an das IAM SHAPE LAB Team: Julian, Lukas und Hana. Am meisten werde ich unsere Mittagspausen und das generische Essen vermissen.

Außerdem möchte ich Stefan Janisch für das Korrekturlesen meiner Masterarbeit danken.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für mich hatten.

Patrick Vinicki  
Graz, 03.05.2021

## INHALT

---

Abstrakt	16	Kurzfassung	18	Einführung	20
Methoden	76	Prototyp	116	Fazit	126
				Anhang	132

## 01 EIN- LEITUNG

---

1.1	Kontext	1.1.1.	<i>SFB</i>	22
		1.1.2.	<i>Architekturgeometrien</i>	23
1.2	Ton	1.2.1.	<i>Geschichte</i>	28
		1.2.2.	<i>Eigenschaften</i>	30
		1.2.3.	<i>Schwinden</i>	32
		1.2.4.	<i>Keramische Bauteile</i>	32
		1.2.5.	<i>Trockenpressverfahren</i>	33
		1.2.6.	<i>Extrusion</i>	34
		1.2.7.	<i>Slumping</i>	34
		1.2.8.	<i>Schneiden</i>	35
		1.2.9.	<i>Feuchtpressen</i>	35
		1.2.10.	<i>Schlickerguss</i>	36
		1.2.11.	<i>Drehen auf Töpferscheibe</i>	38
		1.2.12.	<i>Brennen und Brennöfen</i>	39
		1.2.13.	<i>Glasuren</i>	40
		1.2.14.	<i>Verpackung und Distribution</i>	40
1.3	Keramik in der Architektur	1.3.1.	<i>Fliesensystem</i>	41
		1.3.2.	<i>Montierte Fliese</i>	42
		1.3.3.	<i>Sanitärkeramik</i>	42
		1.3.4.	<i>Verbundfassade</i>	44
		1.3.5.	<i>Hinterlüftete Fassade</i>	45
		1.3.6.	<i>Bedachung</i>	46



## 02 METHODEN

---

1.4	Wissensstand	1.4.1.	<i>Gefräste Schalung</i>	47
		1.4.2.	<i>Rekonfigurierbaren Schalung</i>	49
		1.4.3.	<i>Additive Fertigung</i>	49
		1.4.4.	<i>Verlorene Schalung</i>	52
		1.4.5.	<i>Flexible Schalung</i>	52
		1.4.6.	<i>Technisches Textil</i>	58
		1.4.7.	<i>Flächige und räumliche Formen</i>	58
		1.4.8.	<i>Technisches Textil in der Architektur</i>	60
		1.4.9.	<i>Stricken</i>	60
		1.4.10.	<i>Textil und Ton</i>	61
		1.4.11.	<i>Räumliche Anordnung</i>	64
		1.4.12.	<i>Individualisierung der Form</i>	68
		1.4.13.	<i>Systeme in Entwicklung</i>	70
		1.4.14.	<i>Technologien</i>	74
		2.1	<i>Einleitung</i>	77
2.2	Textil	2.2.1.	<i>Gestricktes Textil</i>	79
		2.2.2.	<i>Der Garn</i>	80
		2.2.3.	<i>Garne in Ton</i>	82
		2.2.4.	<i>Die Herstellung von gestrickten Proben</i>	83
		2.2.5.	<i>Strickbarkeit</i>	84
		2.2.6.	<i>Garnspannung</i>	85
		2.2.7.	<i>Strickmuster</i>	86
		2.2.8.	<i>Das Formen von gestricktem Textil</i>	88

2.3	Der Ton	2.3.1.	<i>Gießen</i>	98
		2.3.2.	<i>Streichen</i>	101
		2.3.3.	<i>Sprühen</i>	102
		2.3.4.	<i>Temperaturbeständigkeit</i>	108
		2.3.5.	<i>Brennvorgang</i>	109

## **03 PROTOTYP**



## **04 FAZIT**



## **05 ANHANG**



3.1.	<i>Designparameter</i>	117
3.2.	<i>Konstruktion</i>	121
4.1.	<i>Vorteile</i>	127
4.2.	<i>Nachteile</i>	129
4.3.	<i>Aussichten</i>	130
5.1.	<i>Referenzen</i>	133
5.2.	<i>Forschungsarbeiten</i>	134
5.3.	<i>Andere Quellen</i>	136
5.4.	<i>Audiovisuelle Quellen</i>	137
5.5.	<i>Abbildungsverzeichnis</i>	138



## ABSTRAKT

Das Thema dieser Masterarbeit ist die Untersuchung einer neuen Methode zur Verwendung eines gestrickten Fasergewebes als Schalung für dünne und hohle räumliche Tonstrukturen. Keramische Elemente werden derzeit in der Bauindustrie durch Extrudieren, Pressen oder Gießen hergestellt. Mit diesem neuen Ansatz kann man die Verwendbarkeit dünner Keramikelemente durch die Kombination von individualisierten Strickstrukturen verbessern.

Im Vergleich zum Textil, welches zum Formen von Beton als Ortschalung verwendet wird, bieten gestrickte Textilien die Möglichkeit auf doppelt gekrümmte und räumliche komplexe Formen angepasst zu werden ohne dass mehrere Teile miteinander vernäht oder verklebt werden müssen. Weiters lassen sich gestrickte Textilien durch Programmierung von industriellen Strickmaschinen vorfertigen. Die Formung des Gewebes in eine vordefinierte Form erfolgt durch aufhängen, aufblasen oder spannen ohne aufwändiges Gerüst bauen zu müssen.

Um keramische Bauelemente in einem selbsttragendem System zu verwenden, müssen in den meisten Fällen Unterkonstruktionen oder Stahlseilkonstruktionen als Unterstützung mit geplant werden, da Keramik an sich für die Aufnahme von Zugkräften ungeeignet ist. Die Verbindung zwischen gestricktem Textil und Ton ermöglicht ein komplementäres Bauelement welches Druck und Zugkräfte absorbieren kann. Die neugewonnene Entwurfsvfreiheit kann zu statisch und material- optimierten Bauelementen führen.

Eine flüssige Tonmischung wird mit einer Sprühpistole auf das Netz aufgesprüht, um die Wandstärken präzise und effizient aufzutragen bzw. variieren. Dazu wurde auch die Methode des Tauchens und Streichens getestet.

Nach dem Testen verschiedener Fasern wie Basalt, Kohlenstoff, Wolle und Edelstahl sind die Ergebnisse vielversprechend hinsichtlich der Möglichkeit, im Vergleich zu herkömmlichen Gießverfahren in kurzer Zeit komplexe Formen herzustellen.

Durch die Möglichkeiten eines maßgeschneiderten Textils ergibt sich eine größere geometrische Freiheit als im üblichen Gießverfahren. Die Option der schnellen digitalen Fabrikation und industriellen Herstellung führt zu einer ökonomischen und leichten Konstruktionsweise. Die ausprobierte Verfahrensweise erweitert die Nutzung von dünnen Keramikelementen im Kontext des selbsttragenden Systems und bietet einen neuen Ansatz im Gegensatz zu traditionellen Herstellungsmethoden. Es können damit Wände, Fassaden oder Überdachungen angedacht werden.

## KURZFASSUNG

In der Einleitung dieser Arbeit wird der Kontext, in den sich die Arbeit einfügt, das Material Ton und deren Anwendung in der Architektur und der Wissensstand erläutert. Im Wissenstand werden die unterschiedlichen Schalungssysteme, Textilien und neue Möglichkeiten in der Verwendung von Keramik aufgezeigt.

Der Abschnitt Methoden zeigt eine Reihe von Experimente, die durchgeführt wurden, um ein Verständnis für die gestrickte Flexible Schalung in Verbindung mit Ton zu geben. Dabei werden die Herstellung vom Textil, das Formen, die Tonmischung, die Tonfertigung und das Brennen mit verschiedenen Fasern untersucht.

Der Prototyp zeigt eine mögliche Applikation ,im architektonischem Kontext, dieses Bauprinzips auf. Dabei wird ein Modul im Maßstab 1:1 gebaut. Anschließend werden die Vorteile und Einschränkungen samt der weiterführenden Aussicht der Arbeit behandelt.



# *EINLEITUNG*

---



Dieses Kapitel erklärt die Motivation und den Bezugsrahmen auf dem diese Arbeit basiert. Die Abschnitte Kontext und Vision schildern die Problematik und die Richtung in die diese Arbeit geht. Darauf folgend wird im Abschnitt Wissensstand eine Übersicht über die Fertigungsmethoden von Keramikelementen, technische Textilien und deren Anwendung und heutzutage verwendeter Schalungen gegeben.

## 1.1 KONTEXT

Die Masterarbeit "Form folgt Schalung – Potenziale textiler Schalung zur Formung von Tonmaterial" wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereich(SFB) Projekts , Teilprojekt SP9: „Material- und strukturell informierte Freiformstrukturen“, als Teil der Forschungsgrundlage für das Projekt durchgeführt. Der SFB wird vom österreichischen Wissenschaftsfond FWF, Projekt Nr. F77 gefördert.

*„Designer und Architekten sind von Freiformflächen sehr angetan, da ihre digitale Generierung sehr einfach zu sein scheint. Allerdings bleibt das Entwerfen von Freiformen eine immense Herausforderung. Viele Aspekte der komplexen Zusammenhänge zwischen Geometrie, Konstruktion, Materialität und Struktur Eigenschaften wurden in der aktuellen geometrischen Forschung nicht richtig berücksichtigt. Insbesondere ist mehr Forschung erforderlich, um die Materialspezifischen Einschränkungen, im Zusammenhang mit Freiformgeometrien, zu untersuchen. Weiters ist die Suche nach potenzieller Schalung, Herstellung dieser Schalung, der Logistik bis zur Montage wichtig.*

*Die Komplexität der Gestaltung einer geeigneten Oberfläche und / oder Schalung für Freiformformen ist in allen Maßstäben vorhanden, angefangen bei Möbeln bis hin zu Objekten im Gebäudemaßstab. Die Schalung für ein allgemeines Freiformobjekt besteht aus diskretisierten Sonderformen, die oft sehr teuer gefräst werden und nur für eine bestimmte Form verwendet. Darüber hinaus erfordert jedes unterschiedliche Baumaterial wie Beton, Glas, Keramik, Kohlenstoff oder Holz eine bestimmte Herstellungsstrategie, einschließlich eines maßgeschneiderten geometrischen Ansatzes.*

Die wichtigsten wissenschaftlichen Beiträge in diesem Projekt werden sein: (1) Die Entwicklung neuer geometrischer Definitionen von Freiformflächen basierend auf ihrem Material und funktionale Eigenschaften, um Strategien zu entwickeln, um kosteneffiziente Freiformstrukturen mit an Ort und Stelle bleibender und / oder wiederverwendbarer Schalung zu finden; (2) die Anreicherung von rechnergestützten geometrischen Modellen mit Material- und Strukturinformationen. Die Methodik wird Forschung durch Designstudien und Experimente. Basierend auf einer eingehenden Untersuchung der Grundlagen der Oberflächengeometrie werden wir mit dem Ziel eine Reihe neuartiger Modelle in verschiedenen Maßstäben erstellen die verschiedenen Eigenschaften basierend auf dem jeweiligen Material zu erarbeiten. Wir werden formbare, lineare und planare Materialien verwenden. Dies wird in vier Phasen durchgeführt Phasen:

- (1) Experimentieren,
- (2) Testen und Messen,
- (3) Berechnen und Parametrisieren und
- (4) Nachbearbeitung und Optimierung.“<sup>1</sup>

### **1.1.1 SFB**

Im Rahmen des SFB befasst die Arbeit „Form folgt Schalung“ mit Zusammenhängen zwischen Geometrie, Konstruktion und Materialität. Insbesondere werde die Einschränkungen und Potenziale von Ton in Verbindung mit effizienter Schalung erforscht. Wichtig ist es zu berücksichtigen welche geometrische Ansätze das Material Ton benötigt um optimal frei formbar zu sein. Es wird die Methodik Forschung durch Designstudien und Experimente angewendet. Aufbauend auf einer Untersuchung der Grundlagen von Gewebe, Unterkonstruktion und Stückherstellung werden fragen zur Geometrie, Konstruktion und Materialität beantwortet. Die Arbeit bewegt sich in der ersten Phase, von den vier genannten, des Experimentieren und schneidet das Parametrisieren kurz an. Darauf aufbauend werden weiter Tests, Messungen, erste Berechnungen und Optimierungen ausgeführt.

---

1 <https://iam.tugraz.at/shapelab/>

## 1.1.2 Architekturgeometrien

Strukturen mit doppelt gekrümmten Flächen werden immer mehr nachgefragt und entworfen. Solche Gebäude können das Ergebnis architektonischen Ausdrucks sein, welcher von digitalem Fortschritt geprägt ist und sich in Richtung individualisierte Massenfertigung orientiert.

Gebäude wie das Heydar Aliyev Center von Zaha Hadid (Abb.1), die Arnhem Central Station von UN Studio, die EPFL Rolex Learning Center von SANAA oder das Taichung Opera House von Toyo Ito (Abb.2) zeigen wie Computerdesign in Kombination mit Herstellungstechniken den Bau komplexer Formen in großem Maßstab ermöglicht. Wie so oft benötigen sie intensive strukturelle Lösungen, die kostspielig sind.

Während Freiformgeometrien durch individuelle schöpferische Tätigkeit entstehen und ihre besondere Ästhetik haben, wirken formgefundene Geometrien ebenso ausdrucksstark. Formgefundene Geometrien entstehen meist dadurch, dass innere Kräfte oder Spannungen bekannt sind und eine dazu passende Form gesucht wird<sup>2</sup>. Solche Geometrien können experimentell in Modellen gefunden werden. (Beispiele Formung mittels Hängen, Kettenlinie, Seifenhautmodell) Ein wichtiger Vorreiter dieser Methodik ist Frei Otto, der viel mit Modellen gearbeitet hat. Dieser Entwurfsansatz resultiert aus struktureller Optimierung, die im Allgemeinen auf Leichtbau abzielen.

Die Bauten von Heinz Isler (Abb.3), Felix Candela (Abb.4) oder Eduardo Torroja (Abb.5) konnten mühelos großer Spannweiten, mit wenig Materialeinsatz überbrücken, da sie sich diesen Prinzipien bedienen.

Weiters zeigen Arbeiten von Pier Luigi Nervi, dass man die Methode der Formfindung mit Aussteifungen verbinden kann um ebenso große Spannweiten mit eigener Ästhetik zu bauen (Abb.6). Somit bieten doppelt gekrümmte und ausgesteifte Oberflächen die Möglichkeit, die Tragfähigkeit zu erhöhen und den Materialeinsatz zu verringern.

---

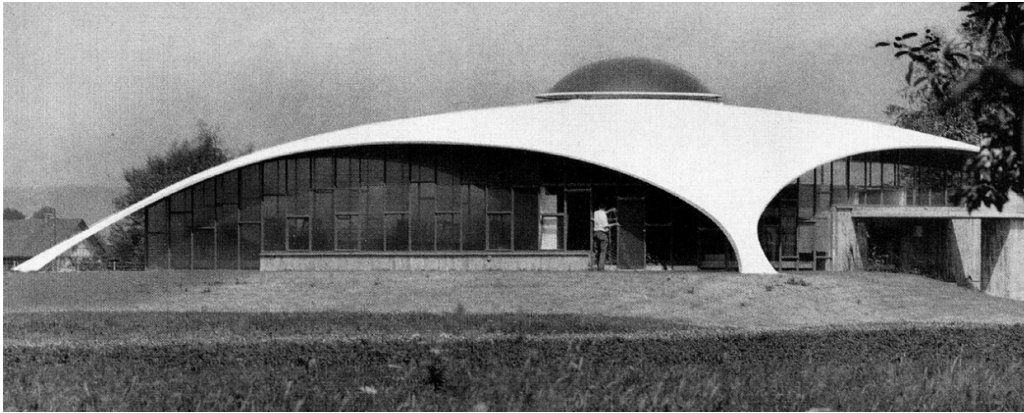
2 <https://www.sfb1244.uni-stuttgart.de/projekte/a-entwurfs-und-planungsmethodik/a04-optimierung#id-c6a36fab-2>



**Abb.1:** Heydar Aliyev Center, Baku, Zaha Hadid Architects 2012



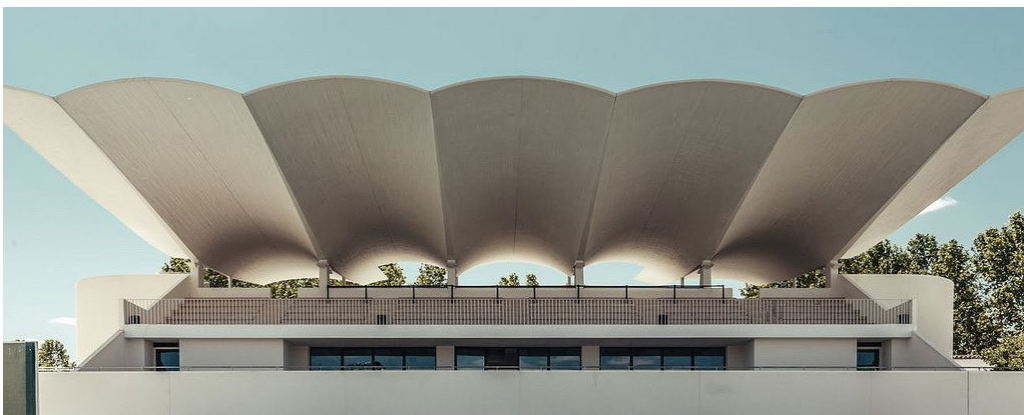
**Abb.2:** Taichung Opernhaus, Taichung, Toyo Ito and Associates 2016



**Abb.3:** Kilcherschale, Rechterswil, Heinz Isler 1965

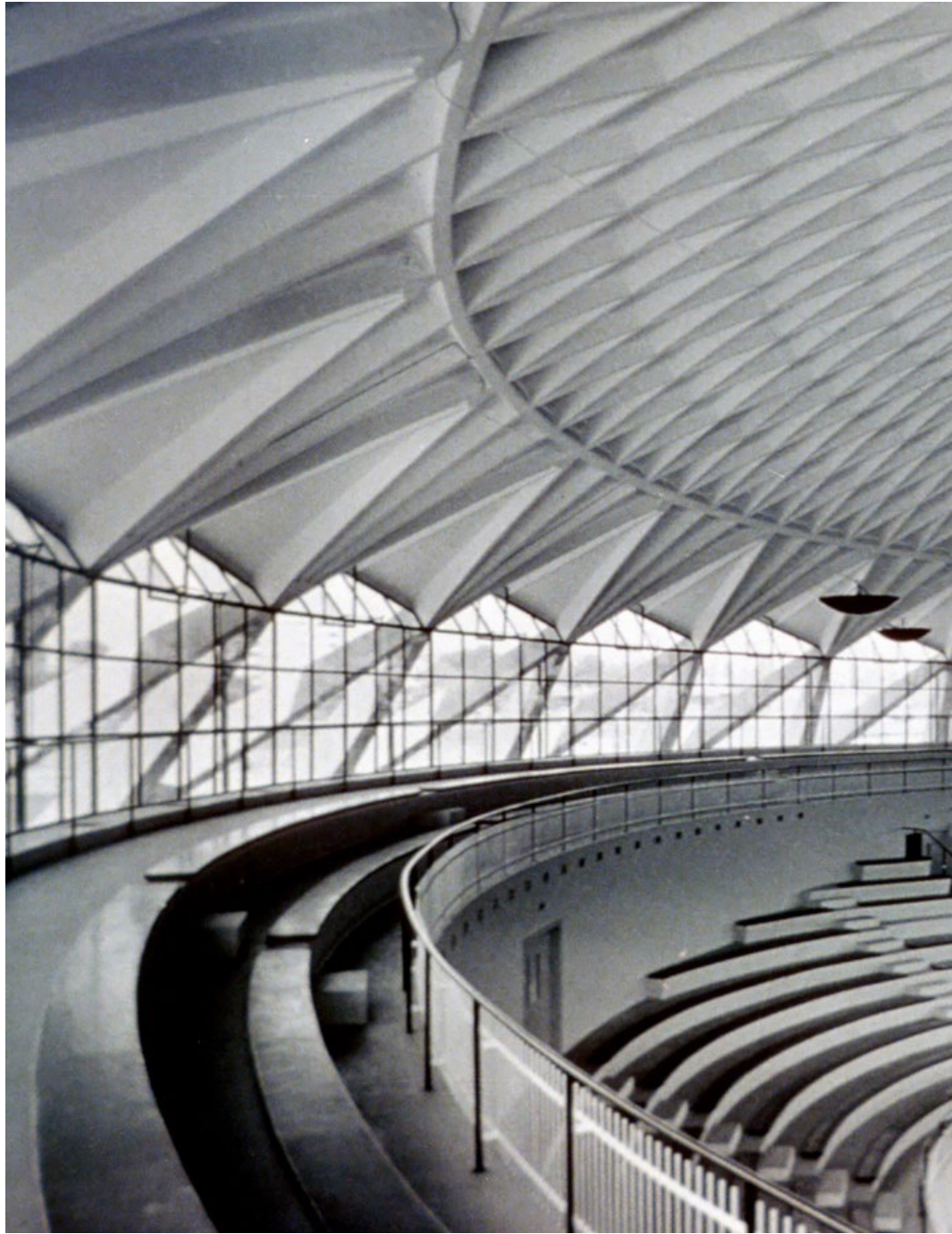


**Abb.4:** Los Manantiales Restaurant, Xochimilco, Felix Candela, 1958

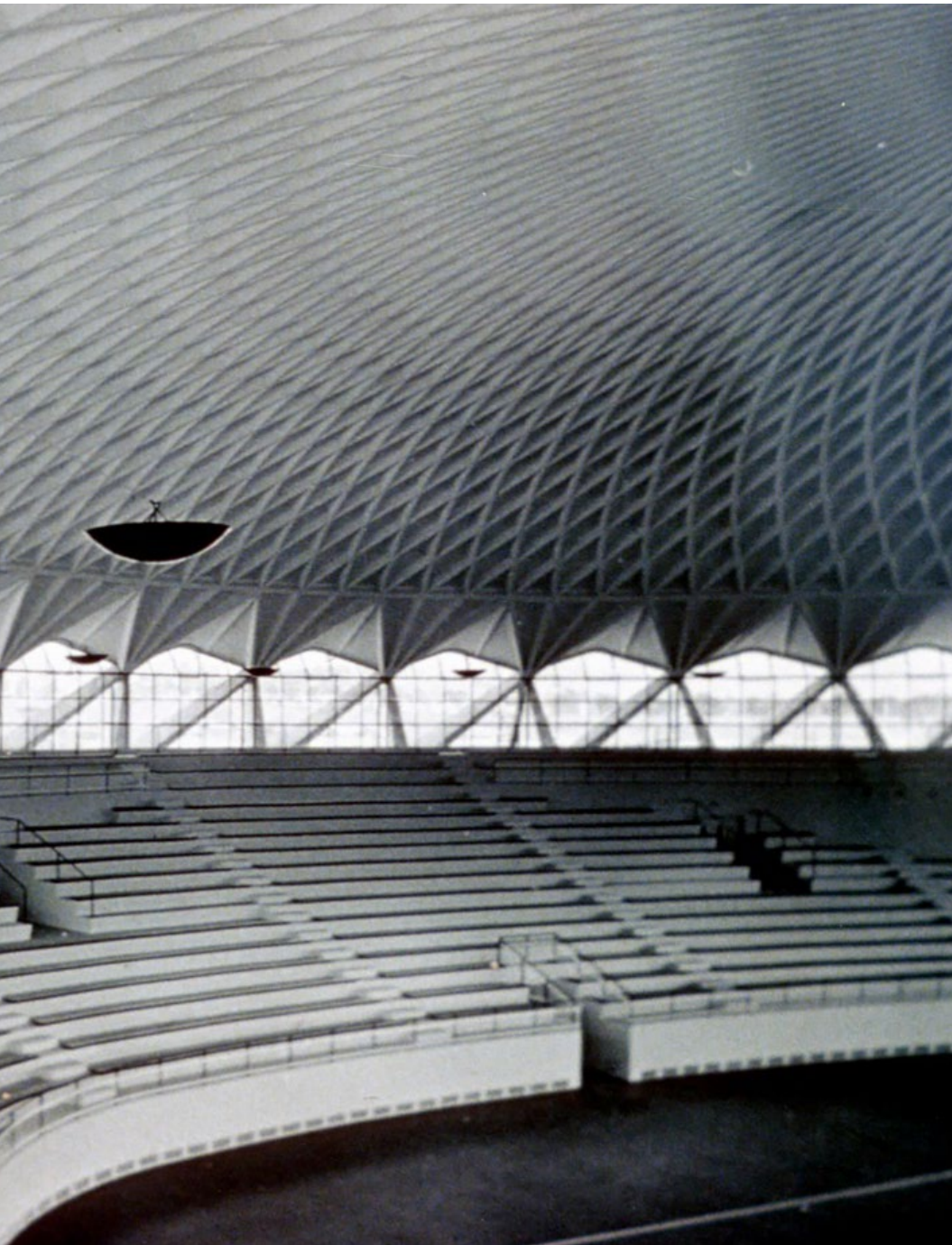


**Abb.5:** La Zarzuela Rennstrecke, Madrid, Eduardo Torroja 1930





**Abb.6:** Palazzetto dello Sport, Rome, Pier Luigi Nervi, 1957



## 1.2 TON

Das Brennen von Ton und seine Umwandlung in ein beständiges Material reicht über Tausende Jahre zurück und ist fester Bestandteil der menschlichen Geschichte. Aus diesem Werkstoff wurden Öfen, Instrumente, Fliesen und vieles mehr hergestellt. Der Name Keramik stammt vom griechischen Wort „keramos“, welches Erzeugnisse von Töpfern bezeichnet<sup>3</sup>. Die bisher älteste aufgefundene Tonfigur stammt aus einer Steinzeitsiedlung und wird auf ca. 25.000 – 29.000 Jahre geschätzt (Abb.7).

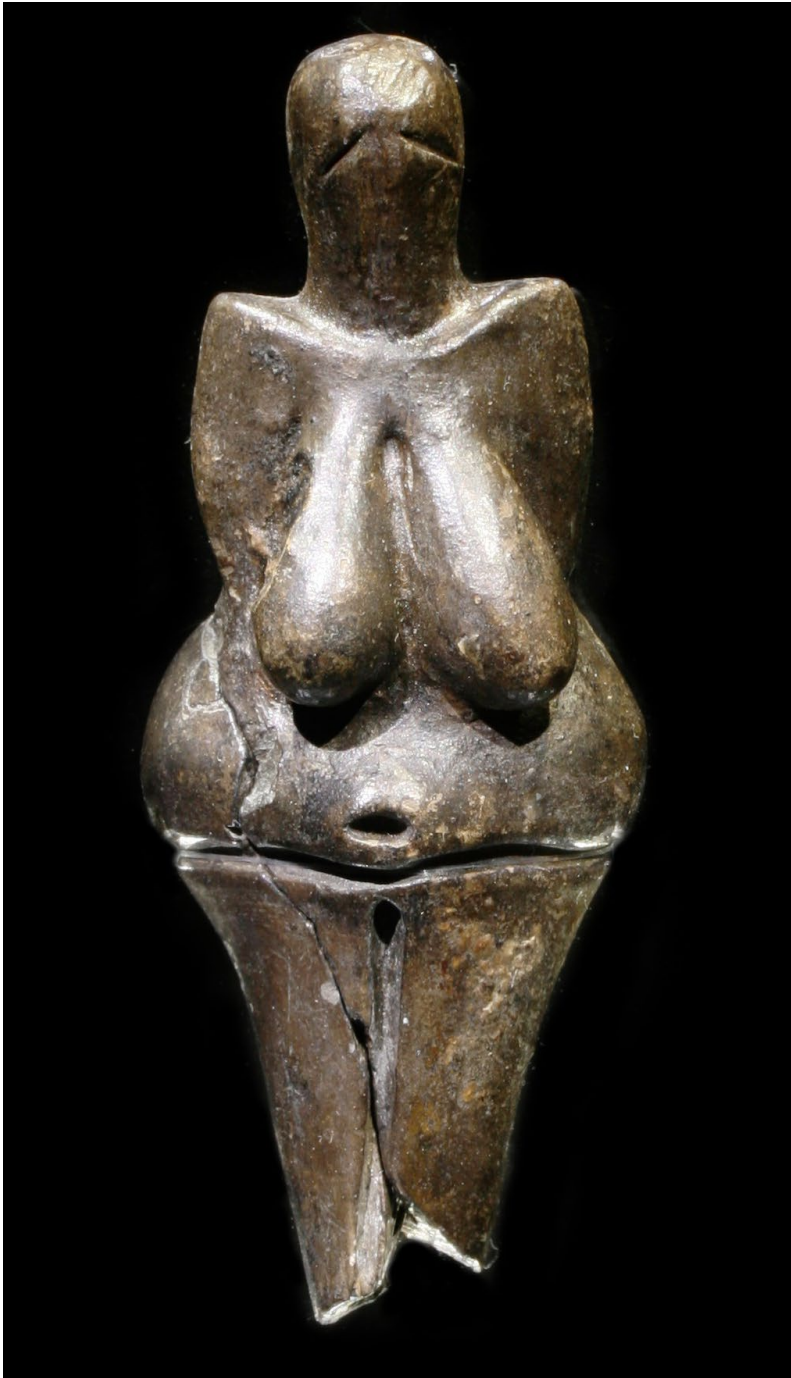
### 1.2.1 Geschichte

Anders als Materialien die unbehandelt aus der Natur entnommen werden, wie zum Beispiel Stein oder Holz, wird Keramik als erster vom Menschen erdacht und hergestellter Stoff betrachtet. Dieses Material erwies sich als sehr wetterbeständig und fest, ließ sich aber im weichen Zustand leicht verformen, was zufolge hat, dass diese leichte Formbarkeit bis heute eines der größten Vorteile von keramischen Materialien darstellt. Die ersten Versuche zur Formung der feuchten Masse wurden zuerst ergänzt und später ganz durch die Töpferscheibe ersetzt. Diese kann jedoch nur axialsymmetrische Elemente anfertigen.

Das Verlangen nach dekorativer Gestaltung und Ausweitung des Designs ist so alt wie die Herstellung der Keramik selbst. Die ersten Ergebnisse kamen wahrscheinlich per Zufall zustande. Aufgrund des ersten Ascheanfluges während des Brennvorganges entstanden dunkle Verfärbungen aufgrund des Brennvorganges in einer oxidierenden Atmosphäre. Es wurde nicht nur die Masse selbst bearbeitet sondern auch mit bestimmten Erzeugnissen überzogen. Diese dünne Beschichtungen auf Glasbasis nennt man Glasuren. Logischerweise entstanden die ersten Keramikhersteller in unmittelbarer Nähe zu leicht abbaubaren Tonvorkommen. In den Anfängen wurde immer über offenem Feuer gebrannt. Weswegen oft unsaubere Oberflächen entstanden.

3 Vgl. Oldfather 1920, 537-542





**Abb.7:** Venus von Dolni Vestonice, Mähren, 1925

Aufgrund des Wittereinflusses beim Brennen über offenem Feuer erhöht sich die Schwankung der Brenntemperatur was zu hoher Ausschusquote führte. Erst mit der Entwicklung geschlossener Öfen ließ sich die effizienz steigern<sup>4</sup>.

### 1.2.2 Eigenschaften

Wegen Ihrer Attribute sind keramische Materialien für eine Vielzahl von architektonischen Anwendungen geeignet. Die Härte, Dichte und Dauerhaftigkeit sowie die Möglichkeit eines variantenreichen Erscheinungsbildes haben Keramik zu einem beliebten Material gemacht. Keramische Elemente die auf Ton basieren verfügen je nach Region über jeweils einzigartige Eigenschaften (Abb.8).



**Abb.8:** Rohmaterial Ton

4

Vgl. Bechthold / Kane / King, 2015, 13-16

Der Begriff Ton beschreibt eine Gruppe von natürlichen Stoffen die sich in einem Brennvorgang zu Keramik umwandeln lassen. Ton ist weltweit in großen Mengen verfügbar und besteht vor allem aus Tonmineralen wie zum Beispiel Kaolinit, sowie aus Gesteinsanden wie Quarz und Feldspat. Verschmutzungen führen zu regionspezifischen Tonattributen.

Tonmassen sind Zusammensetzungen unterschiedlicher Tone und Zusatzmittel, die auf spezifische Projekterfordernisse zugeschnitten werden. In Verbindung mit der Temperaturregelung während des Brennvorganges erlaubt dies ein hohes Maß an Individualisierung mit eindeutigen Unterschieden in Festigkeit, thermischen Eigenschaften, Porosität und Dichte. Das Zusammensetzen von projektspezifischen Tonmassen ist ein eigenständiges Spezialgebiet, welches Chemie und Verfahrenstechnik vereint<sup>5</sup>.

Häufige Zusammensetzungen sind das gefügedichte Porzellan und Steinzeug und das porenhaltige Steingut und Terracotta. Heutzutage kann die Keramikindustrie aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Zusatzmitteln auswählen. Durch den Zuschlag von Zusatzmitteln lässt sich die Tonmasse zusätzlich optimieren. So bewirkt zum Beispiel die Zugabe von Nylonfasern eine Verbesserung der Frühfestigkeit des getrockneten Tons vor dem Brennen und vereinfacht somit die Handhabung noch ungebrannter Elemente. Fasern dieser Art wirken sich nur geringfügig auf die Eigenschaften des Endproduktes aus, da sie während des Brennens vollkommen verbrennen. Kyanit wiederum verbessert die Eigenschaften des Fertigerzeugnisses. Es wirkt sich auf die Reduktion der Wärmespannung und die mechanische Festigkeit aus. Bewehrungen aus Basaltfasern oder Stahlfasern befinden sich in der Erforschung und haben somit die Marktreife noch nicht erreicht<sup>6</sup>.

---

5 Vgl. Timellini, 2014, Architectural Ceramic

6 Vgl. Bechthold / Kane / King 2015, 20

### 1.2.3 Schwinden

Nach der Modellierung der Tonmasse geht diese zunächst in den lederharten und dann in den lufttrockenen Zustand. Während des Trocknens, aber auch während des Brennens, kommt es zum Schwinden der Masse aufgrund des Entzuges von Feuchtigkeit. Für die Herstellung von maßgerechten Elementen ist das Verständnis des Schwindens von großer Bedeutung. Im Grunde gilt : je kleiner die Korngröße in der Tonmasse und je höher der Feuchtegehalt, desto größer das Schwindmaß. Je nach Tonmasse variiert der Schwindmaß zwischen 8 und 12%. Es lassen sich zwei Phasen des Schwindens unterscheiden. Die erste Phase tritt sie während des Trocknens auf, wo die Feuchtigkeit von der Mitte des Materials nach außen Verdunstet. Der zweite Schwund erfolgt beim Brennen, wenn die verbleibende Feuchtigkeit vollständig freigesetzt wird. Oft können Abweichungen der Elemente nach dem Brennvorgang durch Schleifen oder Schneiden korrigiert werden, was jedoch zu einem Kostenaufwand führt<sup>7</sup>.

### 1.2.4 Keramische Bauteile

Keramikerzeugnisse sind in der Regel spröde, weisen aber eine hohe Druckfestigkeit auf. Zeigen jedoch bei Zugbeanspruchungen ein unzureichendes Verhalten auf. Die Biegefestigkeit reicht von etwa 7-30MPa bei übliche Fliesen bis hin zu 120MPa bei hochwertigen Porzellan Produkten. Weiters verfügen Tonmassen die über 1200°C über eine dementsprechend höhere Festigkeit als eine Tonmasse, die unter 1200°C gebrannt wurde. Bereiche mit hohen Spannungskonzentrationen sollten vermieden werden.

Überlastungen treten gerne bei Sprüngen in Wandstärken, scharfen Kanten oder punktförmigen Befestigungen auf. Die Vetrifizierung spielt ebenfalls eine große Rolle für die Eigenschaft des Endproduktes. Ein vetrifiziertes Objekt ist beständig gegenüber dem Eindringen von Wasser. Dies wird meist mit speziellen Glasuren erreicht. Einerseits kann ein unvetrifiziertes

7 <https://www.chemie.de/lexikon/Keramik.html>

Produkt, aufgrund seiner Fähigkeit zur Wasseraufnahme und Abgabe, als Element für Verdunstungskühlung genutzt werden. Andererseits muss darauf geachtet werden, dass ein unvetrifiziertes Element nicht hohen Temperaturschwankungen ausgesetzt ist, da es beim Einfrieren zum Abplatzen der Oberfläche kommen kann<sup>8</sup>.

Die Produktion von Keramik erfordert eine geplante Abfolge von Schritten, beginnend mit der Rohstoffgewinnung und Aufbereitung, gefolgt von der Formgebung, der Trocknung, der Glasierung, des Brennvorganges und dem Verpacken. Durch die steigende Automatisierung in der Fertigung werden immer mehr Schritte miteinander verbunden.

Große Keramikhersteller betreiben meist automatisierte Produktionsanlagen mit hohem Produktionsausstoß. Kleinere Handwerksbetriebe zeichnen sich eher durch manuelle Arbeitsschritte und die Produktion kleinerer Serien mit größeren Toleranzen aus.

### 1.2.5 Trockenpressverfahren

Einfache Keramikfliesen werden meist in einem Trockenpressverfahren hergestellt. Dieser Vorgang ist mittlerweile automatisiert. Dabei wird die Tonmasse in Pulverform mit einem Feuchtegehalt von ca. 3-7% und hohem und gleichmäßigem Druck in einer Stahlform gepresst (Abb.9).

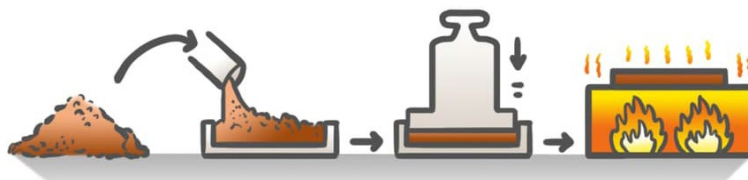


Abb.9: Trockenpressverfahren

8 Vgl. Rhodes, 1957, 48

### 1.2.6 Extrusion

Das Extrudieren oder Strangpressen ist ein Prozess, bei dem feuchte Tonmasse mit einem Wassergehalt von ca 12-14% geformt wird. Bei diesem Vorgang wird die Tonmasse auf einem Förderband durch eine Matrize bewegt, dabei entstehen stabförmige Elemente mit durchgehend identischem Querschnitt (Abb.10).

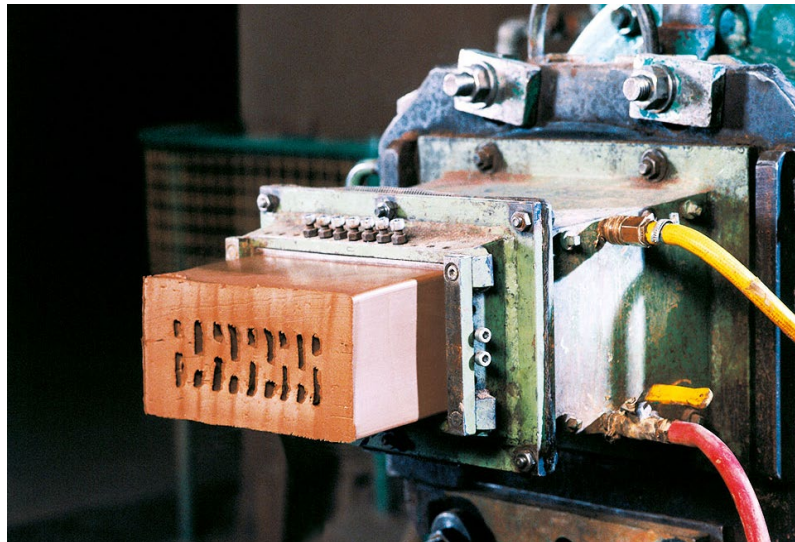


Abb.10: Ziegelproduktion im Strangpressverfahren

### 1.2.7 Slumping

Das Slumpen, die Biegung weicher Tonmasse über eine Form, wird meist zur Herstellung kleiner Stückzahlen verwendet. Bei größeren Stückzahlen wird die Tonmasse erst extrudiert, zugeschnitten und dann über eine Form gelegt. Dieser Prozess dient der Herstellung von gebogenen Elementen. Als Unterkonstruktion wird meist Gips, Holz oder EPS verwendet.

## 1.2.8 Schneiden

Im Schneidprozess wird eine geformte Tonplatte, mittels Schneidwerkzeug aus Stahl oder Draht, in ihre Form geschnitten. Gleich wie beim Extrudieren wird auf die Oberfläche des Tons vor dem Schneiden Öl angebracht um ein Anhaften zu vermeiden (Abb.11).



Abb.11: Fliesenherstellung im Schneideverfahren

## 1.2.9 Feuchtpressen

Ähnlich wie beim Trockenpressverfahren wird die Tonmasse, mit einem Feuchtegehalt von 14-22%, durch eine Form zurecht gepresst. Aufgrund des gering benötigten Druckes ermöglicht diese Methode den Einsatz von kostenkünstigen Presswerkzeug. Bei diesem Verfahren können stark profilierte Elemente hergestellt werden (Abb.12).

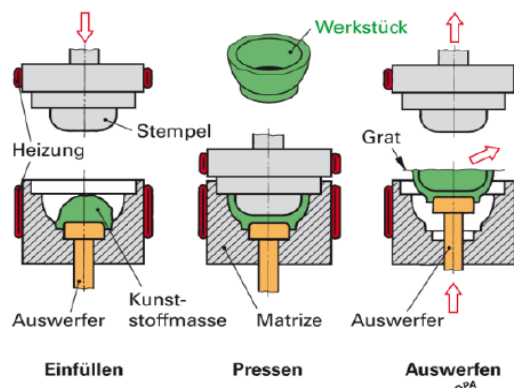


Abb.12: Feuchtpressverfahren



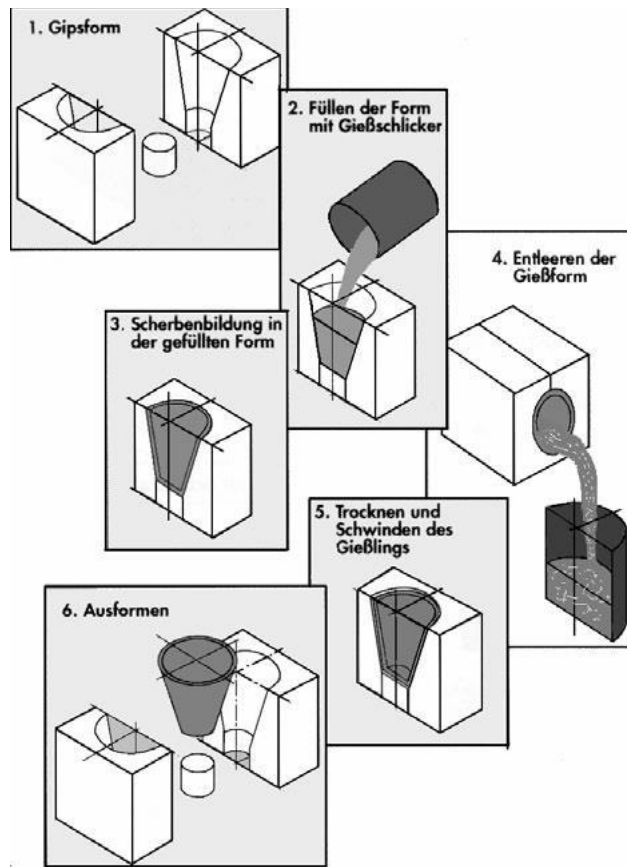
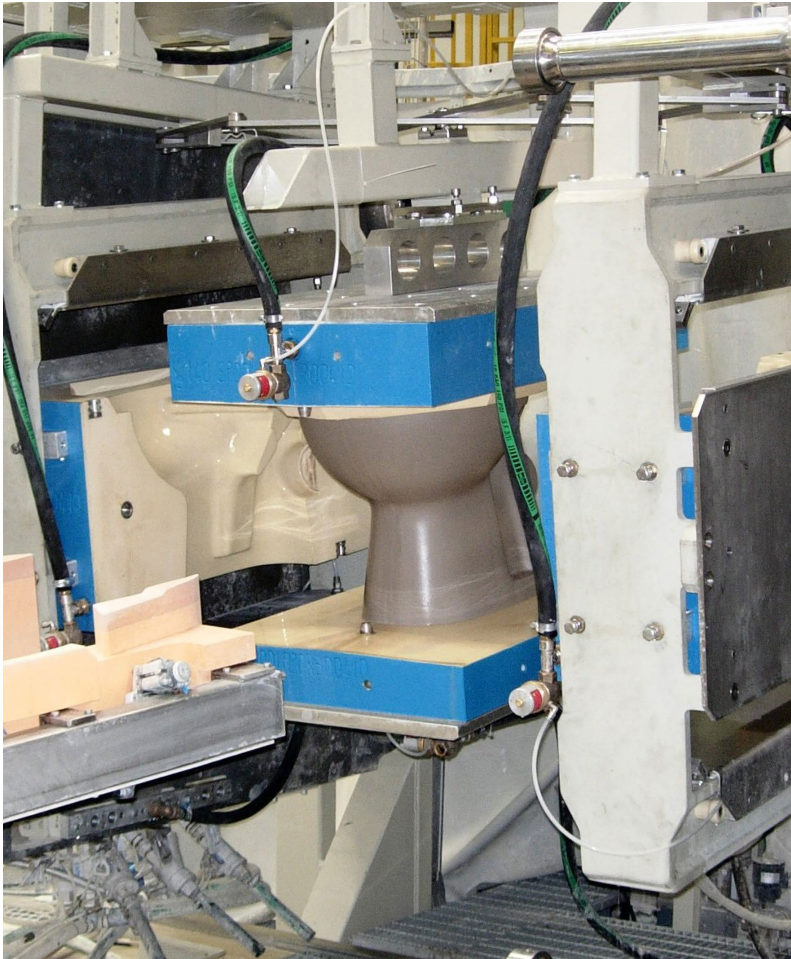


Abb.13: Schlickergussverfahren

### 1.2.10 Schlickerguss

Beim Schlickerguss wird eine flüssige Tonmasse verwendet. Grundsätzlich wird zwischen zwei Arten des Schlickergusses unterschieden. Einerseits, das Schlickergießen mit vollständiger Aushärtung in der Form, was zu einem Festkörper führt. Andererseits, das Schlickergießen bei welchem nur die Forminnenfläche antrocknet und die restliche Flüssigkeit wird wieder abgegossen, was zu einem Hohlkörper führt. Dabei bestimmt die Trocknungsdauer die Wandstärke. Meist wird diese Methode für die Herstellung von Sanitärkeramik verwendet. Beide Varianten eignen sich für komplexe Formen (Abb.13)





**Abb.14:** Sanitärkeramik



**Abb.15:** Töpferscheibe

### **1.2.11 Drehen auf Töpferscheibe**

Hierbei werden rotationssymmetrische Formen, wie zum Beispiel Vasen, hergestellt. Diese Methode ist nicht hoch automatisiert und erfordert dementsprechend Geschicklichkeit und Erfahrung vom Töpfer selbst. In der Regel werden symmetrische Formen produziert, jedoch können auch bewusst asymmetrischen Formen geschaffen werden (Abb.15).

## 1.2.12 Brennen und Brennöfen

Um Keramik wetterfest und druckfest zu bekommen muss diese im Brennvorgang erhärtet werden. Dies geschieht in einem dafür vorgesehenem Brennofen. Kleine, statische Produktionsöfen fassen zwischen 17-600 l (Elektroofen) oder bis zu 6000 l (gasbetrieben). Die Innenwand eines Ofens besteht aus feuerfestem Stein, der sogenannten Schamotte. Es existieren auch große Öfen, die mittels Holz angeheizt werden. Mit diesen wird dann ein ganzer Jahresvorrat gebrannt. Rollen und Tunnelöfen werden häufig auf große Stückzahlen ausgelegt<sup>9</sup>. (Abb.16).



**Abb.16:** Beispiel eines kleinen Elektroofens

### **1.2.13 Glasuren**

Glasuren sind dünne, Glasüberzüge, die zwei wesentliche Forderungen erfüllen. Zum einen machen sie den porösen Tonkörper nahezu wasserdicht und geben ihm eine leicht zu reinigende Oberfläche. Zum anderen ermöglichen sie eine abwechslungsreiche, dekorative Gestaltung der Keramiken. Glasuren können farbig, transparent oder deckend (opak), glänzend, halbmatt oder matt sein. Sie können weich und niedrig schmelzend (max. 1.000 °C) oder hart und hoch schmelzend (Über 1.200 °C) sein. Nach ihrer chemischen Zusammensetzung kann man z.B. zwischen Borosilikat-, Feldspat-, Salz- und bleihaltigen Glasuren unterscheiden. Die Glasuren werden häufig (z.B. Tonwaren) erst nach dem Schrühbrand der Ware aufgebracht (Tauchen, Spritzen, Pinseln, Stempeln) und in einem erneuten Brennprozess (Glattbrand), der aber unterhalb der Brenntemperatur des Rohlings liegen muss, verglast<sup>10</sup>.

### **1.2.14 Verpackung und Distribution**

Bei vielen Massenherstellern ist die Verpackung automatisiert. Jedoch gilt : je geringer die Stückzahl gleicher Elemente, desto größer ist der manuelle Anteil der Arbeit beim Verpacken. Weswegen in Betrieben die individualisierte Elemente oder in Handarbeit herstellen, die Verpackung manuell erfolgt.

---

10 Vgl. <https://www.chemie.de/lexikon/Keramik.html>

## 1.3 KERAMIK IN DER ARCHITEKTUR

### 1.3.1 Fliesensystem

Die Fliese ist eines der bekanntesten Anwendungsbeispiele von Keramik. Sie verleiht Wänden oder Böden eine beständige Oberfläche. Eine breite Auswahl an Farben und Oberflächenbeschaffenheiten machen die Fliese sehr populär. Sie wird meist im Trockenpress oder Extrusionverfahren hergestellt. Vorort werden sie verklebt und die Fugen mit Mörtel ausgefüllt. Kleiner Fliesen werden üblicherweise im Werk auf ein Gitter angeklebt um die Montage zu erleichtern. Weiters können auch sehr große Fliesen, die bis zu 1,5m x 3m abmessen, hergestellt werden. Diese werden jedoch mit Glasfasern verstärkt, sei es auf der Rückseite oder zwischen zwei Keramikschichten (Abb.17) (Abb.18).



**Abb.17:** Mosaikfliese im Bad



**Abb.18:** Große Fliesen





**Abb.19:** Beispiel für einen Hohlboden

### **1.3.2 Montierte Fliese**

Diese Methode wird gerne in Räumen die häufig umgestaltet werden angewandt. Hierzu werden dicke Fliesen auf eine Unterkonstruktion aufgelegt oder auf eine Unterlage aufgeklebt, die auf höhenverstellbaren Füßen steht. Im Gegensatz zum klassischen Verlegen bietet diese Methode weitaus kürzere Verlegezeiten und der Boden ist sofort begehbar (Abb.19).

### **1.3.3 Sanitärkeramik**

Porzellan wird meist zur Herstellung von Sanitäreinrichtungen verwendet. Die dafür benutzten Tonmassen müssen eine hohe Festigkeit sorgen. Zusätzliche Glasuren sorgen für die notwendige kratzfestigkeit und wasserbeständigkeit. Sanitärerzeugnisse werden in Massenproduktion hergestellt und in der Regel wird das Schlickergussverfahren angewendet<sup>11</sup> (Abb.20)(Abb.21).

11 Vgl. Garrison, 2002, 123



**Abb.20:** Sanitärkeramik



**Abb.21:** Waschbecken von Laufen

### 1.3.4 Verbundfassade

Mit dieser Art von Keramikfassade lassen sich verschiedene Qualitäten haptischer und ästhetischer Art erzielen. Es wird in den meisten Fällen zwischen aufgeklebten und fixierten Keramikfassaden unterschieden. Eine der ältesten Einsatzmethoden von Keramikfassaden ist die Fliese ohne tragende Funktion, die auf eine Unterkonstruktion angebracht wird. Fassaden mit angebrachten Fliesen bestehen in der Regel aus einschichtigen Elementen, extrudierten Hohlkörpern und anderen Elementen (Abb.22).

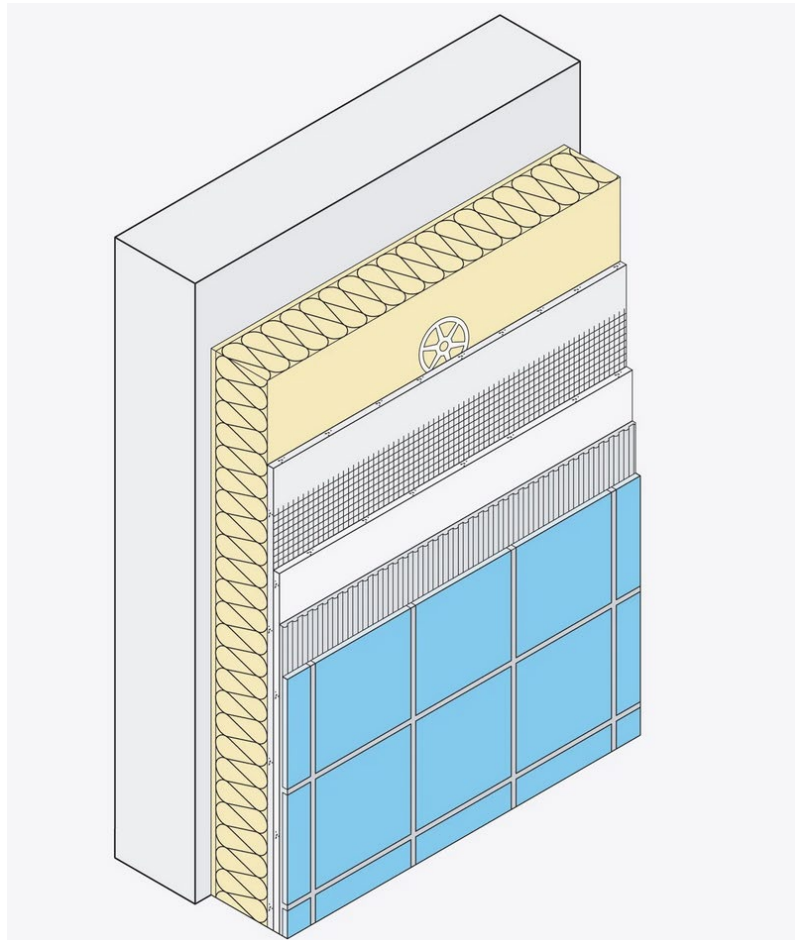
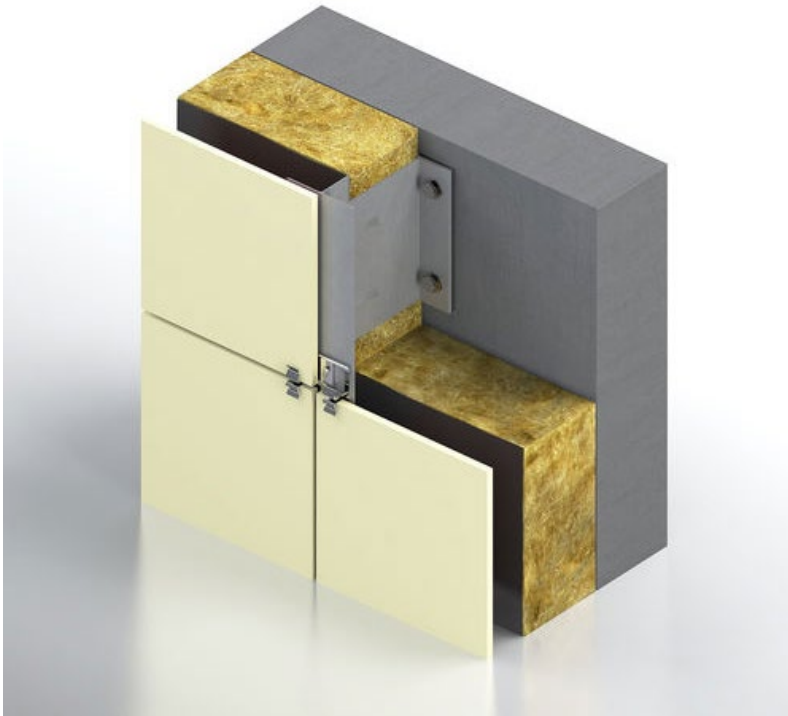


Abb.22: Verbundfassade



### 1.3.5 Hinterlüftete Fassade

Hier kann die Luft vor und hinter der vorgehängten Keramikfassade, frei zirkulieren. In diesem Fall dient die Keramikschicht als Barriere gegen Wasser. Sollte jedoch Wasser diese Ebene durchqueren, kann die Feuchtigkeit im Laufe der Zeit austrocknen. Einen weiteren Anteil zur Zirkulation der Luft tragen offene Fugen bei. Im Sommer kann die hinterlüftete Fassade zu einem positiven Kühleffekt führen, im Winter kann sich dieses Prinzip negativ auswirken, da sich die kalte Luft neben der Gebäudeisolation befindet (Abb.23).



**Abb.23:** Hinterlüftete Fassade

### 1.3.6 Bedachung

Aufgrund der Dauerhaftigkeit der Keramik bietet sie sich wunderbar für Bedachungen an. Dachziegel bieten eine große Auswahl an möglichen Formen und Farben aus denen sich der Architekt bedienen kann. Üblicherweise werden Dächer so geplant, dass die Dachziegel für den Wasserschutz verantwortlich sind. Dies wird durch eingearbeitete Profile und Kanäle bewerkstelligt. Heutzutage werden auch spezielle Unterbahnen als zusätzlicher Schutz verlegt<sup>12</sup> (Abb.24)(Abb.25)



Abb.24: Beispiele für Dachziegel



Abb.25: Dachziegel Montage

12 Vgl. Timelini, 2014, Architectural Keramik

## 1.4 WISSENSSTAND

Einführend wird in diesem Kapitel ein Überblick über die gängigen Schalungsmöglichkeiten gegeben. Der Fokus liegt auf flexiblen Schalungssystemen, die gestrickt werden können. Weiters wird ein Einblick in die Möglichkeiten und Anwendungsbereiche von Textilien gegeben. Angefangen von Ihrer Herstellung bis zu den aktuellen Praktiken und Verwendungen in der Architektur. Abschließend wird eine Einsicht in die aktuellen Technologien und Strategien zur Herstellung von individualisierten Formen von Keramikelementen gegeben.

Als Schalung wird eine temporäre Struktur bezeichnet, die einem Material Unterstützung während dem Trockenvorgang ermöglicht. Grundsätzlich wird zwischen einem Traggerüst, welches aus temporären Elementen zur Unterstützung der Schalung, besteht und einer Schalung bzw. Formkörper, welcher aus Elementen besteht die direkten Kontakt mit dem zum formendem Material hat, unterschieden<sup>13</sup>:

### 1.4.1 Gefräste Schalung

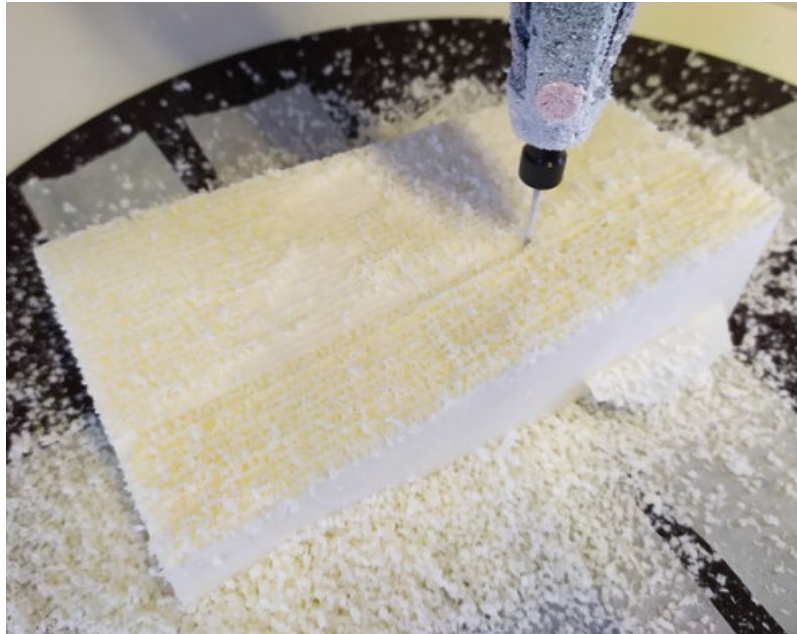
Häufig werden für diese Art von Schalung Polyurethan oder expandiertes Polystyrol verwendet, welche mit einer CNC-Fräse bearbeitet werden. Ein Vorteil dieses Materials ist die einfache Bearbeitung, das geringe Gewicht und die einfache Transportierbarkeit. Obwohl gefräste Formkörper einige Vorteile in Bezug auf die Präzision haben.

Dank der feinen Detailliermöglichkeit im Fräsprozess, bieten gefräste Formkörper einige Vorteile in Bezug auf die Präzision. Jedoch weist diese Methode einen längeren Zeitaufwand, aufgrund des langsamen sukzessiven schichtweisen Materialabtrages auf<sup>14</sup> (Abb.26)(Abb.27).

---

13 Vgl. Chudley, 2012, 69

14 Vgl. Popescu, 2019, 45



**Abb.26:** Gefräste Schalung in Herstellung



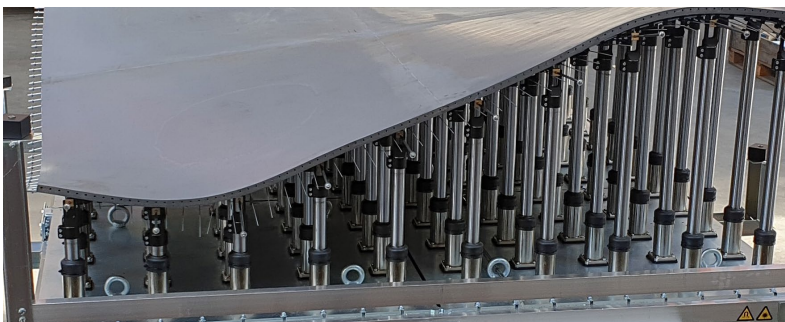
**Abb.27:** Fertige Schalung

## 1.4.2 Rekonfigurierbare Schalung

Bei dieser Methode steht die Schaffung eines Systems, welches sich leicht an verschiedene Geometrien anpassen kann, im Vordergrund. Auch für doppeltgekrümmte Elemente gibt es bereits Lösungen am Markt, sowie das adaptive Schalungssystem "Adapa D300".(Abb.28) Dieses System funktioniert über ein Gitter aus linearen Stäben, die verschiedene gekrümmte Formen erstellen können<sup>15</sup>. Für gekrümmte lineare Elemente wie Säulen und Pfosten wird das "Smart Dynamic Casting", entwickelt an der ETH Zürich, bereits verwendet (Abb.29).

## 1.4.3 Additive Fertigung

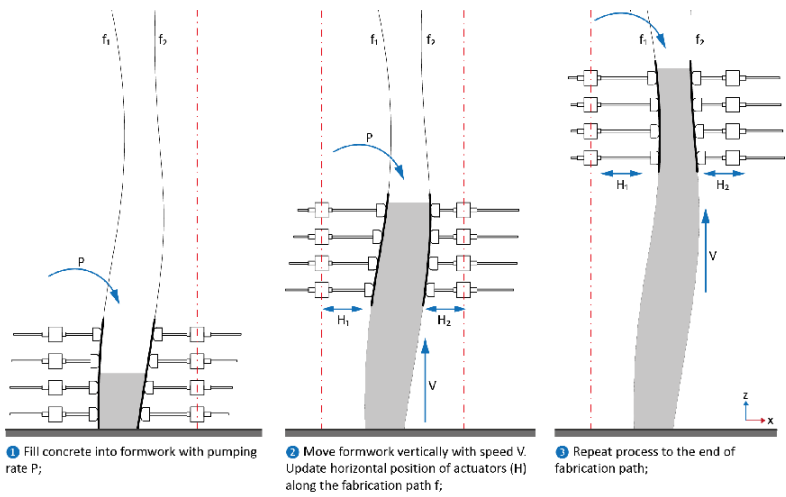
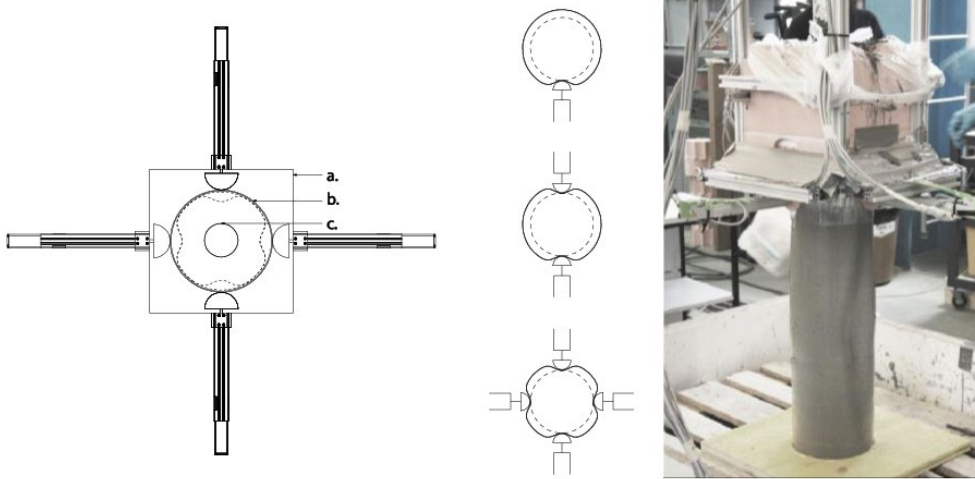
Gefräste Schalungen haben den Nachteil hoher Abfallbildung und rekonfigurierbare Schalungen sind auf Geometrien beschränkt, die ohne Hohlräume sind. Additive Fertigungsmethoden befassen sich mit beiden Problemen. Grundsätzlich ist bei dieser Methode der schichtweise Auftrag von Material das Hauptaugenmerk. Dabei wird ein Objekt über eine Software in einen kontinuierlichen Pfad umgewandelt. Dieser Pfad wird vom Drucker abgefahren, wobei das gewünschte Element entsteht. Durch diese Methode ist es in manchen Fällen möglich ganz auf die Schalung zu verzichten<sup>16</sup>.(Abb.30) Weiters lassen sich gewünschte Schalungen Drucken. Im Beispiel "SmartSlab" wurde eine Betondecke mittels 3d gedruckter Schalung erfolgreich ausgeführt (Abb.31).



**Abb.28:** Adapa D300

15 <https://adapa.dk/composites/>

16 Vgl. Gaudillière, 2019, 42-45



**Abb.29:** Prinzip rekonfigurierbarer Schalung





**Abb.30:** XtreeE 3D gedruckte Stütze, Marseille, 2015



**Abb.31:** Betondecke DFAB-House, Dübendorf, 2019

#### 1.4.4 Verlorene Schalung

Schalungen, die nicht entfernt werden müssen, bieten eine Möglichkeit der Kostensenkung und Arbeitsminimierung. Es wird grundsätzlich zwischen zwei Arten von verlorener Schalung unterschieden. Einerseits der verlorenen Schalung, die gar keine Rolle mehr im fertigen Element spielt und andererseits der strukturell dauerhaften Schalung, die eine aktive Rolle im fertigen Element übernimmt indem sie Kräfte aufnimmt und ableitet oder isolierend wirkt<sup>17</sup>. Alternative Produktionsverfahren wie das Meshmould streben mit dem Druck einer Gitterschale eine Neuinterpretation dieses Verfahrens an. Die Weiterentwicklung von Meshmould zielt auf eine Roboterherstellung ab, die Maschen aus Stahlbewehrungsstäben schweißen kann. Dieses Bewehrungsgitter kann dann mit Beton gegossen oder gesprüht werden<sup>18</sup> (Abb.32).

#### 1.4.5 Flexible Schalung

Flexible Schalungen verzichten auf die Verwendung von festen Materialien, die bearbeitet werden um eine feste Form zu ergeben. Diese Art von Schalung verwendet gespannte Membranen, Netze oder biegeaktive Elemente. Der Gebrauch von Textilien für diese Art von Schalungen hat lange Tradition. Durch ihre fehlende Steifigkeit im Vergleich zu anderen Materialien hat sich diese Methode nicht gegen andere Schalungsmethoden durchgesetzt. Höchstwahrscheinlich liegt es am Fehlen von Werkzeugen zum Entwerfen und Berechnen solcher Strukturen<sup>19</sup>.

Der wachsende Bedarf an maßgeschneiderten Schalungsgeometrien hat zu einer erneuten Erforschung von dieser Methode geführt. Das Zentrum für architektonische Strukturen und Technologien (C.A.S.T), gegründet von Mark West, untersuchte textile Schalungen für verschiedene Arten von Säulen und Trägern<sup>20</sup> (Abb.33).

---

17 Vgl. Popescu, 2019, 64

18 Vgl. Hack, 2013, 290

19 Vgl. Ibell, 2016 102-113

20 Vgl. Cauberg, 2012, 680



Die NEST HiLo Dachkonstruktion ist ein Beispiel für eine Struktur im größerem Maßstab, die mit einer flexiblen Schalung aufgeführt wurde. Hierbei wurde Beton auf ein vorgespanntes Kabelnetz und textile Schalung gesprüht. Die geometrisch optimierte Schalung ermöglichte eine geometrisch komplexe und effiziente Struktur<sup>21</sup> (Abb.34).

Durch die robotergesteuerte Gewebeschalung wird der Prozess des Betongießens dynamisch. Genähte Lycra-Ärmel werden an ein 6-Achs-Kuka-Roboter befestigt und in Position gedehnt. Beton mit Faserzusatz wird dann in die Ärmel gegossen und härtet aus. Der Stoff wird behutsam entfernt und der Roboter positioniert ein neues Stück welches gegossen wird. Das Verbinden der Teile erfolgt durch Verschrauben mit einem 3D gedruckten Knoten. Da die gesamte Konstruktion in 3D modelliert wird, kann jeder einzelne Verbindungswinkel für eine nahtlose Verbindung in der physischen Welt koordiniert werden. Gravitations- und Stoffverhalten werden in Grasshopper und Kangaroo simuliert<sup>22</sup>.

Während flexible Schalungen eine optimierte Konstruktionsweise ermöglichen, die Material und Arbeitskosten sparen, sind sie herausfordernd aufgrund der erschwerten Vorhersage und Steuerung der Geometrie beim Materialauftrag. Besonders die Berechnung der endgültigen Form nachdem das gewählte Material gegossen oder gesprüht wurde stellt eine große Herausforderung dar.

Der Einsatz von textiler Schalung kann erfolgreich zur Reduktion von verwendetem Material führen, jedoch muss bei der Herstellung auf das Muster vom Gewebe geachtet werden um Faltenbildungen zu vermeiden. Meistens werden gewebte Textilien verwendet, die noch zusätzlich verklebt oder vernäht werden müssen, was einen zusätzlichen Arbeitsaufwand darstellt<sup>23</sup>.

---

21 <https://www.empa.ch/de/web/nest/hilo>

22 <https://www.formfounddesign.com/fabric-forms>

23 Vgl. Popescu, 2019, 81

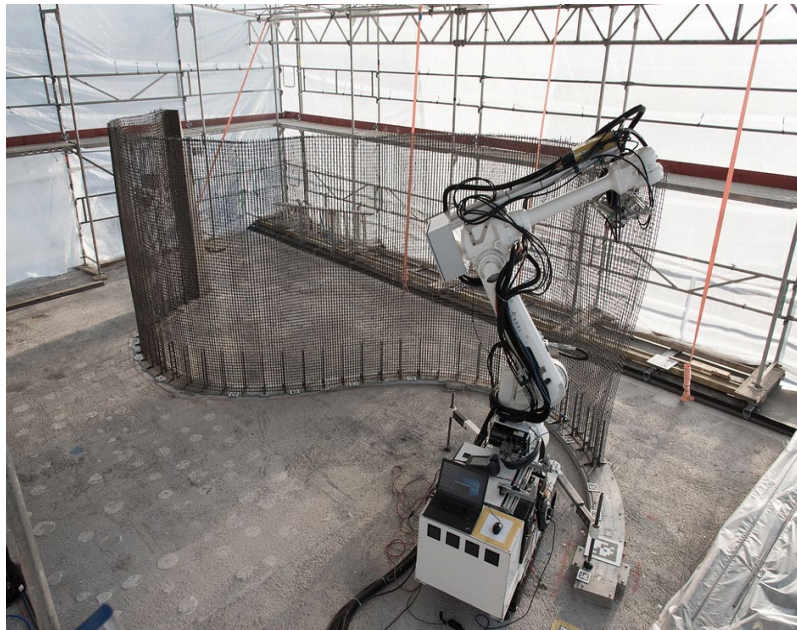


Abb.32: Meshmould + Dfab-House Mauer

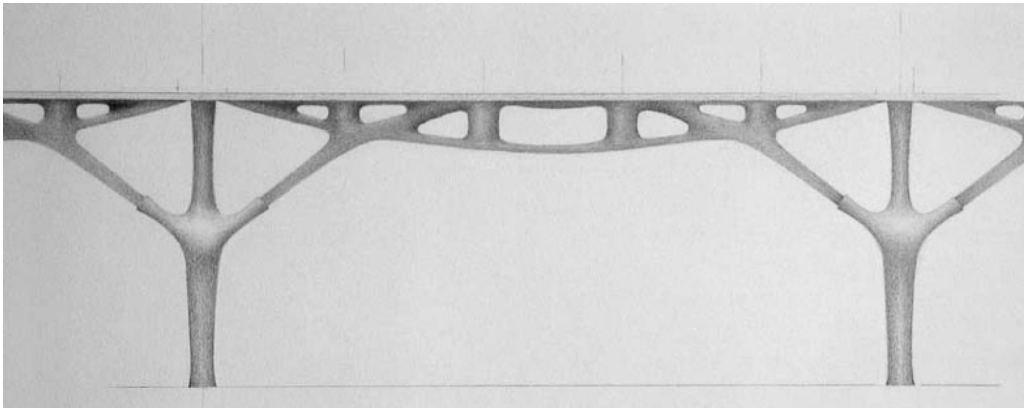
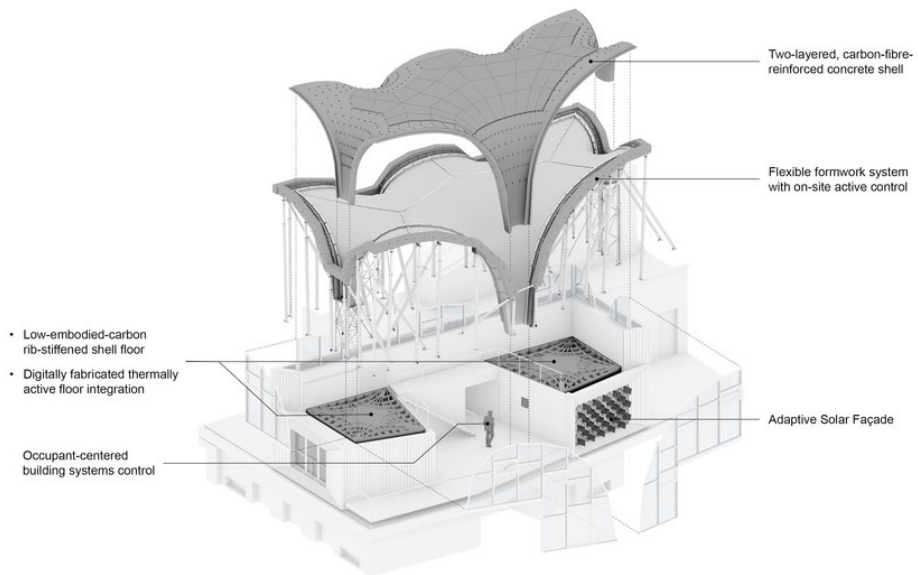
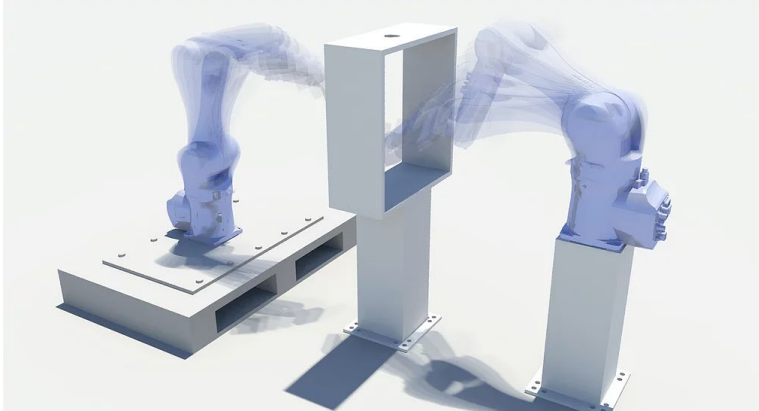


Abb.33: Beispiele von Mark West



**Abb.34:** Nest Hilo Dachentwurf, Dübendorf, in Entwicklung





**Abb.35:** Fabric Form

## 1.4.6 Technisches Textil

Faserverbundwerkstoffe werden seit Langem für eine große Wahl von Leichtgewicht Elementen, die eine hohe Festigkeit benötigen, verwendet. Meist werden sie in der Luftfahrt, Seefahrt, Automobilindustrie, Medizin oder Sport angewendet. Die Hauptvorteile dieser Werkstoffe sind die Leichtigkeit, hohe Steifigkeit und Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit, geringe Wärmeausdehnung und hohe Dimensionsstabilität

Im Bauwesen werden Faserverbundwerkstoffe am häufigsten für Infrastrukturprojekte oder der Verstärkung von Beton verwendet. Unter den am häufigsten verwendeten Fasern zählen Glas, Kohlenstoff und Aramidfasern<sup>24</sup>.

## 1.4.7 Flächige und räumliche Formen

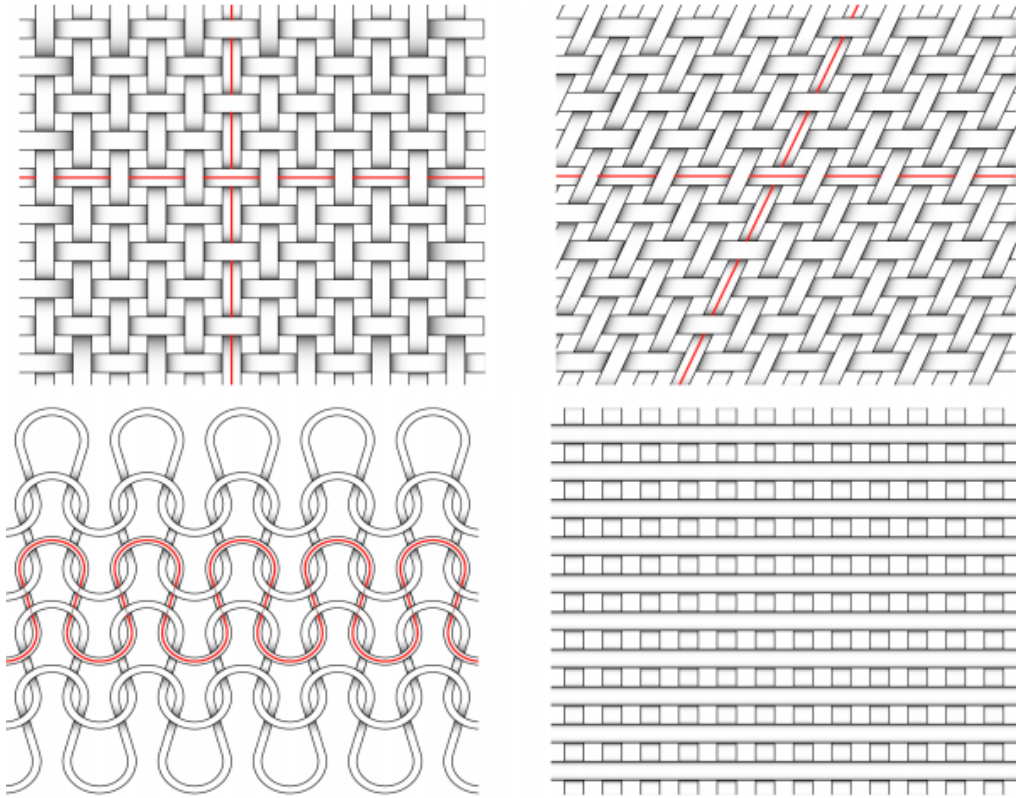
Mit heutigen Technologien können auch räumliche Textilien produziert werden. Räumliche Textilien sind bieten den Vorteil sofort in für die gewünschte Form produziert werden zu können, ohne dass verschiedene Teile vorher zusammen geklebt oder genäht werden müssen. Die gängigen Methoden zur Herstellung solcher Textilien sind das Weben, das Flechten, das Stricken oder anderwärtig gebunden und geformt (Abb.36). Die letzte Kategorie beinhaltet eher Textilverbundstoffe die mittels einer Materialmatrix zusammengehalten werden<sup>25</sup>.

Gewebte Textilien werden am häufigsten für strukturelle Elemente verwendet. Sie bieten eine hohe Stabilität und Festigkeit aufgrund der Faserausrichtung. Ihr Vorteil ist aber auch ein Nachteil was die möglichen Geometrien betrifft. Durch die Faserorientierung ist es schwierig gekrümmte Elemente herzustellen. Das Stricken hingegen bietet sowohl in der Produktion als auch in der geometrischen Freiheit die höchste Flexibilität an. Durch das maschenartige Gewebe lassen sich gestrickte Textilien leichter in komplexe Geometrien bringen<sup>26</sup>.

24 Vgl. Cherif, 2016, 243

25 Vgl. Fanguero, 2011, 134

26 Vgl. Ishmael, 2017. 344-345



**Abb.36:** Webmuster(von links nach rechts) : Weben, Flechten, Stricken, Verbundstoff



**Abb.37:** Beispiele räumliche gestrickter Textilien

### 1.4.8 Technisches Textil in der Architektur

Textileverbundwerkstoffe sind durchaus wegen ihrer Leichtigkeit und Widerstandsfähigkeit in der Baubranche beliebt. Ihre Popularität wurde durch den Wunsch nach effizienterer Bauweise erhöht. Gegenwärtig werden flache und leicht geformte textile Verbundwerkstoffe, die im Handel erhältlich sind, in Verbindung mit Beton verwendet um diesen zu verbessern. Textile Bewehrungen haben den Vorteil, dass sie gegensätzlich zu Stahl nicht korrodieren, was im Betonbau zu einer Minimierung der Betondeckung und somit zu Materialeinsparungen führt<sup>27</sup> (Abb.38).

Aufgrundessen, dass textile Bewehrungen aus Fasern bestehen, lassen sie sich im Vergleich zu Stahlbewehrungen leichter formen. Diese Eigenschaft hat sie zu einem spannendem Feld der Forschung für leichte, doppeltgekrümmte Flächen gemacht, wie das Beispiel „Concrete Shell“ von der Universität Chemnitz zeigt (Abb.39). In manchen Fällen werden Verbundwerkstoffe direkt als Leichtbau eingesetzt, wie die Ergebnisse von der Universität Stuttgart vom Institut ICD und ITKE zeigen. Durch das Wickeln der Faser um eine Form und unter Verwendung von designprinzipien aus der Natur gelingen sehr effiziente und leichte Formen<sup>28</sup> (Abb.40).

### 1.4.9 Stricken

Stricken wird bereits ausgiebig in der Bekleidungsindustrie eingesetzt und hat eine lange Tradition. Heutzutage ermöglicht die Herstellung durch CNC-Strickmaschinen die Fabrikation räumlich komplexer geometrien. Gestrickte. Langsam gewinnt diese Methode auch einen größere Bedeutung im Feld der technischen Textilien aufgrund der leichten Herstellung und der ausgesprochen guten Formbarkeit. Gestricktes Gewebe ist nicht nur leicht anpassbar an verschiedene Geometrien, es lässt sich auch mit verschiedenen Fasern ausführen. Einschließlich Fasern

27 <https://solidian.com/de/products/?c=fertigteile#s>  
28 Vgl. Solly, 2018, 7



mit hohem E-Modul, wie Glas-, Kohlenstoff-, oder Aramidfasern<sup>29</sup>. Trotz aller Vorteile, zeigt auch diese Methode einige Herausforderungen, wenn es für strukturelle Elemente benutzt wird. Fasern mit hohem E-Modul können während der Produktion beschädigt werden und hohe Biegeradien der Faser verringern die Festigkeit des Gewebes, im Gegensatz zu verwobenem Gewebe. Manchmal variieren Schleifenrößen im Gewebe was zu einer erschwerten Vorhersage der lokalen Eigenschaften führen kann. Somit können mechanische Eigenschaften in manchen Fällen unpräzise formuliert werden<sup>30</sup>.

#### 1.4.10 Textil und Ton

Wie bereits erwähnt werden textile Bewehrungen erfolgreich im Betonbau verwendet. Die beiden größten Unterschiede im Bezug auf Konstruktion und Verarbeitung zwischen Beton und Ton sind : 1) Beton kann mit Beschleunigern gemischt werden, um die Trocknungszeiten drastisch zu verkürzen , und 2) der Schrumpfungsfaktor von Ton ist höher als die aus Beton, da sich Beton durch einen chemischen Prozess verfestigt<sup>31</sup>

Materialmischungen für dünne und leichte Tonelemente beruhen auf Faserverstärkung, bei der die Fasern zufällig in der Mischung verteilt sind. Materialien wie Papierfasern, die den Ton während des Trocknungsprozesses verstärken, werden beim Brennvorgang weggebrannt. Jedoch überdauern Glas-, Kohlenstoff-, oder Aramidfasern unter bestimmten Bedingungen den Brennvorgang und können somit im fertigen Element strukturell aktiv sein.

Beispiele finden sich in den Bereichen der traditionellen Architektur auf Tonbasis, in denen Heu zur Verstärkung von Gebäuden verwendet wird<sup>32</sup>, sowie in experimenteller zeitgenössischer Architektur wie Bioshotcrete auf der IAAC Barcelona, wo mehrere Textilschichten verwendet werden, um die Form zu definieren und den Trocknungsprozess zu unterstützen, um eine ungebrannte Tonschalenkonstruktion zu

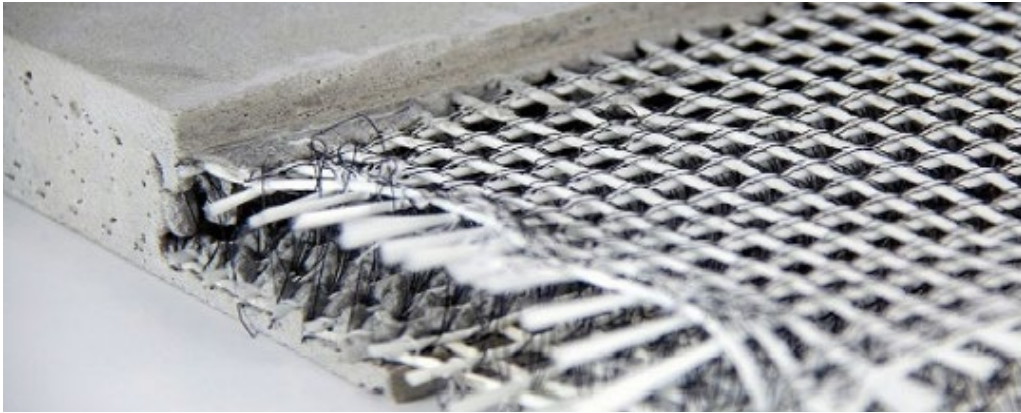
---

29 Vgl. Brennan, 2013, 232

30 Vgl. Spencer, 2001, 89

31 Vgl. Stark, 2000, 145

32 Vgl. Nachtigall, 2013, 58



**Abb.38:** Spacerfabric in Beton



**Abb.39:** Hypar Concrete Shell, Aachen, Deutschland und Concrete Shell, Chemnitz, Deutschland



**Abb.40:** Karbon und Glasfaser Pavillion, Stuttgart, 2013-2015,



**Abb.41:** Bioshotscrete

schaffen<sup>33</sup>.(Abb.41) Eine weitere Untersuchung zur Verstärkung gebrannter Keramik konzentriert sich auf die Verwendung von zwei Arten von Edelstahlfasern<sup>34</sup>.

### 1.4.11 Räumliche Anordnung

Architekten und Designer erkunden die heutzutage immer höhere Belastbarkeit und Festigkeit von keramischen Elementen. Waren sie früher zu dünn und zu spröde oder konnten nur durch Verkleben auf Unterkonstruktion funktionieren, lassen sich heute ganz neue Entwürfe realisieren. Selbsttragende oder statisch wirksame Konstruktionen lassen sich auch mit keramischen Elementen gut verwirklichen<sup>35</sup>.

Wie das Xinjin Zhi Museum in China zeigt, lassen sich extrudierte Elemente auch unkonventionell anordnen. Hierbei wurden die Fliesen auf Stahlseilen aufgehängt um verschiedene Effekte zu erzielen (Abb.42).

Das in Mailand realisierte Projekt "3D\*1" wurde aus 3mm dünnen und 3000mm langen Fliesen ausgeführt. Der Würfel wurde aus 31 Scheiben die Abmessungen bis zu 3m\*1,5m. Die übergroßen Fliesen wurden im Pressverfahren hergestellt und stellen bis heute eine Sensation dar<sup>36</sup> (Abb.43).

Kengo Kuma hat mit dem Keramikhersteller Casalgrande ein Selbsttragendes System entworfen, welches die Standard-Keramikfliese mit einer Stahlkonstruktion vereint, um "transparente Wand" zu kreieren<sup>37</sup> (Abb.44).

Das Projekt Ceramic Tectonic, wurde von Martin Bechthold, Zach Seibold und Milena Stavric realisiert und zeigt dass unter optimierter Geometrie auch ganz übliche Keramikfliesen ohne Stahlkonstruktion als Selbsttragendes System agieren können. Es

---

33 Vgl. Bravo, 2018, 78-89

34 Vgl. Cabedo, 2016, 1-6

35 Vgl. Bechthold, 2015, 168

36 <https://www.odiledecq.com/projets/3d-x1/>

37 <https://www.casalgrandepadana.de/de/magazine/detail/casalgrande-padana-und-kengo-kuma-erbauen-die-casa/>



wurden unbewehrte Fliesen verwendet. Das Pavillon misst eine Höhe von 2,48m und eine Spannweite von 6m und besteht aus 462 individuellen Teilen die zwischen 82 und 181 cm lang sind<sup>38</sup> (Abb.45)(Abb.46).



**Abb.42:** Xinjin Zhi Museum, China, 2011

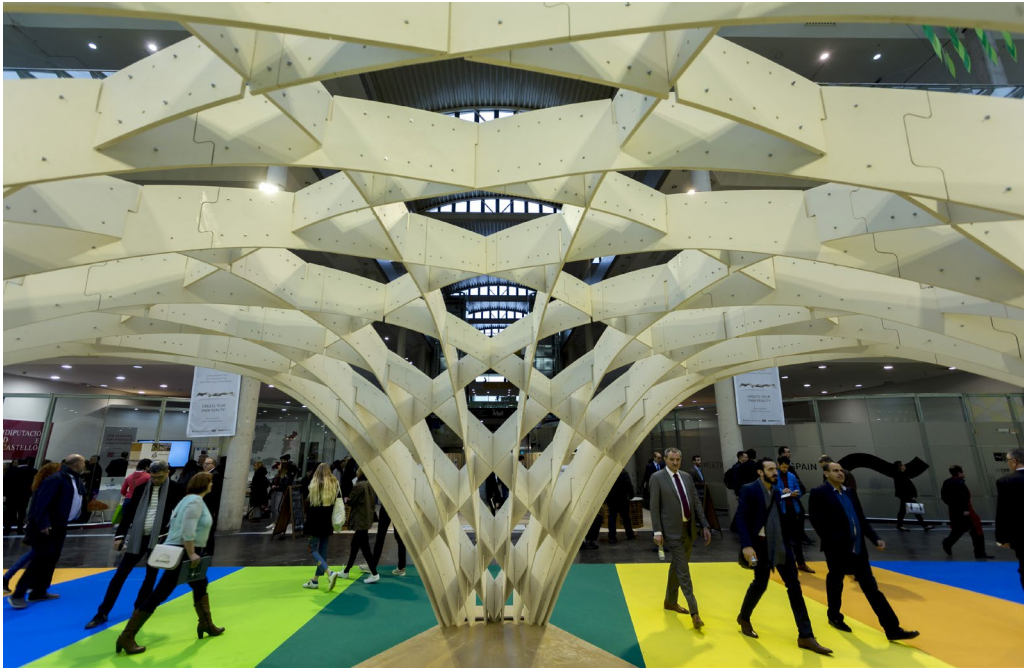
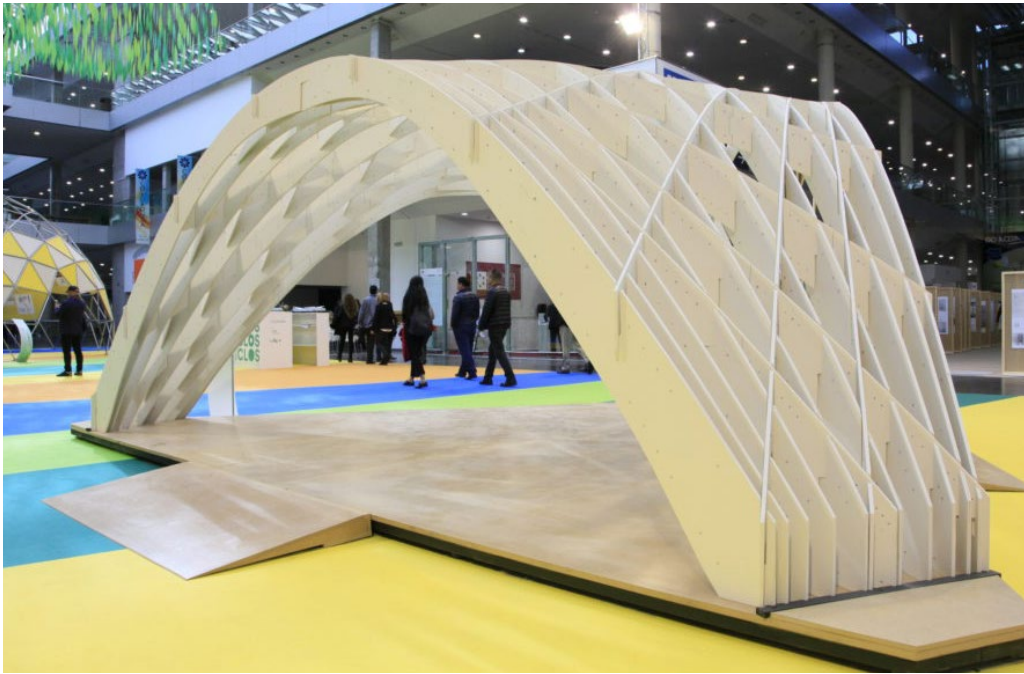


**Abb.43:** 3D\*1, Mailand, 2012



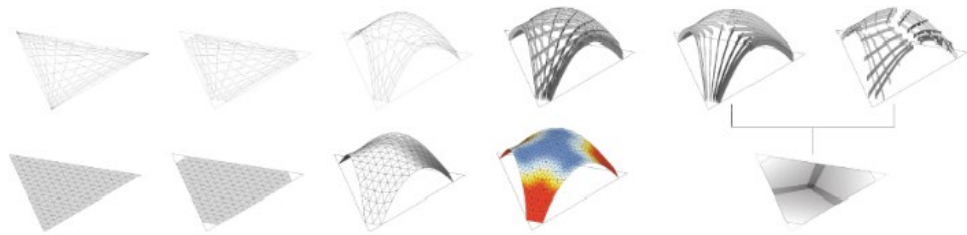
**Abb.44:** Ceramic Cloud, Regio Emilia, 2016

38 Vgl. Seibold/Mesa/Stavric/Bechthold, 2018, 1





**Abb.45:** Ceramic Tectonic, Valencia, 2018



**Abb.46:** Formfindungs Prozess

### 1.4.12 Individualisierung der Form

Das individuelle Anpassung der Elemente wird von einerseits aus ästhetischen Gründen und andererseits von der Notwendigkeit der Bauteiloptimierung angetrieben. Bei der Bauteilanpassung wird versucht durch individuelle Optimierung das Tragverhalten, den Lichteinfall oder Be- und Entlüftung zu verbessern. Das Feuchtverfahren hat das größte Potenzial um für individuell angepasste Elemente verwendet zu werden<sup>39</sup>.

Bei der Villa Nurbs wurden die Fassenelemente im computergestütztem Slumping Verfahren hergestellt. Hierbei wurden die keramischen Elemente relativ zur Gebäudeform angepasst. Die Fassade wird von einem Stahlseilnetz gestützt<sup>40</sup> (Abb.47).

Bei der Erweiterung des Oceanarios in Lissabon wurde die Fassade aus 5000 individuellen Elementen bestückt. Die Bauteile der hinterlüfteten Fassade, der Ecklösung und der lichdurchlässigen Elemente wurden in Zusammenarbeit mit Ceramica Cumella geplant. Die Elemente wurde im Extrusionsverfahren hergestellt, gestanzt und schlussendlich in die endgültige Form gepresst<sup>41</sup>.

---

39 Vgl. Bechthold, 2015, 181

40 <https://www.ceramicarchitectures.com/obras/villa-nurbs-house/>

41 <http://www.cumella.cat/portfolio/oceanario-campos-costa/>





Abb.47: Villa Nurbs, Empuriabrava, 2006

### 1.4.13 Systeme in Entwicklung

Das hauptsächliche Innovationsfeld der Keramikbranche liegt in der Entwicklung neuer Glasuren und Oberflächeneffekte. Jedoch entwickeln Designer und Künstler immer wieder innovative Formen und Verfahren zur Umsetzung neuer Ideen. Digitale und robotergestützte Verfahren beeinflussen zusätzlich die Produktion.

Forscher von der Universität Harvard und der Technischen Universität Graz haben ein System für die Nutzung von räumlich geformten Keramikelementen im Verbund mit Hochleistungsfaserbeton, für die Realisierung einer biegesteifen Tragschale erforscht. M.Bechthold, F.Raspall und A.Trummer ist es gelungen Keramikelemente als Schalung für Betonrippen zu erstellen. Das Hybridsystem bietet eine breite Auswahl an möglichen Anwendungsbereichen<sup>42</sup> (Abb.48).

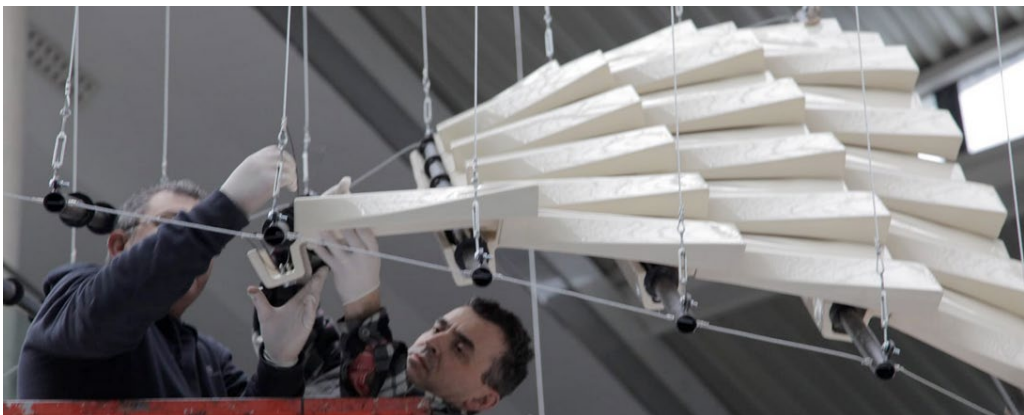
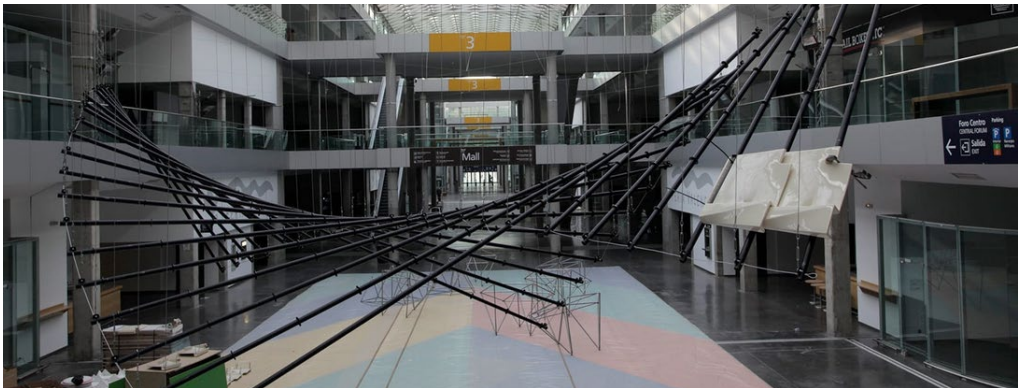
Der Entwurf von Bechthold und King zeigt wie Handwerk digitalisiert werden kann. Durch eine Software können Designer Bilder hochladen die durch Algorithmen diskretisiert werden. Dieselbe Software ist auch zuständig für die Codegenerierung für den Industrieroboter, der die Fliesen verlegt<sup>43</sup> (Abb.49).

Unter dem Begriff der additiven Fertigungsmethode, welche meist als 3D Druck zusammengefasst wird, versteht man den schichtweisen Auftrag von Material, wofür sich Ton hervorragend anbietet. Die leichte Formbarkeit und Materialoptimierung eignen sich bestens für das Drucken. Diese Materialvorteile nutzt der Künstler Olivier van Herp für sich um die Grenzen gedruckter Keramik auszuloten (Abb.50).

---

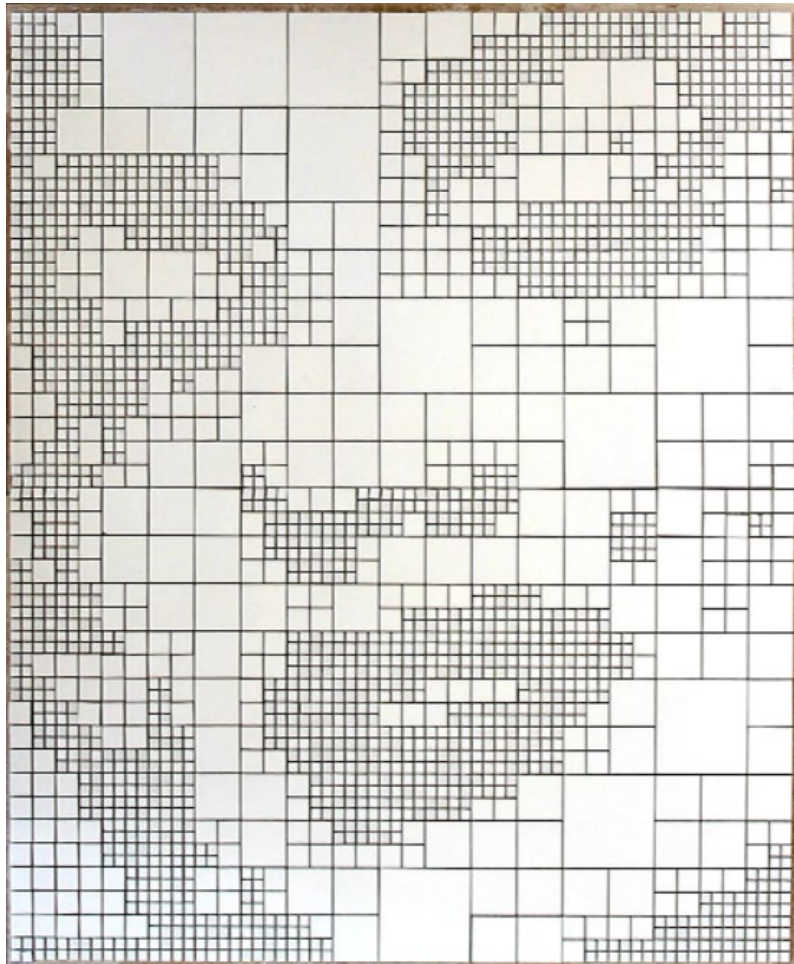
42 [https://www.tugraz.at/fileadmin/user\\_upload/tugrazExternal/f1f34b8a-f09d-427d-aa86-965883a19682/Forschungsprojekte/Ceramic\\_Shell\\_Shelter/St\\_Martin\\_C\\_Shell\\_2.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazExternal/f1f34b8a-f09d-427d-aa86-965883a19682/Forschungsprojekte/Ceramic_Shell_Shelter/St_Martin_C_Shell_2.pdf)

43 Vgl. Bechthold, 2012, 2



**Abb.48:** Ceramic Shell, Cevisama, 2014





**Abb.49:** Robotic Tile Placement



Abb.50: Olivier van Herp Vasen

### 1.4.14 Technologien

Innovationen im Bereich der Keramik sind nicht ausschließlich auf die Umsetzung von Projekten beschränkt. Designer und Hersteller arbeiten eng zusammen um neue Produkte, Prozess und Technologien zu entwickeln. Die Palette von Keramikerzeugnissen wird immer breiter : von übergroßen Fliesen bis hin zu Nanobeschichtungen ist fast alles möglich.

Das Entwerfen und Produzieren von anspruchsvoller Sanitärkeramik ist keine leichte Aufgabe. Das Produzieren im Schlickergussverfahren stößt schnell an seine Grenzen. Die Produktion erfolgt meist in großer Stückzahl und erfordert eine zusätzliche Handarbeit am fertigen Stück. Die Firma Laufen hat ein spezielles Verfahren entwickelt, bei dem die Tonmasse in die Gießform gespritzt wird. Um dies effizient durchführen zu können, hat das Unternehmen zusätzlich eine neue Tonmischung entwickelt, die Saphirkeramik. Diese Mischung übertrifft herkömmliche Tonmischungen in Punkto Festigkeit um den Faktor 2-3. Weswegen sich schärfere Biegeradien und äußerst dünne Wanddicken herstellen lassen<sup>44</sup> (Abb.51).

Das von Ceramica Malpesa und Dr. Vincente Sarrablo entwickelte System Flexbrick besteht aus einem Drahtgeflecht und Keramikelemente, die mittel Haken befestigt sind. Die Elemente werden meist als Fassadenbauteile abgehängt oder aber auch Dächer oder anderen Ebenen montieren<sup>45</sup>

---

44 <https://www.laufen.co.at/de/products/features-benefits/sanitary-ware/01-saphirkeramik#>

45 <https://www.flexbrick.net/en/>



**Abb.51:** Saphirkeramik

# METHODEN



## 2.1 EINLEITUNG

Um ein besseres Verständnis für die Materialien Ton und Textil, und deren Verhalten miteinander zu bekommen, wurden experimentelle Studien in verschiedenen Maßstäben durchgeführt. Der Versuchprozess wird in 5 Schritte unterteilt.

- 1) Der richtige Faden
- 2) Die Strickbarkeit
- 3) Tonmischung
- 4) Fertigung
- 5) Der Brennvorgang und die Temperaturbeständigkeit

Nachdem alle Experimente in kleinem Maßstab durchgeführt worden waren, wurde das gewonnene Wissen angewandt, um Experimente in großem Maßstab durchzuführen. Schlussendlich wurde ein 1:1 Modul gebaut um die architektonische Anwendung zu demonstrieren.

## 2.2 TEXTILIEN

Um als potenzielle flexible Schalung für Tonelemente, infrage zu kommen, sollte das gewählte Textil frei formbar und kompatibel mit Ton sein. Der Elastizitätsmodul spielt eine wichtige Rolle. Die Schalung muss später das Schrumpfen während der Trocknungspahse von Ton tolerieren.

Folgende Textilien wurden aufgrund Ihrer Materialstruktur als mögliche flexible Schalung getestet :

- 1) gewebtes Textil (Abb.52)
- 2) gestricktes Textil (Abb.53)
- 3) Textil in hexagonaler Maschenherstellung (Abb.54)

Textilien sind anisotroper Natur, weswegen der strukturelle Aufbau des Gewebes einen Einfluss auf deren Eigenschaften in Bezug auf Dehnbarkeit hat. Somit hängen die mechanischen Eigenschaften eines Gewebes von der Herstellungsmethode und der Richtung, aus der die Kraft einwirkt, ab.

Die gewebte Probe ist wegen ihrer orthogonalen Anordnung zwischen den Fasern wenig dehnbar und somit schwieriger zu manipulieren. Das Textil mit hexagonaler Maschenform lässt sich wiederum gut entgegen der Faserrichtung dehnen und in Faserrichtung sehr schlecht dehnen, was die Formbarkeit limitiert. Gestrickte Textil lässt sich jedoch in alle Richtungen gleich gut dehnen. Die Flexibilität wird durch die losen Maschen gewährleistet. Wegen dieser Eigenschaft wurde das Stricken anderen Herstellungsmethoden vorgezogen.

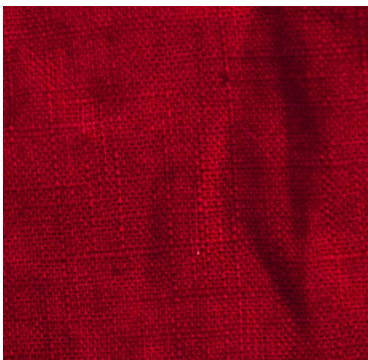


Abb.52: Webmuster

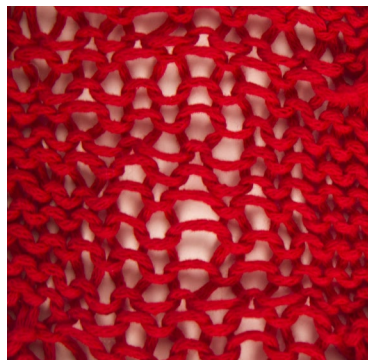


Abb.53: Strickmuster



Abb.54: Hexagonmuster

## 2.2.1 Gestricktes Textil

Gestrickte Proben wurden entweder mit einer halb automatischen Strickmaschine (Abb.55) oder per Hand hergestellt (Abb.56). Die Strickmaschine besitzt 46 Nadeln und kann Garnstärken zwischen 2,5mm und 10mm verarbeiten. Das gestrickte Textil wird entweder als Flach- oder Rundstrick hergestellt (Abb.57). Die Maximale Breite vom Textil beträgt beim Flachstrick 45cm und der maximale Durchmesser beim Rundstrick beträgt 35cm. Für Handgestrickte Proben wurden Stricknadel, die aus beschichtetem Aluminium angefertigt sind. Für die gezeigten Proben wurden Stricknadel mit einem Durchmesser von 6mm verwendet.



Abb.55: Addi Express Strickmaschine



Abb.56: Handstricken

### Machine Movements

Cylinder Surface - One Direction



Flat Surface - Back and forth



Abb.57: Rund und Flachstrick

## 2.2.2 Der Garn

Gestrickte Textilien werden durch Maschenbildung von Garnen hergestellt. Garne wiederum bestehen aus langen und dünnen Fasern. Diese Fasern können zu einem Garn gefacht,gezwirnt oder um ein Filamentkern gewickelt sein.

Eine Reihe von Experimenten wurde durchgeführt, um den am besten geeigneten Faden hinsichtlich seiner Strickbarkeit und Temperaturbeständigkeit zu finden.

Weitere Auswahlkriterien waren Preis und gute Verfügbarkeit, da der Materialwert dem von Ton entsprechen soll.

Es wurden gezwirnte Garne aus Polyacryl (Abb.58), Polyester (Abb.59) und Baumwolle (Abb.60) von der Firma Schachenmeyer und Woolly erworben. Juttegarn, welches ebenso gezwirnt hergestellt ist, wurde ausprobiert (Abb.61).

Zudem wurden auch Kohlenstoff-, Glas-, Basalt-, und Edelstahlkordel (Abb.62 - Abb.65) von der Firma Siltex und Engelmann bestellt.

Eine Kordel ist ein aus mehreren Garnen, die ihrerseits bereits gezwirnt sind, zusammengezwirntes Mehrfachgarn.

Die genannten Fasern wurden als Kordel angekauft um Ausfransen und Schwachstellen in der gesamten Maschenstruktur zu verhindern. Versuch mit losen Fasern konnten gar nicht auf der Strickmaschine verstrickt werden.



**Abb.58:** Polyacryl 0,4g/m



**Abb.59:** Polyester 1,4g/m



**Abb.60:** Baumwolle 0,3g/m



**Abb.61:** Juttegarn 3,3g/m



**Abb.62:** Karbonfaserkordel 0.004g/m



**Abb.63:** Basaltfaserkordel 0.002g/m



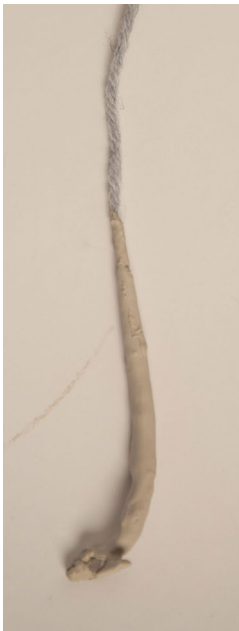
**Abb.64:** Glasfaserkordel 0.0067g/m



**Abb.65:** Stahlkordel 0.2g/m

### 2.2.3 Garne in Ton

Bevor das Stricken weiter untersucht wurde, war es wichtig herauszufinden, wie die Garne in Verbindung mit Ton reagieren. Zur verwendeten Tonmasse komme ich später im Teil : Tonmischung. Während Materialien mit rauer Oberfläche oder einem Durchmesser von minimal 4mm und saugfähigen Fasern eine große Menge an Ton aufnehmen können (Abb.67), nehmen Garne die unter 4mm Durchmesser sind oder eine glatte Oberfläche haben (Abb.69), wie die Stahlkordel, sehr wenig Ton auf. Von der Stahlkordel floß der Ton teilweise wieder . Je mehr Material auf einem Garn haften bleibt, desto schneller kann eine bestimmte Materialstärke erreicht werden. Am meisten Ton haben jedoch Jutte und dicke Wollegarne aufgenommen.



**Abb.66:** Polyacrylgarn in Grau



**Abb.67:** Polyester



**Abb.68:** Baumwolle



**Abb.69:** Karbonkordel



## 2.2.4 Herstellen von gestrickten Proben

Zum Testen der Strickbarkeit von einzelnen Garnen wurde das Strumpfstichmuster verwendet und es wurde auf der Strickmaschine hergestellt (Abb.70 - Abb.73). Alle Teststücke haben dieselben Maße von 12cm x 12cm. Für diese Proben wurden jeweils um die 15m Garn verwendet .



**Abb.70:** Polyacryl Garn



**Abb.71:** Karbonkordel



**Abb.72:** Glasfaserkordel



**Abb.73:** Basaltkordel

### 2.2.5 Strickbarkeit

Um ein Netz zu stricken, müssen die Garne für die Verarbeitung flexibel genug sein. Fäden mit einer rauen Oberfläche und hoher Biegefestigkeit, wie die Edelstahlfaser (Abb.74), lassen sich sehr schwer stricken. Die Edelstahlfaser musste leicht eingeölt werden, damit der Fader besser beim Stricken gleitet.

Im Gegenzug bieten diese Fasern stabile Maschen und eine genauere Geometrie.

Weniger biegesteifen Garne, wie Glas-, Karbon-, Basaltkordel, lassen sich dafür leichter verstricken und dehnen. Jutte ließ sich auch nur leicht eingeölt verstricken. Wurde aber für weitere Versuche nicht verwendet, da es zu aufwendig ist, diese immer vorzubereiten.



**Abb.74:** Stahlkordel ist nicht verstrickbar



## 2.2.6 Garnspannung

Die Dimensionen von den Proben werden jeweils über die Anzahl der abgefahrenen Nadel und Reihen bestimmt. Abhängig von der verwendeten Garn und der Garnspannung beim Stricken, entstehen verschiedene Abmessungen (Abb.75). Zieht man beim Stricken fester an der Faser entstehen engmaschige Strukturen mit geringeren Abmessungen, die sich auch schwieriger Dehnen lassen. Führt man die Faser etwas lockerer beim Stricken entstehen weitmaschige Strukturen mit größeren Abmessungen, die sich auch leichter Dehnen lassen, aber dafür geometrisch viel schwieriger zum kontrollieren sind.



**Abb.75:** Bei selber Garnlänge entstehen bei unterschiedlicher Garnspannung unterschiedliche Abmessungen

## 2.2.7 Strickmuster

Es wurden weitere Strickmuster ausprobiert. Teils auf der Maschine; teils per Hand produziert (Abb.76). Für geometrisch einfaches Textil, welches immer im gleichen Strickmuster hergestellt wird, wurde die Maschine verwendet. Geometrisch komplexe Textilien, bei welchen Strickmuster variieren, wurden per Hand hergestellt. Für spätere Arbeiten kann eine programmierbare vollautomatische Strickmaschine herangezogen werden um schnelle und einfach komplexe Textilien automatisiert herzustellen. Aus kostengründen wurde in dieser Phase keine industrielle Strickmaschine verwendet.

Weiters können unregelmäßige Strickmuster zu unkontrollierter Dehnung (Abb.77) und dadurch zu Schwierigkeiten in der Kontrolle der gewünschten Geometrie führen. Aus diesen Gründen wurde meist das der Strumpfstich verwendet. Das Es ist auch möglich beim Stricken zwei oder drei unterschiedliche Fasern zu verwendet. Dies wurde jedoch nicht weiter erforscht.



**Abb.76:** Handgestrickte Maschenvariation



Abb.77: Mittelstück mit weiten Maschen



Abb.78: Enge Maschen

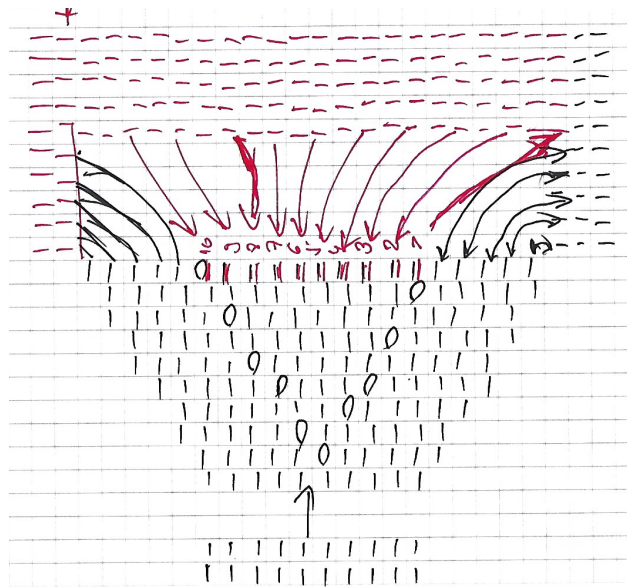


Abb.79: Strickplan

## 2.2.8 Das Formen von gestricktem Textil

Um herauszufinden mit welcher Methode sich das Textil bestmöglich in Form bringen lässt, wurden viele kleine Versuche durchgeführt. Die Suche nach Formen, die strukturelle Vorteile bringen und als Bauelement dienen können, war von großer Bedeutung.

Dabei stellte sich heraus, dass das Spannen sich am besten zu diesem Zweck geeignet hat. Ähnlich dem Membranbau bietet das Spannen von Textil eine ausreichende geometrische Kontrolle und Stabilität, um gewünschte Formen zu erreichen.

Davor wurde das Textil über eine Schalung gelegt. Als formendes Objekt wurden Luftballons oder Styropor verwendet. Diese Methode hat sich gut für Freiformen und Schalenformen geeignet. Es erweist sich jedoch als schwierig das getrocknete Stück vom formgebendem Objekt zu entfernen. Bei den Luftballons konnte die Luft entlassen werden und somit war es etwas leichter. Das Styropor war jedoch fest mit dem Tonstück verbunden. Weiters erweist es sich als schwierig mit Luftballons eine gewünschte Geometrie zu erzielen.

Beim Spannen spielt die Unterkonstruktion eine wichtige Rolle. In den meisten Fällen wurde diese aus Finnplatte hergestellt, welche im Lasercutter zurecht geschnitten wurde. Später wurden auch Holzrahmen gebaut um mehr Stabilität zu gewährleisten. Das Besondere dieser Methode ist, dass das eingespannte Textil unter Belastung Zugkräfte aufnimmt und an ihre Außenseiten weitergibt. Die Kraft, die auf das Textil wirkt, wird vom Textil selbst verteilt. Dieser Zustand sorgt für eine optimierte Formfindung, da das Textil die Form des geringsten Widerstandes aufnimmt.

Bei diesem Arbeitsschritt wurde zwischen zwei Geometrien entschieden, der gekrümmten Fläche und des Zylinders. Die gekrümmte Fläche war weitaus schwieriger in der Herstellung und geometrischen Kontrolle und die Komplexität der Unterkonstruktion waren weitaus höher.

Beim ersten Versuch, welches mittels Einspannen untersucht wurde, wurde das gestrickte Textil an einem Teller festgeklammert.



**Abb.80:** Textilprobe



**Abb.81:** Formprozess



**Abb.82:** Fertige Form

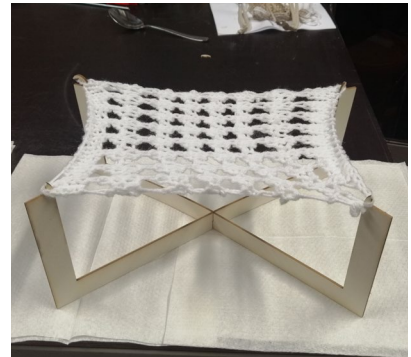
Anschließend wurde es mit Wasser befeuchtet und für 2h in der Tiefkühltruhe gelagert (Abb.81) und anschließend mit Ton übergossen. Die Dauer des erstarrten Zustandes reicht jedoch nicht aus, um diese Methode später in Verbindung mit Ton zu gebrauchen.



**Abb.83:** Textilprobe



**Abb.84:** Formprozess



**Abb.85:** Fertige Form

Beim zweiten Experiment wurde eine Unterkonstruktion aus Finnplatte geschnitten. Das gestrickte Textil wird auf 4 Auflagern gespannt um eine gekrümmte Fläche zu formen (Abb.85).

Der erste Zylinder wurde durch zwei Scheiben aus Finnplatte gespannt. Wobei die obere Scheibe einen kleineren Radius aufweist als die untere Scheibe um die Struktur des Textils bei varrierendem Querschnitt zu beobachten. Die gestrickte Probe zeigt eine weite Maschenbreite wenn sie mehr gedehnt wird (Abb.86).

Der zweite Zylinder wurde zwischen zwei Finnplatte Platten aufgespannt. Hierbei wurde ein Loch aus der Finnplatte geschnitten mit kleinen Löchern rundherum um das gestrickte Textil mit der Finnplatte zu verbinden. Weiters wurden die Platten aufgespannt indem zwei Holzblöcke zwischen die Ebenen hineingeschoben wurden (Abb.87).





**Abb.86:** Zylinderform mit Finnpappe innen





**Abb.87:** Zylinderform gespannt zwischen zwei Platten aus Finnplatte



**Abb.88:** Gerade gezogener Versuch

Anschließend wurde die erste stabförmige Geometrie ausprobiert (Abb.88). Dazu wurden mehrere Ringe aus Finnplatte Ringe ausgeschnitten und zusammengelegt. Diese wurden jeweils am Ende des gestrickten Schlauches befestigt und dann auseinander gezogen. Diese Methode benötigte den geringsten Materialaufwand für die Unterkonstruktion und konnte durch das Gewicht sehr gut kontrolliert werden. Mehr Gewicht bedeutet längere und schlankere Stäbe, weniger Gewicht hat einen breiteren und kürzeren Stab zur Folge. Für diesen Versuch wurde ein Gewicht von ca. 1,25 kg verwendet.

Das Formen von Textil in eine Zylinderform als weitaus effizienter erwiesen, war leichter herzustellen und unkomplizierter zum Kontrollieren im Gegensatz zur Herstellung der gekrümmten Fläche.

Somit wurde die Zylinderform (Hohlprofile) für das anschließende Bauelement gewählt. Die Hohlprofile bieten aufgrund ihrer Struktur und besseren Verhältnisse von Festigkeit und Steifigkeit zur benötigten Masse ein effizienteres Konstruktionssystem als Vollprofile, da sie bei gleichem Querschnitt weniger Material verbrauchen<sup>46</sup>. Weiters ist es möglich den Querschnitt zu variieren, was zu besseren Ergebnissen führen kann.

Unterkonstruktionen, die keine Möglichkeit zum Nachspannen bieten, waren nicht gut geeignet, da die Geometrie nicht angepasst werden konnte. Falls keine aussagekräftigen Textilsimulationen gemacht werden, ist es ratsam, Möglichkeiten einer zusätzlichen Textilspannung zu haben, sei es durch zusätzliche Gewinde oder Verstellerschrauben.

---

46 Vgl. Alajarmeh, 2020, 46



## 2.3 TON

Für die meisten Versuch wurde eine Hochleistungsmasse(TM2) aus flüssigem Ton namens SaphirKeramik des österreichischem Keramikhersteller Laufen verwendet. Diese Tonmischung zeichnet sich durch bessere Festigkeit aus, weswegen schärfere Biegeradien und dünnere Wanddicken möglich sind. Weiters zeichnet sich diese Masse durch einen geringeren Schrumpfungsgrad aus.

Es wurden Versuche mit eigenen Tonmischungen durchgeführt. Dazu wurde Tonpulver, von der Firma Georg und Schneider Typ 209, mit Wasser im Verhältnis 2:1 und 1:2 und 1:1 gemischt. Am besten geeignet war das 1:1(TM1) , jedoch waren die produzierten Versuche (Abb.89) nach der Trocknungszeit rissanfällig und zerbrechlicher als die Exemplare, die mit der SaphirKeramik hergestellt wurden (Abb.90).

Um sicherzustellen, dass keine Klumpen in der Mischung verbleiben und um eine konstante Viskosität während des gesamten Auftragprozesses zu gewährleisten, war es wichtig, die Mischung kurz vor dem Auftragen gut zu mischen.

In späteren Versuchen wird auch die Mischung TM3-5 verwendet.

### ***Tonmischungen***

#### **TM1**

Wasser 50%  
Tonpulver 50%

#### **TM2**

SaphirKeramik 100%

#### **TM3**

SaphirKeramik 84%  
Wasser 16%

#### **TM4**

SaphirKeramik 68%  
Wasser 32%

#### **TM5**

SaphirKeramik 50%  
Wasser 50%



Abb.89: TM1



Abb.90: TM2

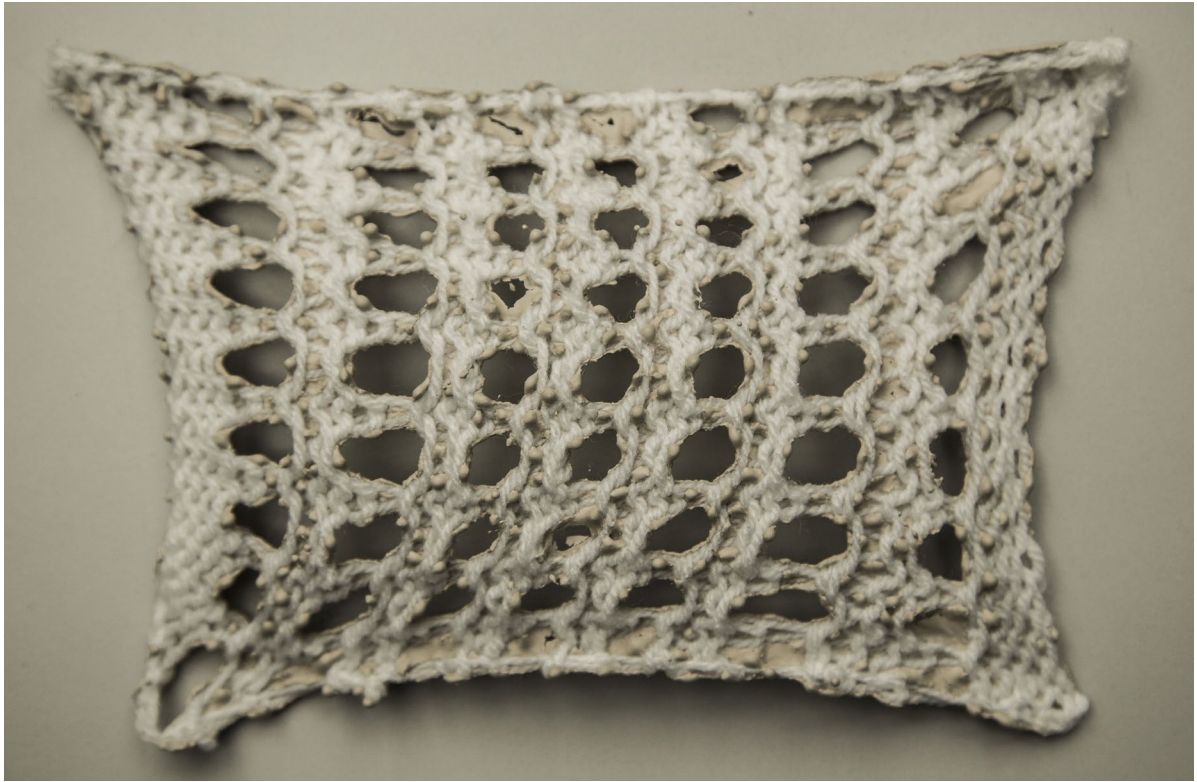
Die Modelle die für Formprozesse hergestellt wurden, wurden auch in diesem Teil verwendet. Bevor die Entscheidung fiel, den Ton im Sprühverfahren anzubringen, wurden andere Methoden des Tonauftrages evaluiert. Jedoch stellte sich heraus, dass das Sprühen am effektivsten und materialsparendstem ist.

### **2.3.1 Gießen**

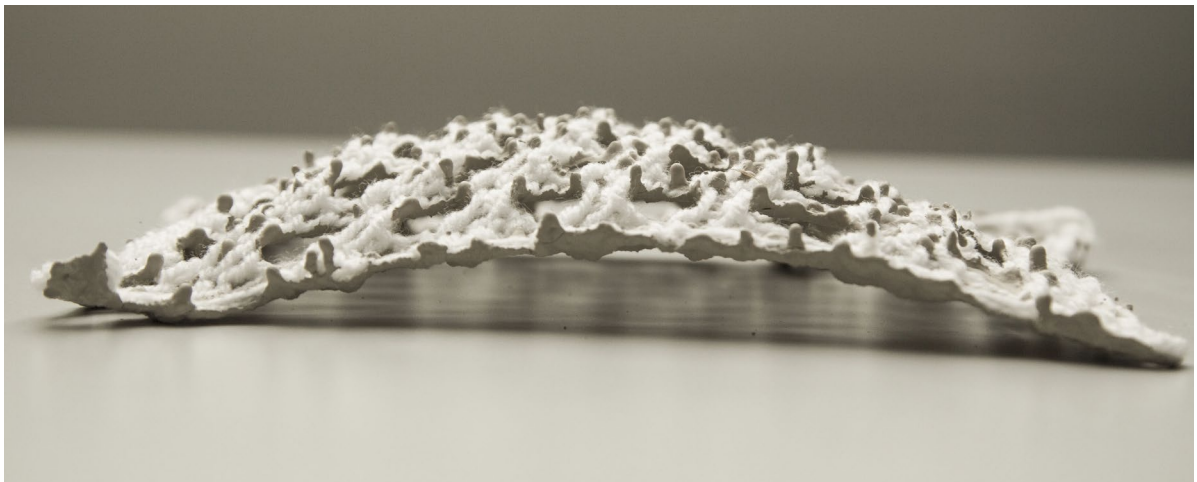
Für gegossene Versuche wurde die Mischung TM2 verwendet. Zum Gießen wurde ein Löffel genommen um den Ton aufs Textil anzubringen.

Beim Gießen zeigte sich, dass die Kontrolle des Materialflusses sich als schwierig erweist (Abb.91), wodurch unwillkürlich unterschiedliche Wandstärken entstehen können. Desweiteren kann es zur unregelmäßiger Oberfläche kommen (Abb.92). Die Versuche zeigten, dass bei dieser Methode sehr viel Ton verschwendet wird. Um das Textil vollkommen zu übergießen, muss oft gegossen werden bis sich das Ton gleichmäßig verteilt hat. Dies führt dazu, dass viel Ton vom Netz abfließt.

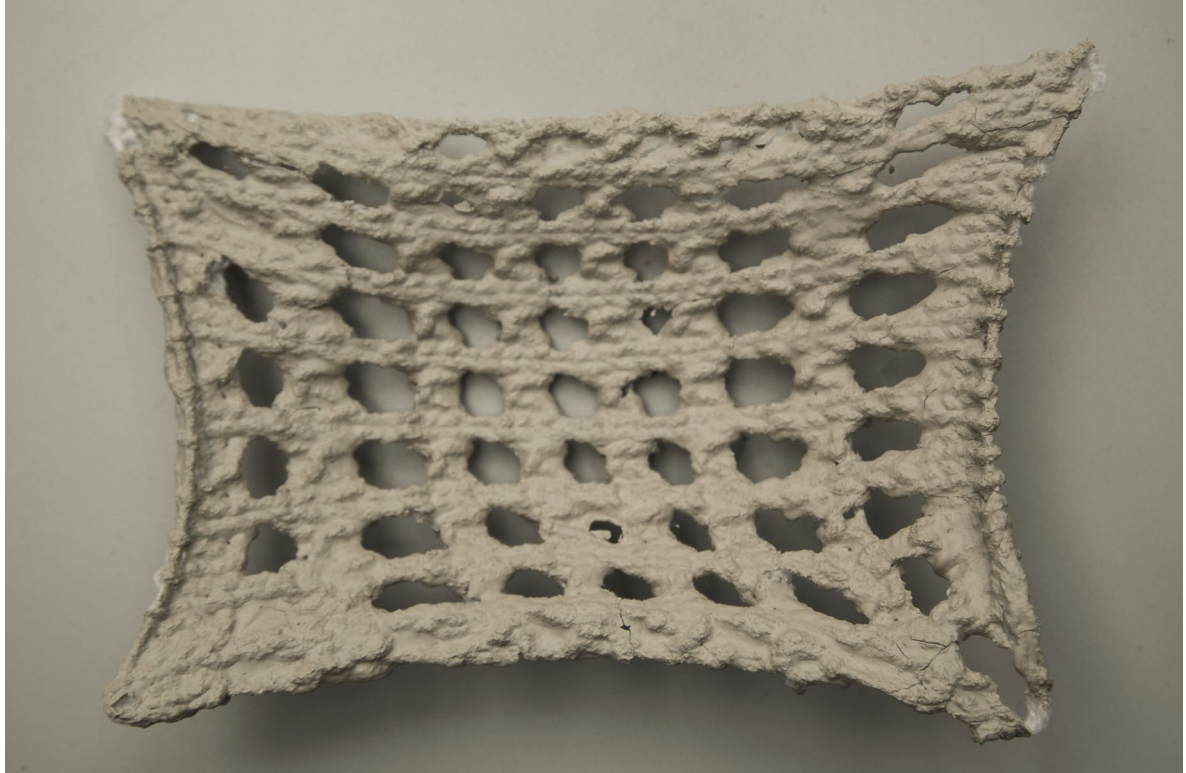




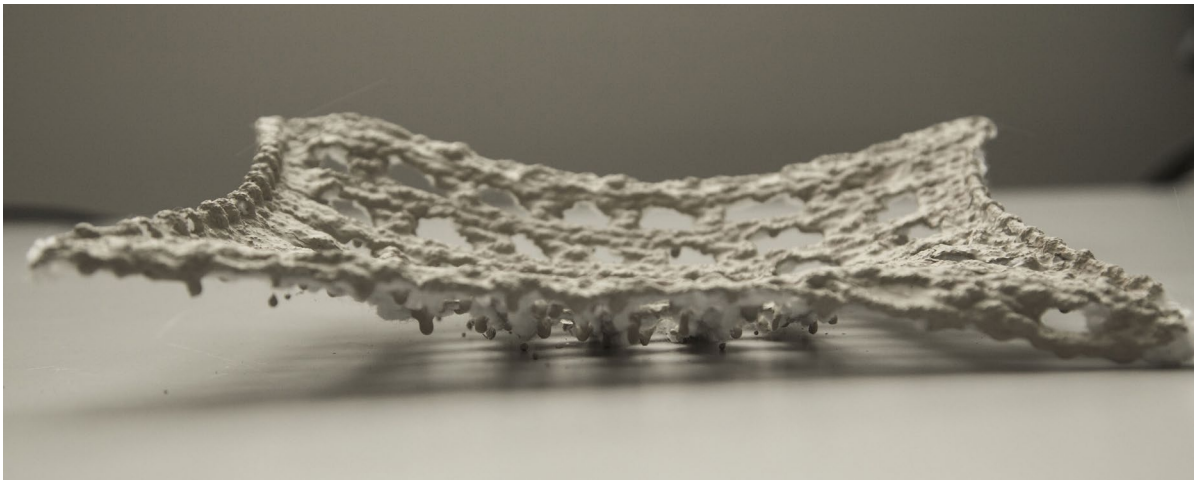
**Abb.91:** Ansicht Unterseite



**Abb.92:** Ansicht Seite



**Abb.94:** Ansicht Oberseite



**Abb.93:** Ansicht Vorne

### 2.3.2 Streichen

Hierbei wurde die TM2 Mischung verwendet.

Zum Streichen des Tons auf das Textil wurde ein 35mm Flachpinsel verwendet. Dieser wurde nach dem Umrühren in den Ton getaucht und das Textil anschließend bestrichen.

Das Streichen führte bei einer Probe während der Trocknungsphase zu Rissen im Ton. Dies könnte daran liegen das durch Streichen zu viel Ton auf einmal aufgetragen wird, somit trocknet der Ton an der Oberfläche schneller als darunter was zu Spannungen in der Aufgetragenen Schicht führt.

Es war jedoch schwer einen sauberen Randabschluss zu gewährleisten. Durch den Schichtauftrag entstehen Abstufungen am Rand (Abb.95).



Abb.95: Gestrichene Probe

### **2.3.3 Sprühen**

Die Tonmischung wurde mittels eines Drucksprühsystems aufgebracht, das aus einem Lufttank mit einem Betriebsdruck von 8-10 Bar und einer Spritzpistole besteht.

Hierbei wurden die Mischungen TM2-TM5 auf Ihre Viskosität überprüft. TM2 hat sich nicht geeignet, da es zu dickflüssig ist um durch die Sprühdüse zu gelangen. TM4 und TM5 waren wiederum zu dünnflüssig und führten keiner ausreichend stabilen Tonschicht. Es wurde deswegen die Mischung TM3 für alle gesprühten Experimente verwendet, da sich diese optimal Sprühen lässt.

Die Spühpistole besitzt zwei Regler : einer für den Luftdruck und einer für den Sprühkonus. Bessere Ergebnisse wurden erzielt wenn der Sprühkonus sehr weit eingestellt wurde. Somit wurde der Ton weit gestreut und wurde regelrecht auf das Textil „geschossen“. Bei kleinerem Konus tendierte der Ton, durch die Maschen durch zu fliegen.

Ein weiterer wichtiger Faktor war der verwendete Luftdruck: Bei zu hohem Luftdruck wurden die Maschen der gestrickten Proben durch den Luftstoß gedehnt und es blieb kein Ton haften. Bei zu niedrigem Druck konnte kein Ton herausgesprüht werden. Der optimale Luftdruck liegt bei ca 2,5 – 4 Bar. Der Abstand zwischen Sprühpistole und Textil wurde immer zwischen 4 bis 8 cm gehalten. Somit konnte eine gleichmäßige Spritzbreite gewährleistet werden. Die Sprühpistole wurde langsam über das Textil bewegt. Eine hohe Geschwindigkeit beim Bewegen der Pistole führt dazu, dass zu wenig Ton auf der Faser bleibt. Während langsames Bewegen zu viel Ton auf einer Stelle als Folge hat.





**Abb.96:** Zylinder gesprüht



**Abb.97:** Draufsicht





**Abb.98:** Innenansicht

Die ersten 2-3 Schichten wurden jeweils in 10 Minuten Abständen aufgetragen, da bei den ersten Schichten die Faser noch viel Keramik aufnimmt. Wichtig war es, diese ersten Schichten gleichmäßig aufzutragen und diese aushärten zu lassen. Die ersten Schichten sind immer noch leicht um nicht die Textilgeometrie zu stören und sorgen später für einen guten Untergrund für nachfolgende Schichten (Abb.96 - Abb.98). Nachdem eine stabile Tonstruktur entsteht können die nachfolgenden Schichten in zeitlich größeren Abständen aufgetragen werden. Es sollte nicht mehr allzu viel Material aufgesprüht werden, da der Ton sonst abtropfen beginnt. Für eine 3mm Schicht wurden ca 5 Schichten benötigt.

Weiters hat sich die Unterkonstruktion aus Finnplatte verbogen, sobald diese in Berührung mit Ton kam. Holzrahmen waren die bessere Wahl.

Schließlich war die Spannung des Textils ein wichtiger Faktor. Je gespannter die gestrickte Probe, desto weniger hatte das Gewicht von Ton eine Auswirkung auf die Geometrie einerseits und andererseits waren die Maschen durch mehr Spannung dem Luftdruck weitaus resistenter

Da der Sprühprozess eine hohe Präzision und Zuverlässigkeit bietet, war es beim Sprühen möglich, mehr Material (5 mm) auf Bereiche mit einer höheren strukturellen Belastung aufzutragen, während andere Teile leichter (2 mm) blieben (Abb.100 - Abb.101). Dies wäre durch manuelles Aufbringen von Material nicht möglich gewesen .



**Abb.99:** Draufsicht



**Abb.100:** Vorderseite



**Abb.101:** Rückseite

### 2.3.4 Temperaturbeständigkeit

Um ein langlebiges und wetterfestes Modul mit erhöhten strukturellen Eigenschaften zu bekommen, muss der Ton gebrannt werden.

Bestimmte Materialien haben unterschiedliche Verbrennungstemperaturen, abhängig von der Menge an Sauerstoff, die während des Brennvorgangs vorhanden ist, und dem Hersteller der Faser. Will man die Fasern später als mögliche Bewehrung im Bauelement behalten, müssen diese mindestens 800°C standhalten, ohne danach spröde zu werden, was zu einer verringerten Zugfestigkeit führen würde.

Wollgarne, Jutte und Kunststofffasern verbrennen bei diesen Temperaturen. Glasfasern halten bis zu 400°C stand, Basalt etwas über 800°C, Stahl hält Temperaturen bis zu 1300°C stand ohne zu Schmelzen verliert jedoch seine Festigkeit ab 400°C. Die Kohlenstofffaser hält unter Sauerstoffabschluss bis zu 3000°C aus, mit Sauerstoff erfolgt ab ca 400°C eine Oxidation, die zu Festigkeitsverlusten führt. (Footnote)

Infolgedessen musste untersucht werden, ob das Aufsprühen einer Tonbeschichtung zu einer höheren Wärmebeständigkeit aufgrund des Sauerstoffabschlusses durch Ton führte

Zu diesem Zweck wurden zwei gestrickte Proben hergestellt: eine ohne Beschichtung und die andere vollständig mit Ton beschichtet.

Ein wesentlicher Vorteil der Verwendung von gestrickten Maschen als Verstärkung besteht darin, dass ein einzelner Faden nicht elastisch sein muss, solange die gesamte Masche eine Bewegung zulässt, während der Ton während seines Trocknungs- und Brennprozesses schrumpft. Somit ist der gleich Elastizitätsmodul beider Material nicht von großer Bedeutung.

### 2.3.5 Brennvorgang

Die Proben wurden im Nabertherm Toplader 60 / R gebrannt (Abb.1023). Um ideale Materialeigenschaften zu erzielen, sollte der Brennvorgang nach Angaben der Firma Laufen nach 11 Stunden Vorheizen bei einer Spitztemperatur von 1250°C durchgeführt werden.

Um jedoch ein Sintern des Materials zu erreichen, ist eine Temperatur von 800 ° C ausreichend. Ziel war es, die Temperatur und die Brenndauer so niedrig wie möglich zu halten, um eine Beschädigung oder Schwächung der Faser zu vermeiden. Temperaturen unter 800 ° C würden die Bildung einer wetterfesten Oberfläche nicht garantieren.

Um die Qualität der Fäden nach dem Brennen zu beobachten, wurde ein Lichtmikroskop Olympus SZX16 verwendet, um ungebrannte und gebrannte Fäden zu vergleichen. Es wurde kein sichtbarer Unterschied zwischen tonbeschichteten und unbeschichteten Fäden festgestellt, was darauf hinweist, dass eine Tonbeschichtung Sauerstoff nicht ausreichend zurückhalten kann.

Tests haben gezeigt, dass leicht entflammbare Fäden Hohlräume erzeugen (Abb.105), die später mit einem anderen Verstärkungsmaterial gefüllt werden können, während Materialien wie Glasfasern beim Brennen bei 1250 ° C in der Keramik schmelzen und eine feste Füllung bilden (Abb.112). Edelstahlfäden führten aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnung der Materialien zu einem gleichmäßigen Rissmuster in der gesamten Testprobe (Abb.113).

Weiterhin wurden die Fäden spröde. Einzig die Basaltkordel zeigt bei 800°C unbedeutende Änderungen; jedoch veränderte das Brennen der Basaltfaser bei 1250°C ihre Eigenschaften drastisch (Abb.107).



**Abb.102:** Gesprühte Proben



**Abb.103:** Brennofen





**Abb.104:** Karbonkordel



**Abb.105:** Bruchbild Karbonkordel



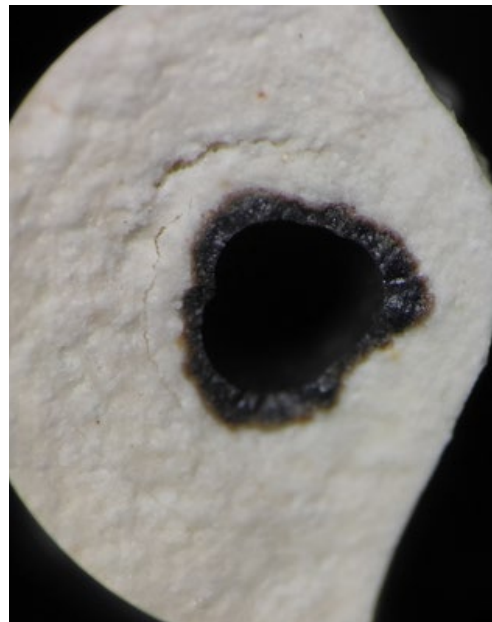
**Abb.106:** Mikroskopaufnahme Karbonkordel



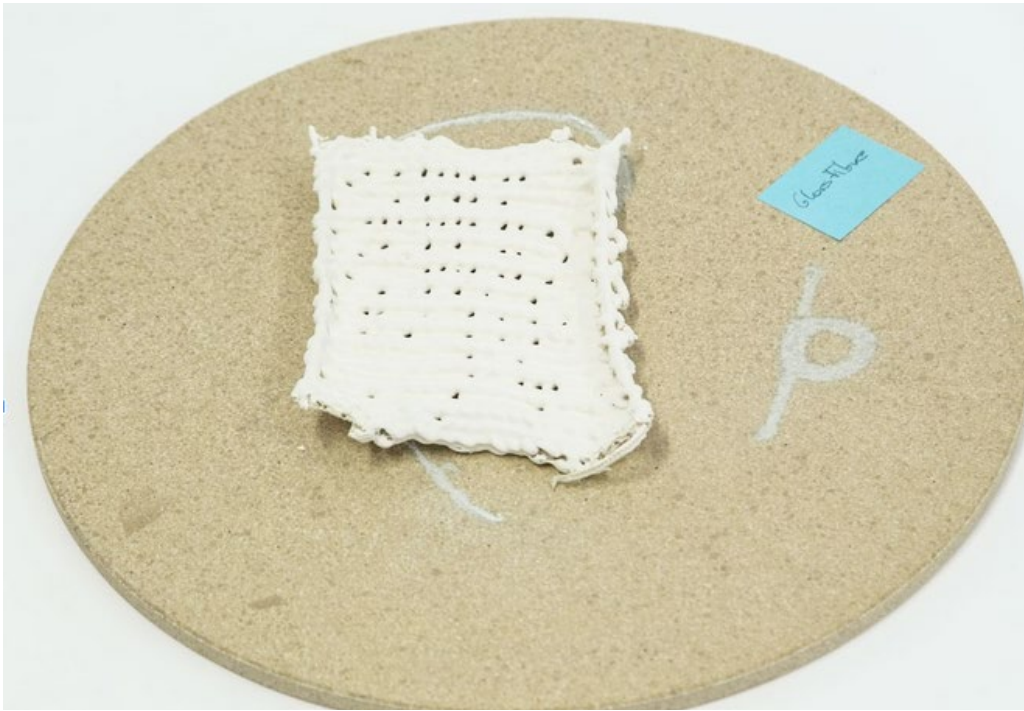
**Abb.107:** Basaltkordel



**Abb.108:** Bruchbild Basaltkordel



**Abb.109:** Mikroskopaufnahme Basaltkordel



**Abb.110:** Glaskordel



**Abb.111:** Bruchbild Glaskordel



**Abb.112:** Mikroskopaufnahme Glaskordel





**Abb.113:** Stahlkordel



**Abb.114:** Bruchbild Stahlkordel



**Abb.115:** Mikroskopaufnahme Stahlkordel



*PROTOTYP*

---



### 3.1 DESIGNPARAMETER

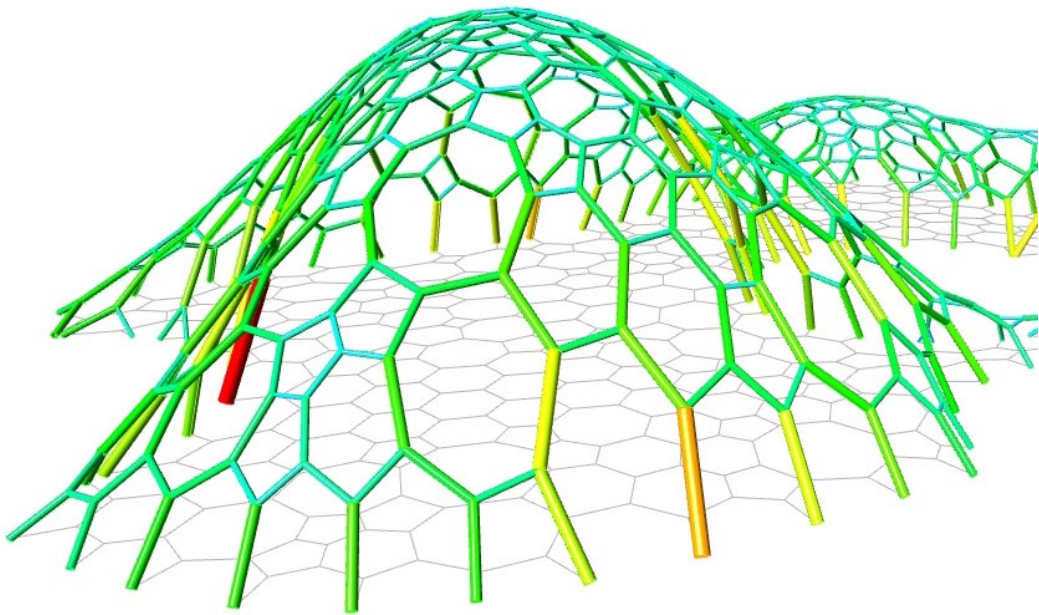
Das entwickelte Bauprinzip hat das Potenzial beim Bau von Freiformstrukturen im großen Maßstab verwendet zu werden; genauer gesagt kann es für Schalen und Gitterschalen verwendet werden. Eine Gitterschale wird aufgrund der Fähigkeit der Keramik, Druckkräfte aufzunehmen, als das am besten geeignete Konstruktionssystem angesehen, das das Überspannen großer Stellflächen ermöglicht. Ihre Steifheit ergibt sich aus der Verwendung von hohlen, dünn beschichteten Elementen. Somit wurde nach einem Pavilliondesign, welches im Großen Maßstab hergestellt werden kann, gesucht, das aus hohlen Stäben und rein unter Druckbelastung funktioniert.

Um eine Gridshell zu entwerfen, musste eine rechnerische Formfindung durchgeführt werden. Zu diesem Zweck sind viele Methoden anwendbar wie beispielsweise die „linear constrained force density method“<sup>47</sup>, die unter Anwendung einer tension-compression analogy verwendet werden kann (Abb.116).

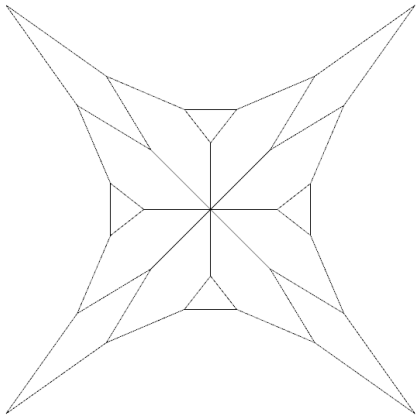
---

47 Vgl. Samec, 2019, 2-4

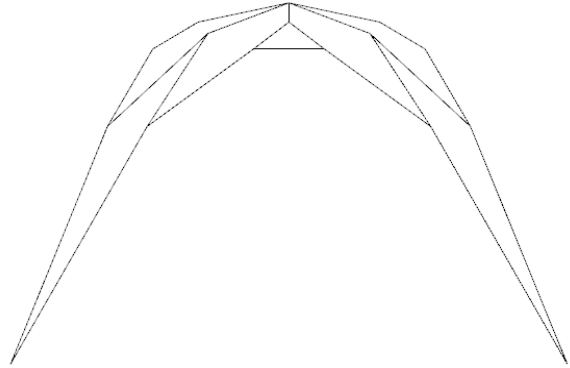
Diese Analogie setzt das Vorhandensein einer Scharnierverbindung zwischen den Stäben voraus, die ihre Selbstpositionierung in die Gleichgewichtsposition unter der zugewiesenen Last ihres Gewichts ermöglicht (d. H. Eine hängende Position ergibt sich aufgrund von Nur-Zug-Kräften). Sobald eine zufriedenstellende Geometrie gefunden wurde (diese kann manipuliert werden, um eine bestimmte Stablänge oder Schnittkräfte zu erreichen), werden die Verbindungen zwischen den Stangen in einer festen Position gehalten. Das Modell wird dann auf den Kopf gestellt, um eine reine Komprimierungsstruktur zu bilden.



**Abb.116:** Gridshell



**Abb.117:** Draufsicht

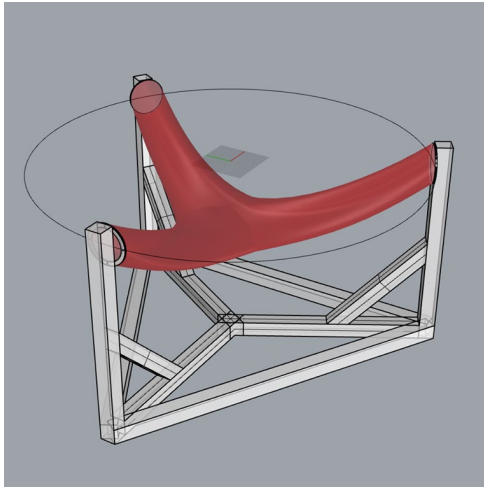


**Abb.118:** Ansicht

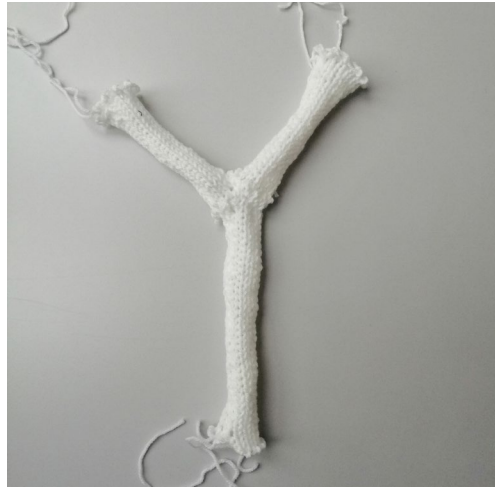


**Abb.119:** Pavillion Geometrie

Es wurde ein Design gewählt, bei dem sich im Allgemeinen maximal 3 Stäbe in einem Knoten treffen (Abb.117 - Abb.119). Es hat sich in Versuchen gezeigt, dass ein Stricken von einzelnen Stäben und das darauf folgende Zusammennähen der Stäbe zu einer unregelmäßigen Textilstruktur führt (Abb.121). Es macht mehr Sinn die Stäbe mittig zu teilen und die Knoten, die aus den Stäben entstehen, zu stricken. Dadurch ergeben sich 3 armige Module, die individuell angepasst werden können (Abb.120).



**Abb.120:** Knotenentwurf mit Unterkonstruktion



**Abb.121:** Maschinell gestrickter Knoten



**Abb.122:** Handgestrickter Knoten Ø 10cm



**Abb.123:** Handgestrickte Knoten Ø 50cm

Daraus folgt, dass eine ordnungsgemäße Verbindung, an den Stellen wo sich die geteilten Stäbe treffen, sichergestellt werden muss.

Das Modul kann mit gleichem Modul kombiniert werden, so dass ein modularer Vorfertigungsprozess insgesamt durchgeführt werden kann. Um das architektonische Potenzial der entwickelten Methode aufzuzeigen, wurde ein beispielhaftes Modul mit einem Durchmesser von 100 cm und drei sich kreuzenden Stäben hergestellt

In zukünftigen Großanwendungen wird die Geometrie des Moduls während der Konstruktion geändert, um der, durch die rechnerische Formfindung definierten, zu entsprechen.

### 3.2 KONSTRUKTION

Bevor das 100cm Modul gebaut wurde, wurden kleine Strickproben hergestellt um ein besseres Verständnis für den Knoten und die Stricktechnik zu bekommen (Abb.122) (Abb.123).

Der 1:1 gestrickte Knoten wurde manuell unter Verwendung von ca 150m Wollegarn hergestellt (Abb.124). Der Strumpfstich wurde als Muster aus vorigen Versuchen übernommen. Für die dreieckigen Flächen in der Mitte vom Knoten wurden größere Abstände zwischen den Maschen gewählt um ein gleichmäßiges Ausdehnen in alle Richtungen zu ermöglichen.

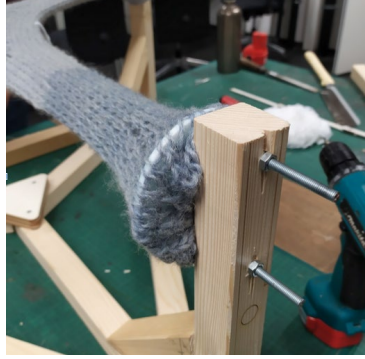
Um die gestrickte Maschenstruktur vor dem Sprühen festzuklemmen, wurde ein Holzrahmen gebaut (Abb.125). Die tragende Struktur ermöglichte es, das Netz auf kontrollierte Weise zu dehnen, um die Geometrie im Voraus zu definieren (Abb.126)



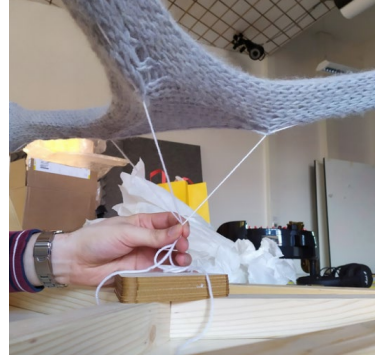
**Abb.124:** Handgestrickte Knoten Ø 100cm



**Abb.125:** Unterkonstruktion



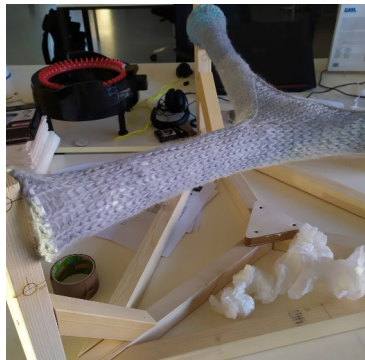
**Abb.126:** Anschlussverbindung



**Abb.127:** Garn zum Spannen



**Abb.128:** Füllmaterial Acrylscheibe



**Abb.129:** Füllmaterial Zeichenpapier



**Abb.130:** Erste gesprühte Schicht



**Abb.131:** Vierte gesprühte Schicht



**Abb.132:** Fertiges Modul



Computergestützte Formfindung wird durchgeführt, um ein Biegen zu vermeiden. An den Knoten können jedoch kleine Restmomente auftreten.

Daher muss sichergestellt werden, dass der Querschnitt des Knotens hoch genug war, um die Bildung eines Scharniers zu verhindern, das möglicherweise zu einem strukturellen Versagen führen könnte. Zusätzliche steife Elemente waren erforderlich, um sicherzustellen, dass der Querschnitt im Schnittbereich ausreichend hoch war, und um sicherzustellen, dass das gestrickte Netz unter ausreichender Spannung über die Stangen gespannt wurde, um zu verhindern, dass das Material unter der Last von nassem Ton durchhängt. Zusätzlich wurden verschiedene Füllmaterialien wie Styropor und Acrylscheiben getestet, um eine rohrartige Geometrie aufrechtzuerhalten (Abb.127 - Abb.129).

Die Geometrie der dreieckigen Schnittfläche wurde durch kreisförmige Elemente aus Acrylglas definiert. Diese Elemente wurden innerhalb des Netzes platziert und nahe genug beieinander, um zu verhindern, dass das Netz unter dem Gewicht des aufgetragenen Tons im zentralen Bereich durchhängt.

Die gleichen Elemente wurden an den Enden der Stangen platziert, um eine genaue Geometrie am Verbinder sicherzustellen. Durch Lösen oder Festziehen der unteren oder oberen Schrauben, mit denen die äußeren Acrylglasstücke befestigt sind, kann der Winkel auf jeder Seite individuell an die Positionen der benachbarten Module angepasst werden.

Auf diese Weise wäre es möglich, die in der rechnerischen Formfindung definierte Geometrie in einer zukünftigen Anwendung zu berücksichtigen.



**Abb.133:** Oberflächen Detail



*FAZIT*

---

## 4.1 VORTEILE

Das Stricken einer Schalung ermöglicht die Verwendung von nicht elastischen Fäden als elastisches Netz. Je nach Maßstab und Einsatzgebiet können unterschiedliche Fasermaterialien gestrickt werden, um ein breites geometrisches Spektrum an Bauteilen weiterzuentwickeln. Herkömmliche Schalungssysteme erfordern umfangreiche Fräsarbeiten um gekrümmte Flächen zu erzeugen. Im Gegensatz dazu können flexible Membranen oder Stoffe leicht in komplexe Geometrien geformt werden. Darüberhinaus können gestrickte Textilien direkt in dreidimensionale Formen gestrickt werden. Dies kann entweder von Hand oder mit halbautomatischen oder vollautomatischen Strickmaschinen erfolgen. Die Herstellung von Textilien im Industrieverfahren (voll automatisierte Strickmaschinen) ist sehr gut entwickelt und bietet eine schnelle und präzise Herstellung von komplexen Geometrien an.

Durch die Verwendung temperaturbeständiger Fasermaterialien kann das gestrickte Netz die Struktur nach dem Brennen der Elemente verstärken. Daher wurden Basaltfasern für diese Forschung ausgewählt. Wenn gewünscht könnten die Hohlräume befüllt werden.

Das Sprühen bietet eine Alternative zu herkömmlichen Keramikformungsverfahren wie Extrudieren, Pressen, Gießen oder Eintauchen.

Da das Modul während des Sprüh- und Trocknungsprozesses in seiner Position fixiert wurde, verformte das Schrumpfen nicht die Gesamtgeometrie und -abmessungen. Daher war eine hochpräzise Produktionstoleranz ohne Nachbearbeitungsschritte möglich.

Im Gegensatz zu Materialien, die in der Betonindustrie verwendet werden, können die in diesem Prozess verwendeten überschüssigen Materialien gelagert und wiederverwendet werden.

Vor dem Brennen kann das Material auch mit Wasser vom Netz abgewaschen und wiederverwendet werden.

Gestricktes Textil ist von Natur aus leichter als herkömmliche Schalungen. Sie sind leicht, kompakt und leicht zu transportieren. Die Auswirkungen einer leichteren Form beschränken sich nicht nur auf den Transport, sondern auch auf das Gerüst oder die vorübergehende Unterstützung. Leichtere Formen bedeuten leichtere Stützen, was für weniger Materialverbrauch sorgt.



## 4.2 NACHTEILE

Das manuelle Strickverfahren ist jedoch ein sehr arbeitsintensiver Prozess, der von einem Fachmann durchgeführt werden muss. Darüber hinaus zeigen die Studienergebnisse, dass nicht alle Fasermaterialien zum manuellen Stricken geeignet sind.

Derzeit besteht die größte Einschränkung darin, die zum Sprühen und Trocknen erforderlichen Zeiten sowie die Verfügbarkeit von Öfen mit geeigneten Abmessungen zu koordinieren.

Formen die unter Zugbeanspruchung geformt werden sind gut für Hohlprofile geeignet. Um die Geometrie während des Sprühvorganges zu erhalten ist eine ausreichende Spannung notwendig. Möchte man jedoch gerade und kantige Flächen muss mehr Spannung vorhanden sein, was zu größeren Unterkonstruktionen führt, was nicht mehr kostengünstig ist. Das Verhalten gestrickter Systeme ist schwieriger vorherzusagen als bei herkömmlichen starren Schalungen. Um eine gewollte Geometrie zu erreichen sollte man eine gute Kontrolle über das Spannen und die verwendete Faser haben. Simulationen und Vorhersagen wurden bisher nicht eingesetzt sind aber notwendig für die genaue Konstruktion flexibler Strukturen für architektonische Anwendungen.

Während das Stricken verschiedene Möglichkeiten in Bezug auf die Geometrie und Herstellung bietet, ist dessen Größe durch die der produzierenden Maschine begrenzt. Abhängig vom gewählten Maßstab kann es dennoch vorkommen, dass das Textil in mehreren Stücken produziert werden muss.

## 4.3 AUSSICHTEN

Während dieser Studie wurden zusätzliche Forschungsrichtungen und Fragen identifiziert.

Der nächste Schritt besteht darin, eine automatische Strickmaschine Brother Electroknit KH-930 in den Workflow einzuführen. Dies ermöglicht eine genauere Steuerung des Prozesses und stellt die Wiederholbarkeit beim Erstellen von Netzstrukturen sicher. Die Einbeziehung dieser Maschine ermöglicht eine größere Auswahl an Strickmustern, die unterschiedliche Verhaltensweisen erzielen können, sobald das Netz geklemmt und gedehnt wird.

Unterschiedliche Strickmuster innerhalb einer Geometrie sind eine Möglichkeit, die ebenfalls näher untersucht werden muss. Sobald der Prozess vollständig automatisiert ist, kann ein 1:1-Modell einer pavillonartigen Struktur erstellt werden, die aus einer Vielzahl verschiedener Module besteht.

Daher ist auch eine Neugestaltung des Stützrahmens geplant. Ein kreisförmiger Aluminiumrahmen ermöglicht die Verwendung einer größeren Anzahl von Stangen, die in beliebigen Winkeln positioniert sind. Die Erstellung dieses Prototyp-Modells kann den Weg ebnen, diese Produktionsmethode als wettbewerbsfähige Methode für die Erstellung anderer Gitterschalenkonstruktionen zu verwenden, beispielsweise für die Konstruktion von Leichtstahlelementen vor Ort.

Ein weiteres Potenzial, das sich aus dieser Forschung ergibt, besteht darin, ungebrannten Ton mit der in diesem Artikel beschriebenen Methode zu formen und als Schalung zum Gießen von Beton zu verwenden. Sobald der Beton hydratisiert ist, kann die Verbundschalung durch Abwaschen des Tons mit Wasser entfernt werden.



# ANHANG

## 5.1 REFERENZEN

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

Cherif, Chokri : Textile materials for lightweight constructions, Berlin, 2016

Chudley, Roy : Advanced construction technology, Harlow, 2012

Fangueiro, Raul: Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications, Minho, Portugal, 2011

Garrison, Elena : The Graphic Standards Guide to Architectural Finishes, New Jersey, 2002

Popescu, Adriana : KnitCrete: stay-in-place knitted formwork for complex concrete structures, Delft University of Technologie, 2019

Rhodes, Daniel : Clay and Glazes for the Potter, Chilton, 1957

Spencer, David : An introduction to textile technology', Knitting Technology, Cambridge, 2001

Stark, Jochen : Zement und Kalk: Der Baustoff als Werkstoff, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, Springer Basel AG, 2000

Werner Nachtigall, Göran Pohl: Bau-Bionik : Natur - Analogien - Technik, Springer Vieweg, 2013

## 5.2 FORSCHUNGSARBEITEN

Alajarmeh, Omar, Manalo, Allan : Hollow concrete columns: Review of structural behavior and new designs using GFRP reinforcement, in Engineering Structures (2020), H. 203. 43-60

Bechthold, Martin, King, Nathan/Kane, Anthony : Robotic Tile Placement : Tools, Technique and Feasibility  
in 29th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, (2012)

Bravo, Maite, Stephanie Chaltiel, Wilfredo Carazas : Matter-Robotic Calibration for Bio Shotcrete  
in Temes de disseny (2018) H.34 80-91.

Brennan, Julie, Walker, Peter: The potential of advanced textiles for fabric formwork  
in Proceedings of the ICE - Construction Materials (2013) H.4, 229–237.

Cabedo Monica : Metal Fibre-Reinforced Ceramic Materials, Qualicer (2016), Castellón

Cauberg, Niki, Tysmans, Tine : Shell elements of textile reinforced concrete using fabric formwork  
in Advances in Structural Engineering (2012) H. 15. 677–689.

Gaudillière, Nadja, Dirrenberger, Jana : Building applications using lost formworks obtained through large-scale additive manufacturing of ultra-highperformance concrete

Hack, Norman, Lauer, Willy, : Overcoming repetition: Robotic fabrication processes at a large scale  
in International Journal of Architectural Computing (2013) H. 3. 285–299

Ibell, Tim, Hawkins, Will : Flexible Formwork technologies : A state of art review  
in Article structural concrete (2016) H.17. 85-132

Ishmael, Natalie, Fernando, Anura/Andrew, Sonja : Textile technologies for the



manufacture of three-dimensional textile preforms  
in *Research Journal of Textile and Apparel* (2017) H.21. 342–362.

Oldfather, William: A note of the Etymology of the word Ceramic.  
in *Journal of the American Ceramic Society* (1920), H. 7. 537-542

Seibold, Zach/Mesa, Olga/ Stavric, Milena/ Bechthold, Martin : Ceramic Tectonics :  
Tile Grid Shell

in Conference : IASS Symposium 2018, Creativity in Structural Design, MIT Boston,  
(2018) pp 1-8

Solly, James, Menges, Achim : Icd/itke research pavilion 2016/2017: Integrative  
design of a composite lattice cantilever,

in *Proceedings of the IASS Symposium Creativity in Structural Design*, International  
Association for Shell and Spatial Structures (2018), pp. 1–8.

Samec, Elisabetha : An Extended Linear Procedure for Constrained Form Finding,  
Conference Paper (2019) 1-13

## 5.3 ANDERE QUELLEN

ADAPA

<https://adapa.dk> (11.11.2020)

CASAL GRANDE

<https://www.casalgrandepadana.de/de/>(25.03.2021)

CERAMIC ARCHITECTURES

<https://www.ceramicarchitectures.com>

CHEMIE LEXIKON

<https://www.chemie.de/lexikon/Keramik.html> (15.01.2021)

CUMELLA

<http://www.cumella.cat/portfolio/oceanario-campos-costa/>

FORMFOUNDDESIGN

<https://www.formfounddesign.com/fabric-forms> (12.1.2021)

IAM TU GRAZ

<https://iam.tugraz.at/shapelab/>(27.02.2021)

PERFORM TECHNOLOGIES LTD

<https://www.preform.net/news> (20.10.2020)

SOLIDIAN

<https://www.solidian.com>(15.09.2020)

STUDIO ODILE DECQ

<http://www.odiledecq.com>(31.03.2021)

TU GRAZ

[https://www.tugraz.at/fileadmin/user\\_upload/tugrazExternal/f1f34b8a-f09d-427d-aa86-965883a19682/Forschungsprojekte/Ceramic\\_Shell\\_Shelter/St.\\_Martin\\_C\\_Shell\\_2.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazExternal/f1f34b8a-f09d-427d-aa86-965883a19682/Forschungsprojekte/Ceramic_Shell_Shelter/St._Martin_C_Shell_2.pdf)

UNIVERSITÄT STUTTGART

<https://www.sfb1244.uni-stuttgart.de/projekte/a-entwurfs-und-planungsmethodik/a04-optimierung#id-c6a36fab-2>(03.03.2021)

## **5.4 AUDIOVISUELLE QUELLEN**

Timellini, Giorgio : Vortrag auf Architectural Ceramics in 21th Century  
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 23.März 2014.

## 5.5 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb.1 : Heydar Aliyev Center, Baku, Zaha Hadid Architects 2012

<https://www.behance.net/gallery/35448357/Baku-Cultural-Center-by-Zaha-Hadid>

Abb.2 : Taichung Opernhaus, Taichung, Toyo Ito and Associates 2016

<https://www.archdaily.com/796428/toyo-itos-taichung-metropolitan-opera-house-photographed-by-lucas-k-doolan/57ee6c97e58ece3d82000184-toyo-itos-taichung-metropolitan-opera-house-photographed-by-lucas-k-doolan-photo>

Abb.3 : Kilcherschale, Recherswil, Heinz Isler 1965

<https://elarafritzenwalden.tumblr.com/post/137902810256/former-kilcher-sa-factory-recherswil-solothurn>

Abb.4 : Los Manantiales Restaurant, Xochimilco, Félix Candela, 1958

<https://www.flickr.com/photos/gallery400/25121207268>

Abb.5 : La Zarzuela Rennstrecke, Madrid, Spain, Eduardo Torroja 1930

<https://andgatherer.tumblr.com/post/66388258937/nmprv-eduardo-torroja-zarzuela-racetrack>

Abb. 6 : Palazzetto dello Sport, Rome, Pier Luigi Nervi, 1957

<https://www.ce.jhu.edu/perspectives/protected/ids/Buildings/Little%20Sports%20Palace/1.jpg>

Abb.7 : Venus von Dolni Vestonice, Mähren, 1925

[https://de.wikipedia.org/wiki/Venus\\_von\\_Doln%C3%AD\\_V%C4%Bstovice#/media/Datei:Vestonicka\\_venuse\\_edit.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Venus_von_Doln%C3%AD_V%C4%Bstovice#/media/Datei:Vestonicka_venuse_edit.jpg)

Abb. 8 : Rohmaterial Ton

<https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/RockData?rock=Ton>

Abb.9 : Trockenpressverfahren

<https://www.sanier.de/bodenbelag/keramische-bodenbelaege>

Abb. 10 : Ziegelproduktion im Strangpressverfahren

[https://architektenordner.backstein.com/de/1-baustoffkunde/1-2-1-herstellung\\_5\\_116.html](https://architektenordner.backstein.com/de/1-baustoffkunde/1-2-1-herstellung_5_116.html)

Abb. 11 : Fliesenherstellung im Schneiderverfahren

<https://i.ytimg.com/vi/ON-Sw-2YHgk/maxresdefault.jpg>

Abb. 12 : Feuchtpressverfahren

[https://d2wg98g6yh9seo.cloudfront.net/users/288690/288690\\_foYizoTigigogumi8796895331386933.png](https://d2wg98g6yh9seo.cloudfront.net/users/288690/288690_foYizoTigigogumi8796895331386933.png)

Abb. 13 : Schlickergussverfahren

<http://docplayer.org/docs-images/92/110420413/images/6-1.jpg>

Abb. 14 : Sanitärkeramik

[https://sacmi.com/sacmicorporate/media/ceramics/news/2011/634315670755202500\\_1.jpg](https://sacmi.com/sacmicorporate/media/ceramics/news/2011/634315670755202500_1.jpg)

Abb. 15 : Töpferscheibe

[https://i.ebayimg.com/00/s/MTAyNFg2ODM=/z/JWQAAOSw9Gdccc0X/\\$\\_59.JPG](https://i.ebayimg.com/00/s/MTAyNFg2ODM=/z/JWQAAOSw9Gdccc0X/$_59.JPG)

Abb. 16 : Beispiel eines kleinen Brennofens

<https://webimg.secondhandapp.com/1.1/59079914420e8d40fb7978ee>

Abb. 17 : Mosaikfliese im Bad

[https://www.wk-fliesen.de/media/de/fliesen/fliesenformate/mosaikfliesen/mosaikfliesen\\_10.jpg](https://www.wk-fliesen.de/media/de/fliesen/fliesenformate/mosaikfliesen/mosaikfliesen_10.jpg)

Abb. 18: Große Fliese

[https://images02.wohnet.net/Metal\\_CORTEN\\_100x300\\_low.jpg/wnn\\_socialmedia/4.343.526](https://images02.wohnet.net/Metal_CORTEN_100x300_low.jpg/wnn_socialmedia/4.343.526)

Abb. 19 : Beispiel für Hohlboden

[https://www.hg-fussbodensysteme.de/wp-content/uploads/2020/05/04\\_Trockenhohlboden-HQ\\_g.jpg](https://www.hg-fussbodensysteme.de/wp-content/uploads/2020/05/04_Trockenhohlboden-HQ_g.jpg)

Abb. 20 : Sanitärkeramik

<https://www.idfmoebel.de/bilder/wc-und-bidet/oval-wall-wc-bidet-badezimmerarmaturen-set-3.jpg>

Abb.21 : Waschbecken von Laufen

[https://www.neuesbad.de/media/image/d2/4c/0f/LAH8103020001041\\_600x600.jpg](https://www.neuesbad.de/media/image/d2/4c/0f/LAH8103020001041_600x600.jpg)

Abb. 22 : Verbundfassade

[https://www.baunetzwissen.de/imgs/1/0/3/6/6/4/7/WDVS\\_Zeichnung-c8c88bfd79555d1e.jpg](https://www.baunetzwissen.de/imgs/1/0/3/6/6/4/7/WDVS_Zeichnung-c8c88bfd79555d1e.jpg)

Abb. 23 : Hinterlüftete Fassade

[https://img.archiexpo.de/images\\_ae/photo-mg/167405-16182760.jpg](https://img.archiexpo.de/images_ae/photo-mg/167405-16182760.jpg)

Abb. 24 : Beispiele für Dachziegel

[https://ziegel.de/sites/default/files/2018-10/Dachziegelarten%20III\\_1.jpg](https://ziegel.de/sites/default/files/2018-10/Dachziegelarten%20III_1.jpg)

Abb. 25 : Dachziegel Montage

[https://www.baustoffwissen.de/wp-content/uploads/fachwissen/bilder/2013/NordBau-mit-Madura-Abb\\_05.jpg](https://www.baustoffwissen.de/wp-content/uploads/fachwissen/bilder/2013/NordBau-mit-Madura-Abb_05.jpg)

Abb. 26 : Gefräste Schalung in Herstellung

Photo von Julian Jauk

Abb. 27 : Fertige Schalung

Photo von Julian Jauk

Abb. 28 : Adapa D300

<https://adapa.dk/wp-content/uploads/2020/08/Adaptive-Mould-Turtle-D200-end-2.jpg>

Abb. 29 : Prinzip rekonfigurierbarer Schalung

<https://www.semanticscholar.org/paper/Smart-Dynamic-Casting%3A-Slipforming-with-Flexible-Fritschi-Reiter/f2a26dd3b1d65bcff6c14f15e9f4a2dfac4fc73c/figure/1>

<https://www.semanticscholar.org/paper/ADAPTIVE-CONTROL-SYSTEM-FOR-SMART-DYNAMIC-CASTING-Scotto-Fritschi/295266f017dd28d0f3ba8eb2a761ee9ff4b5b1ad/figure/2>

Abb. 30 : XtreeE 3D gedruckte Stützte, Marseille, 2015

[https://images.adsttc.com/media/images/58b4/7923/e58e/ced7/8400/0045/slideshow/XtreeE\\_Poteau\\_Aix\\_%C2%A9\\_Lisa\\_Ricciotti\\_W\\_11.jpg?1488222463](https://images.adsttc.com/media/images/58b4/7923/e58e/ced7/8400/0045/slideshow/XtreeE_Poteau_Aix_%C2%A9_Lisa_Ricciotti_W_11.jpg?1488222463)

[https://images.adsttc.com/media/images/58b4/7941/e58e/ced7/8400/0047/slideshow/XtreeE\\_Poteau\\_Aix\\_W\\_4.jpg?1488222521](https://images.adsttc.com/media/images/58b4/7941/e58e/ced7/8400/0047/slideshow/XtreeE_Poteau_Aix_W_4.jpg?1488222521)

Abb. 31 : Betondecke Dfab-House, Dübendorf, 2019

[https://dfabhouse.ch/wp\\_live/wp-content/uploads/2017/10/smart-slab-slider-03.jpg](https://dfabhouse.ch/wp_live/wp-content/uploads/2017/10/smart-slab-slider-03.jpg)

Abb. 32 : Meshmould + Dfab-House Mauer

[https://www.architektur-online.com/wp-content/uploads/2016/11/Beton\\_-1.jpg](https://www.architektur-online.com/wp-content/uploads/2016/11/Beton_-1.jpg)

[https://live.staticflickr.com/4244/35476532581\\_b7cc8f5771\\_b.jpg](https://live.staticflickr.com/4244/35476532581_b7cc8f5771_b.jpg)

Abb. 33 : Beispiele von Mark West

[https://src.lafargeholcim-foundation.org/img/731a63da-6f8d-4105-a06f-814874562c30/h\(true\)/c\(738-1.3333333333333333-100-0-0\)/na05\\_00022\\_bearb\\_05.jpg](https://src.lafargeholcim-foundation.org/img/731a63da-6f8d-4105-a06f-814874562c30/h(true)/c(738-1.3333333333333333-100-0-0)/na05_00022_bearb_05.jpg)

<https://entreetre.org/images/Ee01/MarkWest20.jpg>

<https://fabricform.files.wordpress.com/2012/03/mark-west.jpg>

Abb. 34 : Nest Hilo Dachentwurf, Dübendorf, in Entwicklung

[https://block.arch.ethz.ch/brg/images/cache/hilo\\_exploded\\_diagrams\\_1603369424\\_960x540.png?1603369424](https://block.arch.ethz.ch/brg/images/cache/hilo_exploded_diagrams_1603369424_960x540.png?1603369424)

<https://img.nzz.ch/2017/10/5/ee3b27eb-fbde-469f-965b-b97dc2f9406d.jpg?width=560&fit=crop&quality=75&auto=webp>

Abb. 35 : Fabric Form

<https://www.formfounddesign.com/fabric-forms>

Abb. 36 : Webmuster (von links nach rechts) : Flechten, Weben, Stricken, Verbundstoff

Abbildung von Popescu

Abb. 37 : Beispiele räumlich gestrickter Textilien

<https://www.preform.net/news>

[https://3druck.com/wp-content/uploads/2016/01/3d\\_knitted\\_shoes\\_js\\_shoe\\_kickstarter1.jpg](https://3druck.com/wp-content/uploads/2016/01/3d_knitted_shoes_js_shoe_kickstarter1.jpg)

[https://3druck.com/wp-content/uploads/2016/12/ikea-ps-2017-matali-crasset-furniture-chair-design\\_dezeen\\_2364\\_col\\_3.jpg](https://3druck.com/wp-content/uploads/2016/12/ikea-ps-2017-matali-crasset-furniture-chair-design_dezeen_2364_col_3.jpg)

Abb. 38 : Spacerfabric in Beton

[https://block.arch.ethz.ch/brg/files/POPESCU\\_2016\\_IASS\\_complex-concrete-casting-knitting-stay-in-place-formwork\\_1545049665.pdf](https://block.arch.ethz.ch/brg/files/POPESCU_2016_IASS_complex-concrete-casting-knitting-stay-in-place-formwork_1545049665.pdf)



Abb. 39 : Hypar Concrete Shell, Aachen, Deutschland ud Concrete Shell, Chemnitz, Deutschland

[https://www.bft-international.com/imgs/103958366\\_84325cd35d.jpg](https://www.bft-international.com/imgs/103958366_84325cd35d.jpg)

[https://www.tu-chemnitz.de/tu/aktuelles/2016/1452515786\\_16\\_9.jpg](https://www.tu-chemnitz.de/tu/aktuelles/2016/1452515786_16_9.jpg)

Abb. 40 : Karbon und Glasfaser Pavillion, Stuttgart, 2013-2015

<https://www.abitare.it/en/research/studies/2015/08/24/achim-menges-and-the-experimental-pavilion-in-stuttgart/>

Abb. 41 : Bioshotcrete

<http://innochain.net/drone-center-barcelona-real-scale-test/>

Abb. 42 : Xinjin Zhi Museum, China, 2011

<https://inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2012/03/Xinjin-Zhi-Museum-Kengo-Kuma-and-Associates-3.jpg>

Abb. 43 : 3D\*1, Mailand, 2012

[https://www.odiledecq.com/projets/\\_trashed/](https://www.odiledecq.com/projets/_trashed/)

Abb. 44 : Ceramic Cloud, Regio Emilia, 2016

<https://www.casalgrandepadana.de/de/magazine/detail/casalgrande-padana-und-kengo-kuma-erbauen-die-casa/>

Abb. 45 : Ceramic Tectonic, Valencia, 2018

<https://tileofspainusa.com/ceramic-tectonics-exploring-the-structural-capabilities-of-thin-large-format-ceramic-tiles/>

Abb. 46 : Formfindungs Prozess

[https://www.researchgate.net/publication/326519039\\_Ceramic\\_Tectonics\\_Tile\\_Grid\\_Shell](https://www.researchgate.net/publication/326519039_Ceramic_Tectonics_Tile_Grid_Shell)

Abb. 47 : Villa Nurbs, Empuriabrava, 2006

<https://www.ceramicarchitectures.com/obras/villa-nurbs-house/>

Abb. 48 : Ceramic Shell, Cevisama, 2014

<https://www.ceramicarchitectures.com/blog/>

Abb. 49 : Robotic Tile Placement

[https://www.researchgate.net/publication/320389338\\_Robotic\\_Tile\\_Placement\\_Tools\\_Techniques\\_and\\_Feasibility](https://www.researchgate.net/publication/320389338_Robotic_Tile_Placement_Tools_Techniques_and_Feasibility)

Abb. 50 : Olivier van Herp Vasen

<https://cfileonline.org/wp-content/uploads/2014/09/printing-ceramics-1.jpg>

[https://www.cobosocial.com/wp-content/uploads/2017/12/26692306384-5fe27358b0-o\\_orig.jpg](https://www.cobosocial.com/wp-content/uploads/2017/12/26692306384-5fe27358b0-o_orig.jpg)

Abb. 51 : Saphirkeramik

<https://www.laufen.co.at/de/products/features-benefits/sanitary-ware/01-saphirkeramik#>

Abb 52 : Webmuster  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 53 : Strickmuster  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 54 : Hexagonmuster  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 55 : Addi Kingsize Express  
[https://issuu.com/knitectonics/docs/knitectonics\\_techniques\\_\\_experimentation](https://issuu.com/knitectonics/docs/knitectonics_techniques__experimentation)

Abb. 56 : Handstricken  
Photo durch Autor aufgenommen

Abb. 57 : Rundstricken/Flachstricken  
[https://issuu.com/knitectonics/docs/knitectonics\\_techniques\\_\\_experimentation](https://issuu.com/knitectonics/docs/knitectonics_techniques__experimentation)

Abb. 58 : Polyacryl 0,4g/m  
Photo durch Autor aufgenommen

Abb. 59 : Polyester 1,4g/m  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 60 : Baumwolle 0,3g/m  
Photo durh Autor aufgenommen

Abb. 61 : Juttegarn 3,3g/m  
Photo durch Autor aufgenommen

Abb. 62 : Karbonfaserkordel 0,004g/m  
Photo durch Autor aufgenommen

Abb. 63 : Basaltfaserkordel 0,002g/m  
Photo durch Autor aufgenommen

Abb. 64: Glasfaserkordel 0,0067g/m  
Photo durch Autor aufgenommen

Abb. 65: Stahlkordel 0,2g/m  
Photo durch Autor aufgenommen

Abb. 66: Polyacrylgarn in Grau  
Photo durch Autor aufgenommen

Abb. 67: Polyester  
Photo durch Autor aufgenommen

Abb. 68 : Baumwolle  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 69 : Karbonkordel  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 70 : Polyacryl Garn  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 71 : Karbonkordel  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 72 : Glasfaserkordel  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 73 : Basaltkordel  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 74 : Stahlkordel ist nicht verstrickbar  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 75 : Bei selber Garnlänge entstehen bei unterschiedlicher Garnspannung unterschiedliche Abmessungen  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 76 : Handgestrickte Maschenvariatio  
Photos von Autor aufgenommen

Abb. 77 : Mittelstück mit weiten Maschen  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 78 : Enge Maschen  
Photo von Autor aufgenomme

Abb. 79 : Strickplan  
Photo von Autor aufgenomme

Abb. 80 : Textilprobe  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 81 : Formprozess  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 82 : Fertige Form  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 83 : Textilprobe  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 84 : Formprozess  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 85 : Fertige Form  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 86 : Zylinderform mit Finnpappe innen  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 87 : Zylinderform gespannt zwischen zwei Platten aus Finnpappe  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 88 : Gerade gezogener Versuch  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 89 : TM1  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 90 : TM2  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 91 : Ansicht Unterseite  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 92 : Ansicht Seite  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 93 : Ansicht Oberseite  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 94 : Ansicht Vorne  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 95 : Gestrichene Probe  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 96 : Zylinder gesprüht  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 97 : Draufsicht  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 98 : Innenansicht  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 99 : Draufsicht  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 100 : Vorderseite  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 101 : Rückseite  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 102 : Gesprühte Probe  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 103 : Brennofen  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 104 : Karbonkordel  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 105 : Bruchbild Karbonkordel  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 106 : Mikroskopaufnahme Karbonkordel  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 107 : Basaltkordel  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 108 : Bruchbild Basaltkordel  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 109 : Mikroskopaufnahme Basaltkordel  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 110 : Glaskordel  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 111 : Bruchbild Glaskordel  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 112 : Mikroskopaufnahme Glaskordel  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 113 : Stahlkordel  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 114 : Bruchbild Stahlkordel  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 115 : Mikroskopaufnahme Stahlkordel  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 116 : Gridshell  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 117 : Draufsicht  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 118 : Ansicht  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 119 : Pavillion Geometrie  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 120 : Knotenentwurf mit Unterkonstruktion  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 121 : Maschinell gestrickter Knoten  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 122 : Handgestrickter Knoten Ø 10cm  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 123 : Handgestrickter Knoten Ø 50cm  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 124 : Handgestrickter Knoten Ø100cm  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 125 : Unterkonstruktion  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 126 : Anschlussverbindung  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 127 : Garn zum Spannen  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 128 : Füllmaterial Acrylscheibe  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 129 : Füllmaterial Zeichenpapier  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 130 : Erste gesprühte Schicht  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 131 : Vierte gesprühte Schicht  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 132 : Fertiges Modul  
Photo von Autor aufgenommen

Abb. 133 : Oberflächen Detail  
Photo von Autor aufgenommen



