





Dominik Schraml, BSc

## **Drucken mit Beton**

### **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Architektur

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

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

Institut für Tragwerksentwurf



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

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

---

Datum

---

Unterschrift

Drucken mit Beton

Mittlerweile werden nahezu alle unserer Gebrauchsgegenstände industriell gefertigt. Die Technik trieb aber nicht nur deren Entwicklung voran, sondern ließ auch die Möglichkeit nach persönlicher Individualisierung der Güter annähernd verschwinden.

Das Bauen stellt eine der letzten Bastionen für individuelle Entfaltungsmöglichkeiten in unserer Gesellschaft dar. Dazu steht jedem frei, die ihm zur Verfügung stehenden Komponenten eines Bauwerks, seien es Wände, Decken, Öffnungen, frei zu arrangieren und zu kombinieren. Diese Komponenten haben ihren kleinsten gemeinsamen Nenner in ihren industriell gefertigten Grundbausteinen. In diesen Modulen endet, in einem gewissen finanziellen Rahmen, die freie Individualisierung des angestrebten Produkts. Die Technologie des 3D-Drucks verschiebt diese Grenze der Gestaltungsfreiheit, indem sie diesen kleinsten gemeinsamen Nenner verkleinert und durch gedruckte Stränge ersetzt.

Additive Produktionsmethoden ermöglichen

die Herstellung von differenzierten Bauteilen in einem verhältnismäßig günstigen Kostenrahmen. Durch die effiziente Nutzung von Ressourcen bieten sie die Chance, Bauteile auf eine ökologische und ökonomische Art herzustellen. Die Technologie des Druckens mit Beton steckt dabei noch inmitten ihrer Entwicklungsphase. Diese Arbeit gibt einen Überblick auf die dem Fertigungsverfahren innewohnenden Möglichkeiten, sowie die dazu nötigen Mittel und dabei herrschenden Parameter, um einen Leitfaden zum Entwurf und Herstellung von plattenförmigen Bauteilen mittels Beton Drucks zu liefern.

Diese Arbeit basiert auf den gesammelten Erfahrungen in der Mitarbeit als Projektassistent, in dem von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG unterstützten COEBRO Projekt (Concrete Elements By Robots) an der technischen Universität Graz, unter der Betreuung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters.

Ausgehend von der im Projekt verwendeten und entwickelten Anlage, erörtert sie

deren Anforderungen als Grundlage für das Drucken von Betonteilen.

Im Folgenden zeigt sie die Parameter hinsichtlich der Herstellung und damit verbundenen Geometrieerzeugung des Verfahrens auf. Diese sollen weiterführend Anstoß für ein Entwerfen abseits der momentan gebräuchlichen Denkweisen geben und zum speziellen Denken in der Logik des 3D-Drucks hinführen. Zur systematischen Katalogisierung der Möglichkeiten wurden Musterstücke entworfen und gefertigt, welche einen Überblick hinsichtlich herstellbarer plattenförmiger Geometrien liefern.

Diese erarbeiteten Möglichkeiten wurden auf die exemplarische Anwendung der Fassade übertragen, für welche sich das Verfahren aufgrund im Vorfeld erarbeiteter Faktoren ausgezeichnet eignet. Hierfür wurden zwei Druckmuster entworfen und Prototypen hergestellt, die das Potential des Druckens mit Beton ausschöpfen und illustrieren, welche Geometrien ein Entwerfen in Strängen entstehen lässt.

<b>Beton additiv gefertigt</b>	<b>11</b>
3DCP	13
Contour Crafting	15
Concrete Printing	16
D-Shape	17
Minibuilders	18
Bewehrung	19
Mesh Mould	21
Mesh Mould Metal	22
Jammed Architectural Structures	23
Fußgängerbrücke	24
Fahrradbrücke	25
Betonkanu	26
<b>Die Anlage</b>	<b>27</b>
Roboter	33
Schaltisch	34
Mischerpumpe	35
Druckkopf	37
Beton	39
Bewehrung	40
Daten	41
Druckprozess	42
<b>Entwerfen in Strängen</b>	<b>43</b>
Approximation	47
Strangform	48
Positionierung	49
Druckpfade	50
Addition	51
Joints	52

Horizontal- & Vertikaldruck	53
Bewehrungsführung	55
Drucken mit variablem Strangquerschnitt	56
<b>Drucksamples</b>	<b>57</b>
Dreischichtige Ebene Platte	61
Reliefprint	65
Variierende Dicke	69
Rippen	73
Öffnung	77
Freidruck	81
Hinterschneidung	85
Gekrümmte Platte	89
<b>Anwendung auf die Fassade</b>	<b>93</b>
Welle	99
Hexagon	109
<b>Aussicht</b>	<b>119</b>
<b>Anhang</b>	<b>121</b>
Literaturverzeichnis	123
Abbildungsverzeichnis	125

Bild 1. Charakteristische Oberfläche eines mittels Betondruck gefertigten Bauteils



<sup>1</sup> COEBRO Bridge Antrag, 1.

<sup>2</sup> Ebda., 3.

<sup>3</sup> Ebda., 5.

<sup>4</sup> Vgl. Ebda., 16 f.

<sup>5</sup> Vgl. Ebda., 6.

*\*) Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Arbeit befinden sich die erwähnten Dissertationen noch in Bearbeitung, weshalb keine weiteren Verweise auf sie in dieser Arbeit zu finden sind.*

# COEBRO

-

## Additive Fabrication Of Concrete Elements By Robots

Diese Arbeit entstand im Rahmen des von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG unterstützten COEBRO Projektes.

„In dem grundlagennahen Forschungsprojekt COEBRO [...] soll durch ein interdisziplinäres Team aus Architekten, Bauingenieuren, Maschinenbauern und Materialtechnologen die Frage nach dem effektiven und ressourcenschonenden Umgang mit dem Werkstoff Beton unter Einsatz von 3D-Drucktechnik wissenschaftlich aufbereitet werden. Die Industriepartner, die entlang der Prozesskette vom Entwurf bis zur Fertigung von Betonbauteilen mittels 3D-Drucktechniken ihr Knowhow einbringen, erhalten so Grundlagenwissen für zukünftige industriennahe Entwicklungen.“<sup>1</sup>

Es ist „...das Erreichen einer bestimmten Qualität bzw. Performance der gedruckten Objekte aktuell notwendig, um auf der Suche nach Anwendungen im Bauwesen langfristig Erfolg haben zu können. Für COEBRO liegt der Fokus der möglichen Anwendung im Bereich der Struktur- und Gebäudeelemente, wo die Anforderungen hinsichtlich der Oberflächenqualität hoch sind und gedruckte Bauteile auch lastabtragend sein müssen.“<sup>2</sup>

„Das Projekt verfolgt das Ziel, eine vollständige digitale Planungs- und Produktionskette zur ressourcensparenden Herstellung von Betonbauteilen mittels einer additiven Fertigungstechnik, dem 3D-Druckverfahren, wissenschaftlich aufbereitet, als Grundlage für nachfolgende industrielle Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur Verfügung zu stellen.“<sup>3</sup>

Die TU Graz als interdisziplinäre Arbeitsgruppe ist dabei mit folgenden Instituten in dem Projekt vertreten:

- Institut für Tragwerksentwurf
- Institut für Betonbau
- Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Die unterstützenden Wirtschaftspartner lauten:

- ABB Robotics Austria
- HAGE Sondermaschinenbau
- Kirchdorfer Fertigteillholding
- Peri GmbH
- Sika Österreich GmbH<sup>4</sup>

Die Vorarbeiten und Grundlagen des Projekts wurden im Rahmen einer Diplomarbeit von Jürgen Holl „COEBRO Additive Fabrication of Concrete Elements by Robots“ geleistet. Hierbei wurde erste Informationen zum 3D-Druck gesammelt und Druckversuche durchgeführt.<sup>5</sup>

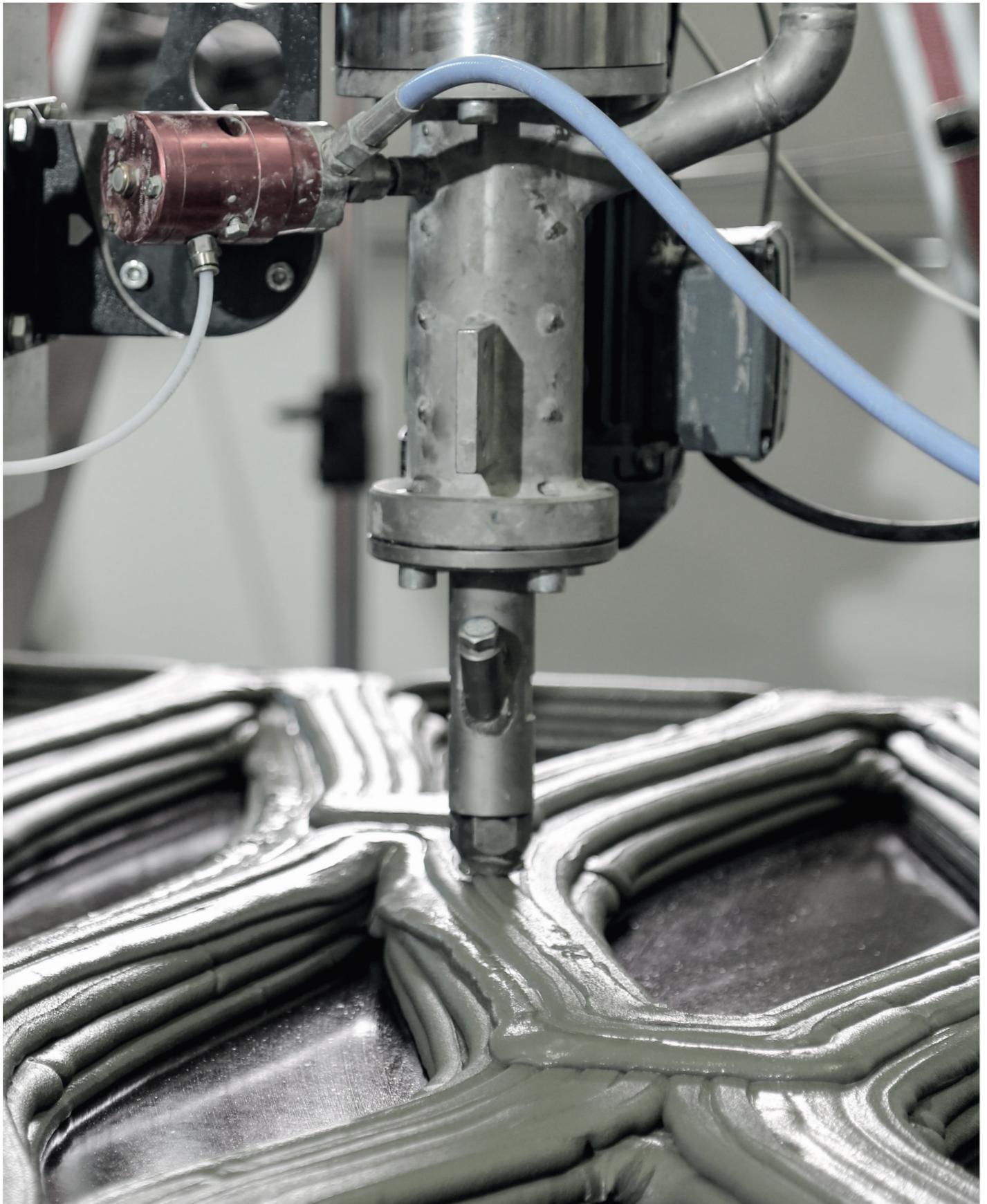
Aus dem Projekt gehen folgende Dissertationen\* hervor, mit welchen diese Arbeit inhaltlich verknüpft ist:

- COEBRO ceiling, Dipl.-Ing. Georg Hansemann
- Computational Methods For The Design Of Material Reduced Floor Structures, Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Eva Maria Pirker
- COEBRO façade, Dipl.-Ing. Robert Schmid
- Reinforcement Concepts For 3D Printed Concrete, Dipl.-Ing. Joshua Tapley



Beton additiv gefertigt

Bild 2. Drucken eines Bauteils



---

# 3DCP - Three Dimensional Concrete Printing

Three Dimensional Concrete Printing, also der 3D-Druck mit Beton, ist ein additives Fertigungsverfahren, bei welchem durch die Extrusion eines Betonstranges und dessen gezielte computergesteuerte Ablage mittels CAD entworfene Geometrien hergestellt werden. Die Addition dieser Stränge erfolgt dabei in horizontaler, sowie vertikaler Richtung. Die horizontale Addition ergibt einen Drucklayer, also eine Schicht des Bauteils. Diese Schichten werden somit in vertikaler Richtung zu einer Geometrie addiert. Der Beton tritt dabei aus einer mittels Roboter geführten Düse aus, welche einem sogenannten Pfad folgt. Der Druckpfad wird von der entwerfenden Person vorgegeben und ist von Software generiert. In seiner Ganzheit ergibt dieser die gewünschte zu druckende Geometrie als eine Linie, um welche der Betonkörper gebildet wird. Der Druckstrang entsteht demnach im Druckprozess entlang dieses Pfades, beginnend bei der Ablage des Betons auf einer definierten Schalung und in weiterer Folge auf den vorher abgelegte Strängen.

Das Potential des 3DCP steckt im Vergleich zur konventionellen Herstellung von Bauteilen durch Gießen von flüssigem Beton in zuvor gefertigte Schalungen, dass auf eine Konterschaltung verzichtet werden kann, mit dem weiteren Ziel eines Tages vollkommen auf diese zu verzichten und durch das Druckverfahren selbst herzustellen.

Ein weiteres Ziel ist, die Bewehrung der Bauteile automatisiert in den Prozess zu integrieren. Da das Verfahren es ermöglicht, dass Material genau dort verteilt wird wo es benötigt wird, können Bauteile statisch einfach optimiert werden und Gewichtseinsparungen erreicht werden. Durch die direkte Verknüpfung des Entwurfsvorgangs mit der Fertigung sind Anpassungen und Änderungen an Bauteilen in Serienfertigungen leicht zu ermöglichen, da durch diese kein Mehraufwand, abgesehen der Anpassung der Druckpfade anfällt. Aus diesen Gründen soll 3DCP die günstigere und ökologische Herstellung von komplexen Bauteilen bei einer Losgröße von nur einem Teil oder geringer Stückzahl ermög-

lichen, da viele Vorarbeiten wegfallen und Ressourcen eingespart werden können.

Durch die dem Verfahren innewohnende Addition der Druckstränge entsteht eine unverkennbare Textur mit einem gewissen Wiedererkennungswert. Druckteile in Plattenform besitzen zwei verschiedene Seiten mit unterschiedlicher Gestalt. Die eine legt das Verfahren klar offen und zeigt die einzelnen Layer, die andere hingegen gibt die Oberfläche seiner Schalung wieder.

Der 3D-Druck mit Beton eröffnet eine Vielzahl von neuen Möglichkeiten, doch entstehen durch diese auch neue Herausforderungen. Die bestimmenden und begrenzenden Parameter des Verfahrens sind teilweise noch weitgehend unbekannt und werden erst in der Entwicklung offengelegt. Gleichzeitig liegt es an der Forschung diese zu definieren und Lösung dafür zu finden. Im Folgenden werden verschiedene Projekte angeführt, welche die Anfänge des Druckens mit Beton markieren.

<sup>6</sup> Vgl. Holl 2014, 47.

<sup>8</sup> Vgl. Khoshnevis, zit. n. Hansemann 2016, 8.

<sup>7</sup> Vgl. Hwang/Ke-Thaikhoshnevis/Zhenghao, zit. n. Hansemann 2016, 8.

<sup>9</sup> Vgl. Ebda., 8.

Bild 3. Contour Crafting Druckkopf

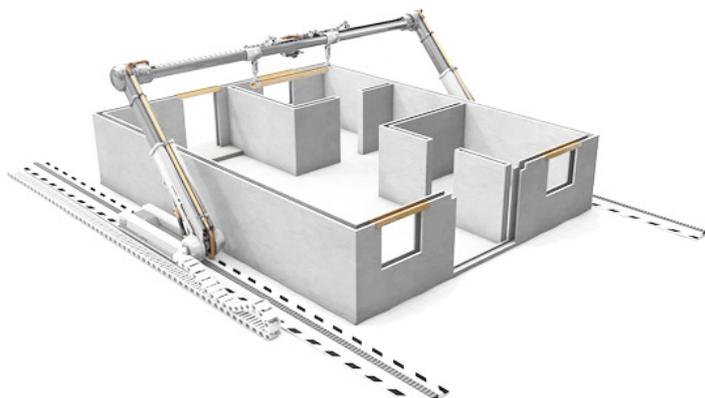
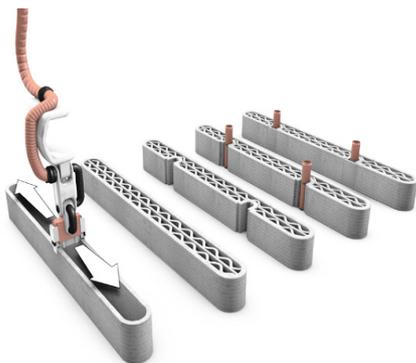
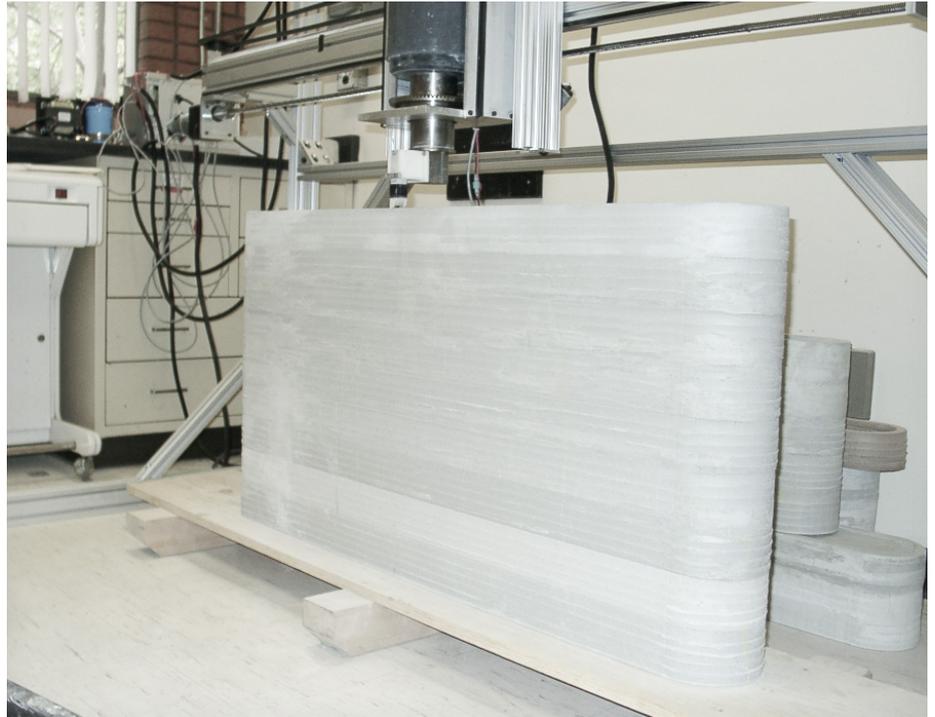
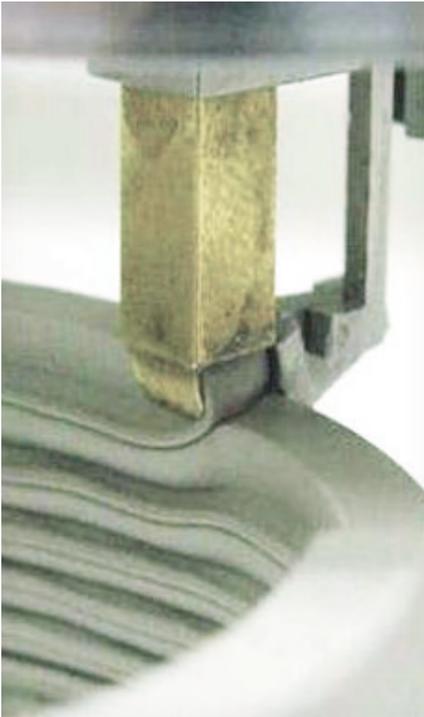
Bild 4. Die verwendete Druckanlage

Bild 5. Schema der Herstellung von Wänden

Bild 6. Schema vom Aufbau eines Hauses mittels Contour Crafting

## Contour Crafting

2004 - University of Southern California- Behrokh Khoshnevis



Die Entwicklung des Druckens mit Beton begann 2004 an der University of Southern California. Die damalige Motivation war die Anwendung des Verfahrens auf die Herstellung ganzer Häuser mit dem verfolgten Ziel, das Risiko-, Gefahren- und Verletzungspotential im Bauwesen zu reduzieren und den Bauprozess zu optimieren. Seine Umsetzung sollte Contour Crafting durch seine hohe ökonomische Effizienz und Sicherheit bei der Fertigung von Be-

hausungen in minder entwickelten Ländern finden.<sup>6</sup>

Der dazu verwendete Drucker besteht aus zwei Komponenten: Einer Extrusionseinheit, die einen Behälter mit dem zu druckenden Material beinhaltet, welches mittels Kolben durch eine Extrusionsdüse gefördert wird und einem Glättzscheibenkontrollmechanismus.<sup>7</sup>

Dieser Mechanismus steuert Kellen, wel-

che die durch die layerweise Fertigung entstehenden ablesbaren Schichten glätten. Dadurch entsteht eine annähernd glatte Oberfläche und somit weniger Aufwand in der Nachbearbeitung.<sup>8</sup>

Die Kellen sind vertikal angebracht und drücken die momentan gedruckte Schicht auf die darunterliegende, zusätzlich verlaufen zwei vertikal. Diese sind schwenkbar und richten sich dynamisch nach der darunter gefertigten Geometrie aus.<sup>9</sup>

<sup>10</sup> Vgl. Hansemann 2016, 12.

<sup>13</sup> Vgl. Fromm, zit. n. Hansemann 2016, 8.

<sup>11</sup> Vgl. Glynn/Sheil, zit. n. Holl 2014, 46.

<sup>12</sup> Vgl. Le/Austin/Lim/Buswell, zit. n. Holl 2014, 46.

Bild 7. Mittels Concrete Printing gedruckte Oberfläche

Bild 8. Querschnitt eines gedruckten Bauteils

Bild 9. Rückseite einer gedruckten Sitzbank

## Concrete Printing

2009 - Loughborough University & Foster and Partner



Der Prozess des Concrete Printing ähnelt dem, des auf der Vorseite erläuterten Contour Crafting und wird als Fused Deposition Modeling (FDM), oder als Fused Layer Modeling/Manufacturing (FLM) bezeichnet. Als Druckmaterial wird ein faserverstärktes Betongemisch herangezogen, welches unmittelbar vor dem Drucken hergestellt und in einem Behälter gelagert wird.<sup>10</sup> Unter diesem Behälter befindet sich eine Düse mit 9mm Durchmesser, durch wel-

che das Material extrudiert wird und mittels der Ablage in Strängen die gewünschte Geometrie erzeugt wird.<sup>11</sup> Die Positionierung der gesamten Einheit erfolgt durch ein dreiaxsiges Portal.<sup>12</sup>

Durch die Lagerung des Materials vor dem Austritt aus der Düse wurde eine lange Offenzeit der Betonmischung angestrebt, welche sich auf ca. 100 Minuten beläuft.<sup>12</sup> Die große Herausforderung besteht neben einer guten Förderbarkeit, in einer gleich-

zeitig hohen Frühstandfestigkeit unmittelbar nach dem Austritt aus der Düse.<sup>10</sup>

Als Prototyp zur Veranschaulichung des Verfahrens und dessen Potentials wurde ein Möbelstück hergestellt, welches eine Kombination aus einem Wandstück und einer Sitzbank darstellen soll. Die vertikalen Hohlräume des Exponats können als Installationsschächte genutzt werden.<sup>13</sup>

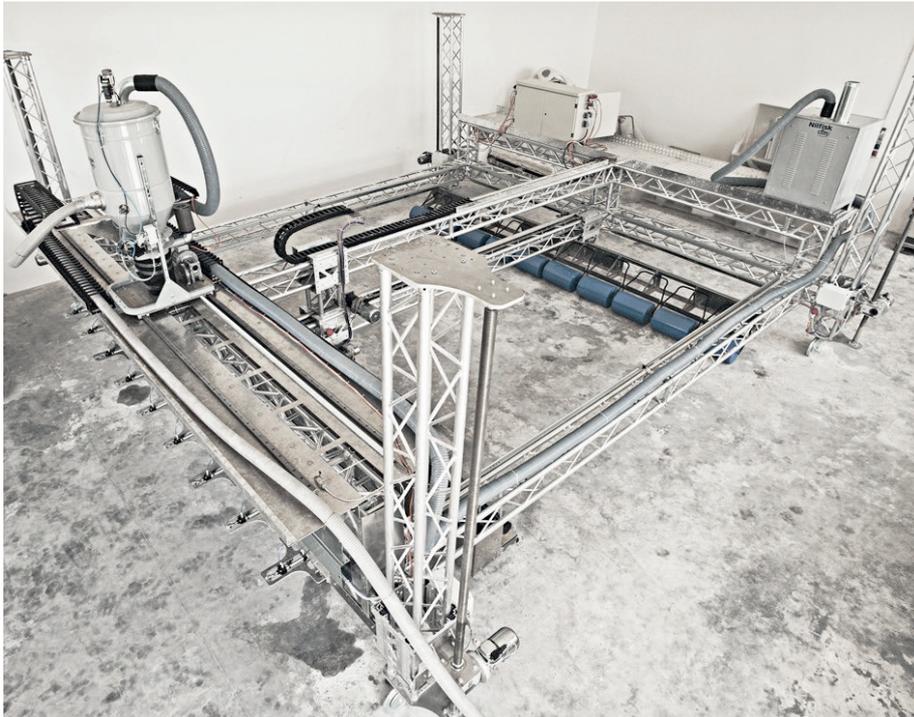
<sup>14</sup> Vgl. Dini, zit. n. Holl 2014, 48.<sup>15</sup> Vgl. Holl 2014, 48.<sup>16</sup> Vgl. Glynn/Sheil, zit. n. Holl 2014, 48.

Bild 10. D-Shape Drucker

Bild 11. Radiolaria Pavillon

## D-Shape

2008 - Enrico Dini & Andrea Morgante



Der D-Shape Drucker, welcher die Herstellung großer fugenfreier Objekte aus gebundenem Sand ermöglicht, ist eine Weiterentwicklung des Z-Corp Druckers der Firma 3D System.<sup>14</sup>

Der Herstellungsprozess läuft wie folgt ab: Zuerst wird das gewünschte Ausgangsmaterial wie Sand, Kies oder Mineralstaub in den Fertigungsbereich eingebracht. Dies wird im nächsten Schritt in der gewünschten Schichtdicke abgezogen (im Falle des Radiolaria Pavillons betrug diese 4-6mm) und komprimiert. Danach wird in Form der definierten Schichtgeometrie ein Bindemittel bzw. chemischer Katalysator aufgebracht, welcher das pulverförmige Material erhärten lässt. Dieser zweiteilige Vorgang wird so lange wiederholt, bis die vollständige Höhe der entworfenen Geometrie erreicht ist. Überschüssiges Material wird danach entfernt.<sup>15</sup>

Das Aufbringen des Bindemittels geschieht über einen auf ein Portal angebrachten länglichen Druckkopf, welcher sich über die gesamte Breite des Fertigungsbereichs der Anlage erstreckt. Dieser besteht aus 300 einzelne Düsen, aus welchen das Bindemittel austritt. Die Düsen sind alle einzeln gesteuert. Ihr Achsabstand beträgt 5mm, um eine gleichmäßige Verteilung des Bindemittels in den gewünschten Bereichen zu erhalten.<sup>16</sup>

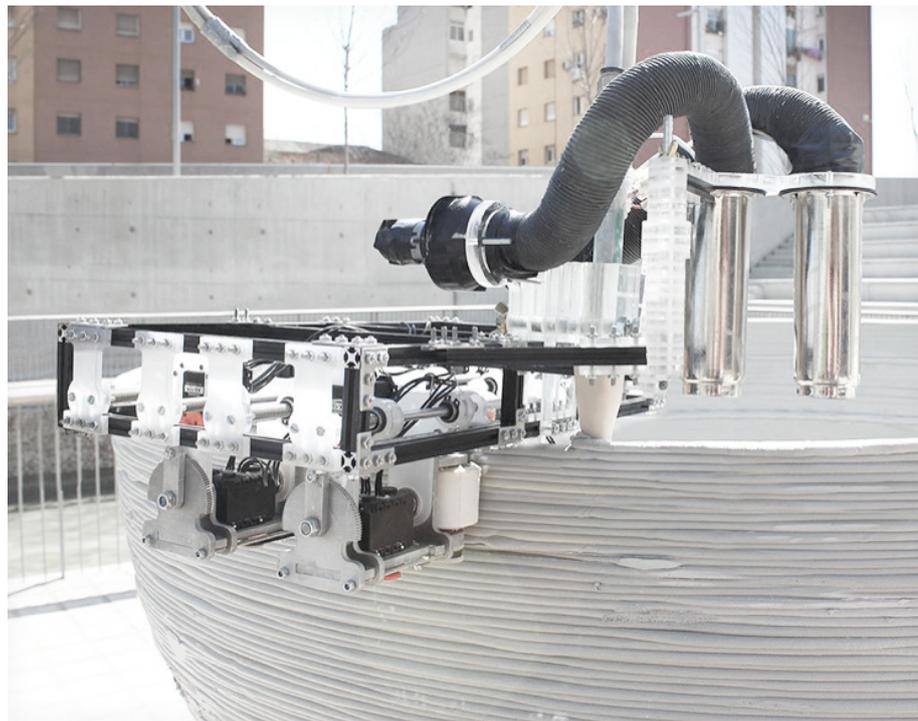
Die dabei entstehende Oberfläche des Werkstücks ist äußerst rau und muss dementsprechend nachbearbeitet werden. Das Verfahren ist relativ zeitaufwendig, denn bei der Herstellung des Prototypen Radiolaria Pavillon, dessen Außenabmaße 3x3x3m betragen, wurde eine Druckhöhe von 150-200mm pro Tag erreicht.<sup>15</sup>



<sup>17</sup> <<https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/minibuilders/>>, 14.9.2018.

Bild 12. Vakuumroboter auf zu bedruckender Oberfläche

Bild 13. Aufbau der Schalung



Minibuilders beschäftigt sich damit, dass die Produktion von großformatigen Bauteilen durch 3DCP, mit bis jetzt üblichen Methoden meist durch den maximalen Druckbereich der Anlage limitiert ist. Diesen Bereich versucht das Projekt zu maximieren, indem drei Roboter entwickelt wurden, welche sich autonom auf der von ihnen zu druckenden Struktur bewegen können und das Druckmaterial verteilen.<sup>17</sup>

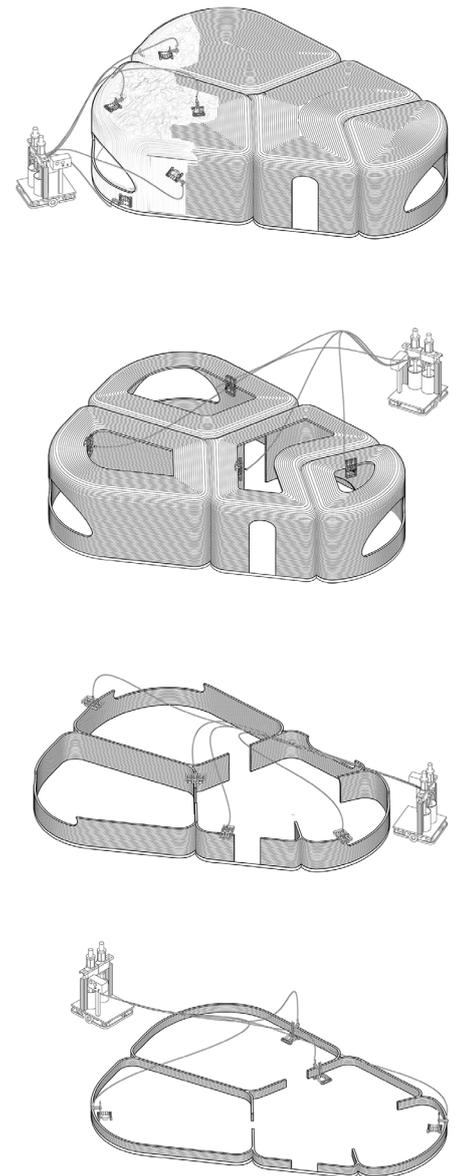
Diese Roboter drucken zuerst in unidi-

rektionalen Bahnen, sprich in horizontalen Layern, eine Grundgeometrie. Diese wirkt im Folgenden als Schalung, denn im zweiten Schritt werden spezielle Roboter aufgesetzt, welche sich mittels einer Vakuumsaugglocke an der Geometrie festsaugen und sich mit einem Kettenantrieb frei auf der Oberfläche bewegen können. Deren Ziel ist es, Druckstränge dort abzulegen, wo sie laut statischer Analyse benötigt werden, um die gebaute Struktur zu

Bild 14. Fertigungsschritte Minibuilders

Oben: Verstärkung der Struktur durch frei verfahrenende Vakuumroboter

Unten: 3: Layerweiser Aufbau der Struktur durch horizontal verfahrenende Druckroboter



verstärken. Dabei werden der zuerst nur layerweise gebauten Geometrie eine, oder mehrere Schichten beigefügt. Diese sollen den übereinander geschichteten Layern mehr Zusammenhalt bieten, indem deren Bahnen in Richtung entstehender Zugkräfte, bzw. quer zu den Layern verlaufen und sie somit auskreuzen.<sup>17</sup>

Bild 15. Bewehrter Druckteil



<sup>18</sup> Vgl. Asprone 2018, 111f.

<sup>19</sup> Vgl. Salet, 1.

<sup>20</sup> Vgl. Ebda., 10-12.

# Bewehrung - franz. „armement“ - Verstärkung

Die Zugfestigkeit des Werkstoffs Beton liegt bei nur rund 10% seiner Druckfestigkeit. Um seine Zugfestigkeit zu erhöhen, ist daher eine Bewehrung notwendig. Eine konstruktive Bewehrung beinhaltet aber noch weitere Funktionen, wie eine gleichmäßige Spannungsverteilung im Bauteil, Vermeidung von Sprödbruch und die Begrenzung von Rissbildung. Zu bedenken ist, dass die existierenden Bewehrungskonzepte ein Jahrhundert lang, Hand in Hand mit den Herstellungsmethoden für Betonteile mitentwickelt wurden und somit auf diese zugeschnitten sind. Die unadaptierte Anwendung der bestehenden Konzepte auf neue Technologien zur Fertigung von Betonteilen, würde es jedoch möglicherweise verhindern, dass deren vollständiges Potential ausgeschöpft werden kann und die Bewehrung in angepasster Form nicht ihre volle Leistung erbringt.<sup>18</sup>

Die Möglichkeiten des 3DCP werden momentan rasch, wenn auch auf einer Trail and Error basierenden Grundlage, erforscht. Hierbei liegt der Fokus größtenteils auf der Erstellung der Druckgeometrie. Im Bereich der Bewehrung und der somit verbundenen Erhöhung der Belastbarkeit von gedruckten Teilen, hinkt die Entwicklung noch stark hinterher.<sup>19</sup>

Materialtests ergeben, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen gegossenen und gedruckten Testteilen bezüglich der Richtungsabhängigkeit von Steifigkeit, Druckfestigkeit und Biegefestigkeit gibt. Problematisch ist jedoch die Zugfestigkeit der Verbindung zwischen den einzelnen Drucksträngen da diese, wenn die be-

druckten Stränge schon so weit ausgehärtet sind, dass die weiteren nicht mehr genügend Verbindung mit ihnen eingehen, herabgesetzt wird.<sup>20</sup>

Um den Mangel an Bewehrung zu kompensieren ist ein Ansatz, Druckteile vorzuspannen oder diese als verlorene Schalung zu verwenden. Diese Ansätze schöpfen jedoch nicht das gesamte Potential des 3DCP aus, da dabei die Freiheit in der Ausformung von Geometrien stark eingeschränkt wird. Darüber hinaus umgehen sie das Kernproblem nur, anstatt eine zufriedenstellende Lösung zu schaffen.<sup>20</sup> Ein angeführtes Projekt, welches diese Methode anwendet, ist die Fahrradbrücke der technischen Universität Eindhoven.

Das Beimengen von Bewehrungsfasern in die Betonmischung und somit die Herstellung von faserverstärkten Betonsträngen, wäre eine Möglichkeit um die Zugfestigkeit in Richtung der gedruckten Stränge zu erhöhen. Dabei ist eine starke Ausrichtung der Fasern wichtig. Dies löst aber nicht das Problem der mangelnden Zugfestigkeit zwischen den einzelnen Strängen.<sup>20</sup> Die fasrige Form der Bewehrung wirft Fragen bezüglich der Förderbarkeit des flüssigen Betons auf, da dieser leichter zu Verstopfungen in der Förderkette durch Ansammlungen von Fasern führen kann.

Grundsätzlich ist noch ungeklärt, welche Bewehrungsmaterialien und Methoden für die Herstellung von 3DCP Teilen am besten geeignet sind, da deren Eignung von vielen verschiedenen Faktoren abhängig ist. Vor allem in der Zuführung und Einarbeitung in den Beton stehen noch viele Fragen offen. Es gibt Projekte, bei welchen die Beweh-

rung von Hand eingebracht wird. Dies wird jedoch nicht dem automatisierten Prozess des 3DCP gerecht. Der günstigste Zeitpunkt in der Fertigung zur Bewehrung steht ebenfalls noch offen. Dieser reicht von der Herstellung einer Bewehrungsstruktur vor dem eigentlichen Druckprozess, dem direkten Einbringen während des Drucks durch einführen in den Druckkopf (Fahrradbrücke der Technischen Universität Eindhoven), bis hin zu einer nachträglichen Bewehrung und manueller Überspachtelung (Betonkanu TU Graz). Dazwischen befinden sich einige Hybride, bei welchen die Bewehrung zwischen den Layern manuell eingebracht wird oder die Bewehrung an sich der 3D-gedruckte Bauteil ist und der Beton danach eingebracht wird (Mesh Mould).

Die auf den nächsten Seiten angeführten Projekte behandeln das Thema der Bewehrung in additiven Fertigungsprozessen mit Beton auf verschiedenste Weisen. Sie gelten noch nicht als fertige Lösungen, sondern sind viel mehr als prototypische Lösungsansätze zu verstehen.

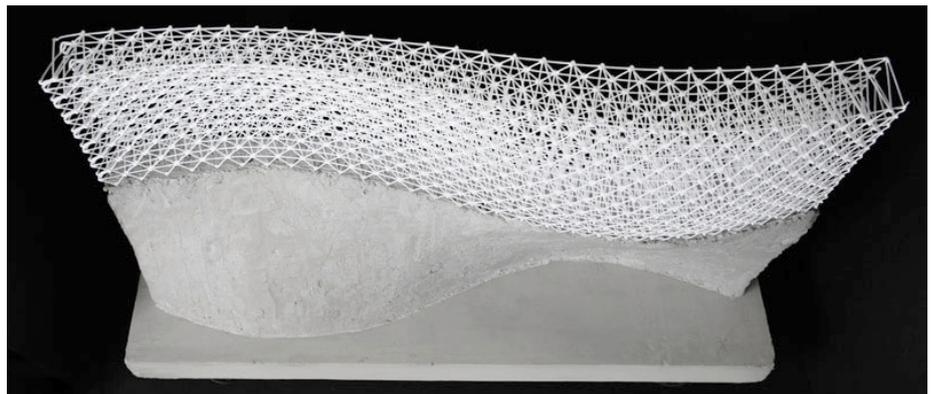
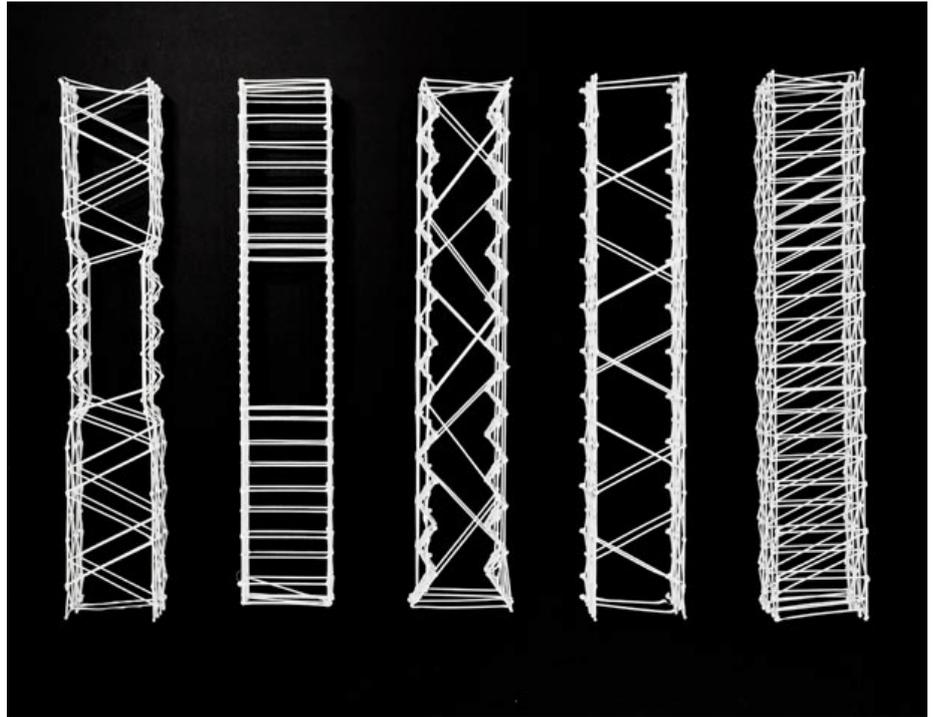
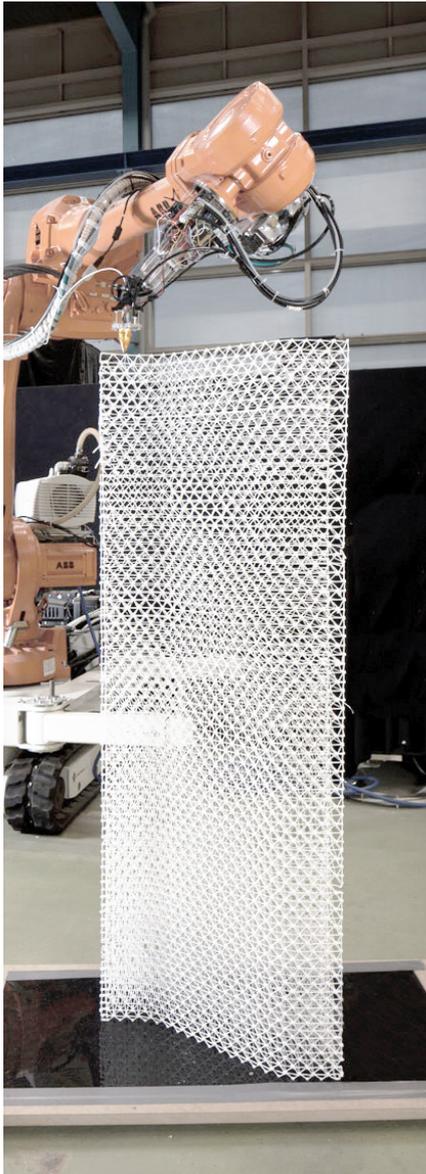
Bild 16. Drucken des Bewehrungsgitters aus Polymer-Kunststoff

Bild 17. Verschiedene Gitterstrukturen zur Anpassung an auftretende Lasten und Kräfte in den gefertigten Bauteilen

Bild 18. Zur Hälfte ausgegossenes Gitter

## Mesh Mould

2014 - ETH-Zürich



Mesh Mould nutzt den 3D-Druck von Polymeren, um mit dessen Hilfe aus einzelnen Filamenten ein räumliches Gitter herzustellen, anstatt der damit normalerweise hergestellten schichtweise aufgebauten geschlossenen Strukturen. Dieses erzeugte Gitter dient im nächsten Schritt als verlorene Schalung, indem es mit Beton ausgegossen wird. Der Beton tritt dabei durch die Maschen an den Rändern aus, welcher im Anschluss manuell per Hand verspach-

telt wird, um eine glatte Oberfläche zu erreichen.<sup>21</sup>

Um poröse Strukturen herzustellen bestünde die Möglichkeit, Führungskanäle zu drucken, welche die Verteilung des Betons begünstigen und Hohlräume entstehen lassen.<sup>22</sup>

Durch das Mitführen eines zusätzlichen Filaments mit erhöhter Zugfestigkeit wie Carbon, Basalt oder Glasfaser wäre ange-

dacht, dass die erstellte Gitterstruktur nicht nur die statischen Kräfte im ausgehärteten Bauteil aufnimmt, sondern auch die beim Eingießen des Betons entstehenden dynamischen Kräfte.<sup>22</sup>

Damit würde diese Fertigungsmethode nicht nur den aufwendigen Schalungsbau für gekrümmte Geometrien, sondern auch das Biegen der dafür benötigten komplexen Stahlbewehrungskörbe ersetzen.<sup>22</sup>

<sup>23</sup> Vgl. Hack (u. a.) 2018, 2.

<sup>24</sup> Ebda., 2 f.

<sup>25</sup> Ebda., 3.

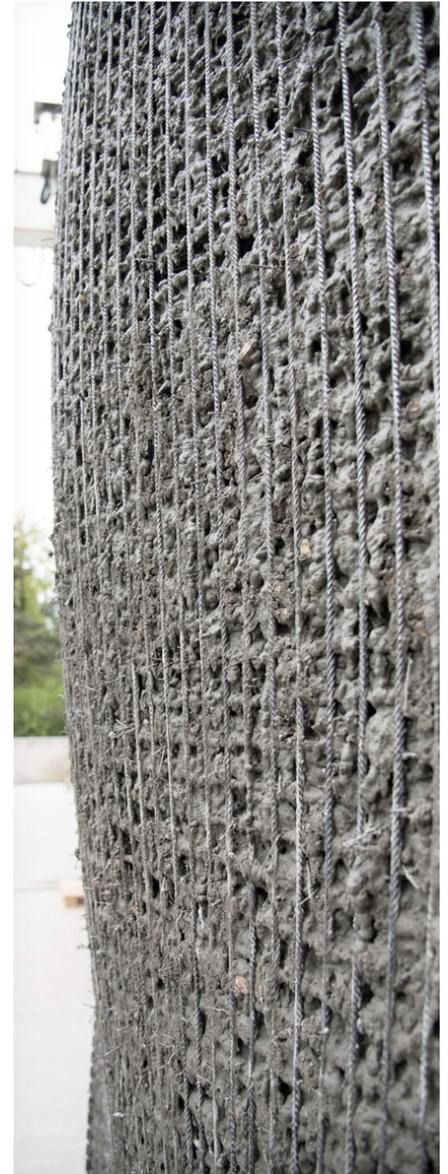
Bild 19. Roboter bei der Herstellung des geschweißten Bewehrungskorbes

Bild 20. Greifer des Roboters

Bild 21. Bewehrungskorb mit eingegossenem Beton

## Mesh Mould Metal

2017 - ETH-Zürich



Der zweite Teil des Mesh Mould Projektes, welcher sich auf die gewonnenen Erfahrungen in der Erstellung von Gitterstrukturen des ersten Teils stützt, setzt seinen Fokus auf die Aktivierung des hergestellten Gitters. Daher werden dabei die Polymerfilamente durch Stahlstäbe ersetzt.<sup>23</sup>

Das gleichzeitige Schalungs- und Bewehrungsnetz wird dabei in voneinander unabhängige horizontale und vertikale Stabelemente unterteilt. Diese werden mittels eines

mobilen Roboters mit einem angebrachten zweiteiligen Manipulatorwerkzeug erzeugt. Der vordere Teil biegt die horizontalen Stäbe in die gewünschte Form, während der hintere Teil für das Klemmen, Zuführen, pneumatische Schneiden und Widerstandsschweißen der Teile verantwortlich ist. Dieser Roboter ist so gebaut, dass das Verfahren mobil vor Ort, als auch zur Vorfertigung angewendet werden kann.<sup>24</sup>

Ein großer noch zu lösender Punkt sind die

im Prozess entstehenden Ungenauigkeiten, welche sich z.B. aus Eigenspannungen in den Rohmaterialien ergeben. Denn aus diesen folgen Abweichungen in der Position der einzelnen Elemente, welche sich über das Bauteil hin immer mehr potenzieren. Diese müssen erfasst und berücksichtigt werden, sodass sich die Abweichung vom ursprünglichen CAD-Modell in einer gewissen Toleranz hält.<sup>25</sup>

<sup>26</sup>Vgl. Lindström (u. a.), 229.

Bild 22. Mittels Rock Print Verfahren gefertigte Struktur

Bild 23. Die Rock Print Struktur vor Entfernen des überflüssigen Materials

Bild 24. Detail der Geometrieränder

## Jammed Architectural Structures

2015 - ETH-Zürich



Das Projekt nutzt das Phänomen, dass sich granuläre Materialien unter bestimmten Umständen wie Festkörper verhalten. Durch eine „jamming transition“ werden diese Materialien von einem nicht festen, flüssigartigen Zustand in einen festen (gesperrten) gebracht, wobei dieser Vorgang als reversibel betrachtet wird.<sup>26</sup>

Beim „Rock Print“ benannten Verfahren wird ein dünner Layer Steine in eine Schalung eingebracht und komprimiert, welche

größer ist als die letztendliche Geometrie. Dann wird mittels Roboter eine Schnur nach einem digitalen Plan platziert. Dieser Prozess wird layerweise wiederholt, bis die Struktur ihre endgültige Höhe erreicht hat. Anschließend wird die Schalung und das überflüssige Material manuell entfernt.<sup>26</sup>

Versuche gaben zur Erkenntnis, dass sich so lange die Außenkontur der zu erstellenden Strukturen kreisförmig und deren Radius in einem gewissen Bereich befinden,

die Strukturen stabil sind. Eckige und komplexe Formen sind schwierig herzustellen, da der Faden immer gespannt sein muss. Daraus ergab sich, je kreisförmiger und symmetrischer die Struktur ist, desto stabiler ist sie. Im Folgenden wurde somit ein Muster zur Fadenplatzierung entwickelt, bei dem die Konturen miteinander greifenden Kreisen erstellt werden.<sup>26</sup>

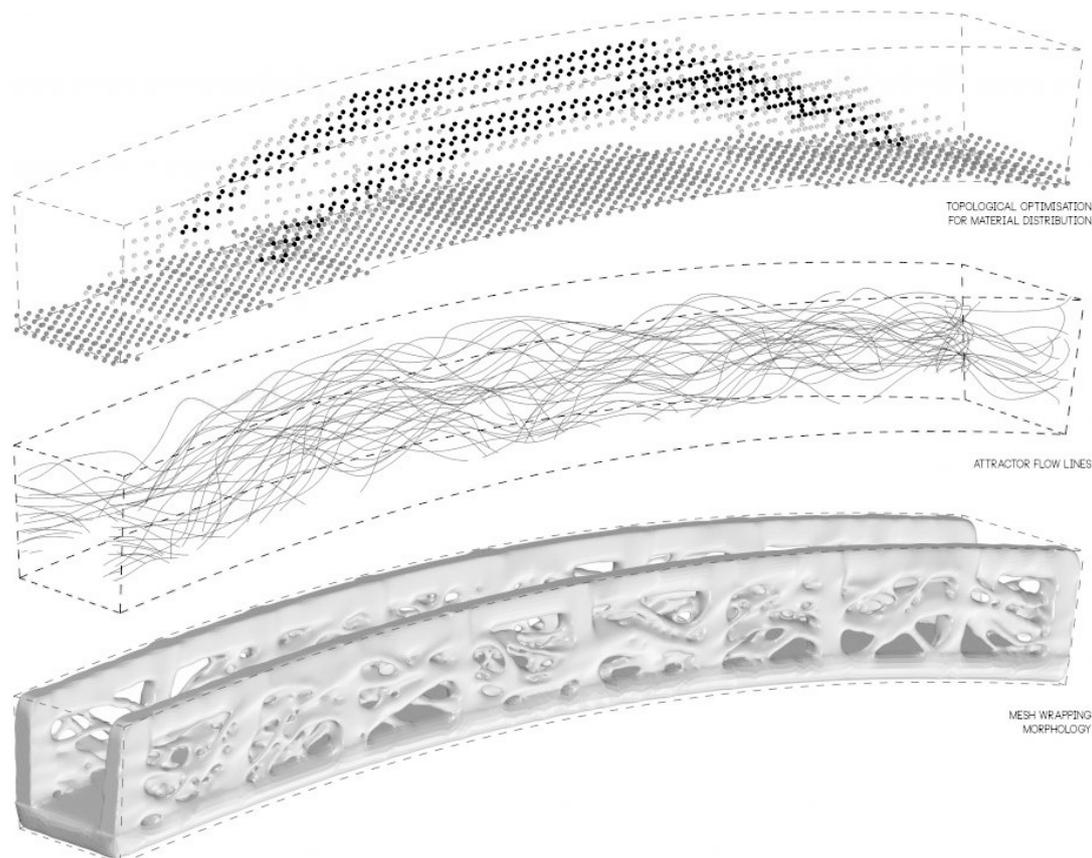
<sup>27</sup> 3D PRINTED BRIDGE, World's first 3D-printed pedestrian bridge in Spain <<https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/3d-printed-bridge/>>, in <<https://iaac.net/research-projects/>>, 14.9.2018.

Bild 25. Fertiggestellte Fußgängerbrücke

Bild 26. Parametrischer Designprozess der Brücke

## Fußgängerbrücke

2017 - Institute of Advanced Architecture of Catalonia



Das Projekt der in Madrid situierte Fußgängerbrücke wurde von ACCIONA geführt und von einem fachübergreifenden Team aus Architekten, Maschinenbauern und Statikern entwickelt. Das IAAC wurde mit dem parametrischen Design der Brücke beauftragt. Dieses gewährleistet eine optimale Materialverteilung bei maximaler, ihrer Nutzung entsprechenden, Belastbarkeit der Brücke. Mittels generativer Algorithmen wurde eine poröse Struktur erzeugt,

welche an jeder Stelle nur so viel Material besitzt, wie sie statisch benötigt.<sup>27</sup>

Als Printverfahren kam Enrico Dinis D-Shape Sinterprozess zum Einsatz, welcher die Struktur durch Binden eines pulverförmigen Ausgangsmaterials schichtweise aufbaut (siehe S17 - D-Shape).<sup>27</sup>

Die Brücke wurde aus 8 zusammengeführten Einzelteilen mit faserverstärktem Beton gefertigt, ohne zusätzliche Bewehrungen.

Ursprünglich war geplant Metallfasern der Betonmischung zur Bewehrung beizumengen, diese ergaben aber für die Nutzung einer Fußgängerbrücke eine zu raue Oberfläche. Daher wurden diese durch Polypropylen-Kunststofffasern ersetzt.<sup>27</sup>

<sup>28</sup> Salet 2018, 223.<sup>29</sup> Ebd., 223 f.<sup>30</sup> Ebd., 227 f.

Bild 27. Die zusammengefügte Brücke wird an ihren Platz gehoben

Bild 30. Rendering der Brücke, welches die Spannstäbe ersichtlich macht

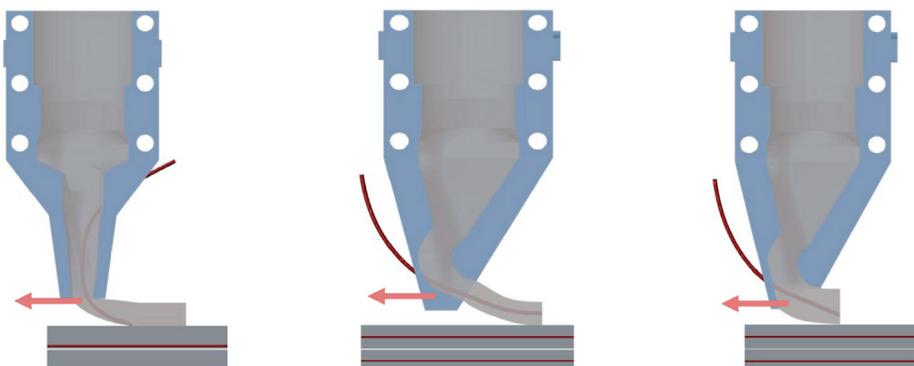
Bild 28. Drucken eines Brückenelements

Bild 29. Die verschiedenen getesteten Düsentypen

Von links nach rechts: Düse mit vertikal austretendem Beton; Düse mit horizontal austretendem Beton; Letztendlich verwendete Hybridlösung

## Fahrradbrücke

2018 - Technische Universität Eindhoven



Die technische Universität Eindhoven errichtete mit Firmenpartnern eine über 6,5m spannende Fahrradbrücke aus 8 einzeln, mittels 3DCP gefertigten Elementen. Die Betonelemente wurden dabei um 90° verdreht gefertigt, sodass deren im montierten Zustand innen liegende Seite, im Druckprozess in der horizontalen Achse lag.<sup>28</sup>

Danach wurden die Teile miteinander verklebt und durch deren Hohlräume Stahlkabel zur Vorspannung der Brücke geführt. Als Randabschluss und zur Aufnahme der Spannstäbe wurden zwei konventionell gegossene Betonquader angebracht.<sup>29</sup>

In die Druckstränge wurde während des Druckprozesses durch die Düse ein Kabel zur Bewehrung eingebracht. Die dabei verwendete Düse durchlief mehrere Entwicklungsstufen. Bei der anfangs verwendeten nach unten gerichteten Düse, wie sie meistens im Beton-3D-Druck verwendet wird, kam es zu einem schlechten Zusammenhalt von Beton und Bewehrung, da sie den Druckstrang in zwei Hälften trennte. Zur Lösung des Problems wurde eine Düse entwickelt, in welcher der Beton zwar von oben zugeführt, doch die Bewehrung von der Seite eingebracht wird. Der Boden der Düse ist dabei geschlossen und die Düsenöffnung ist in Fahrtrichtung nach hinten ausgerichtet. Dies ergab wiederum eine schlechte Bindung der einzelnen gedruckten Layer, da sie nicht aufeinander aufgepresst, sondern ohne vertikale Kraft nur aufeinander abgelegt wurden. Letztendlich erzielte das beste Ergebnis eine Kombination aus beiden Düsen, indem der Boden der zweiten Düse entfernt wurde.<sup>30</sup>

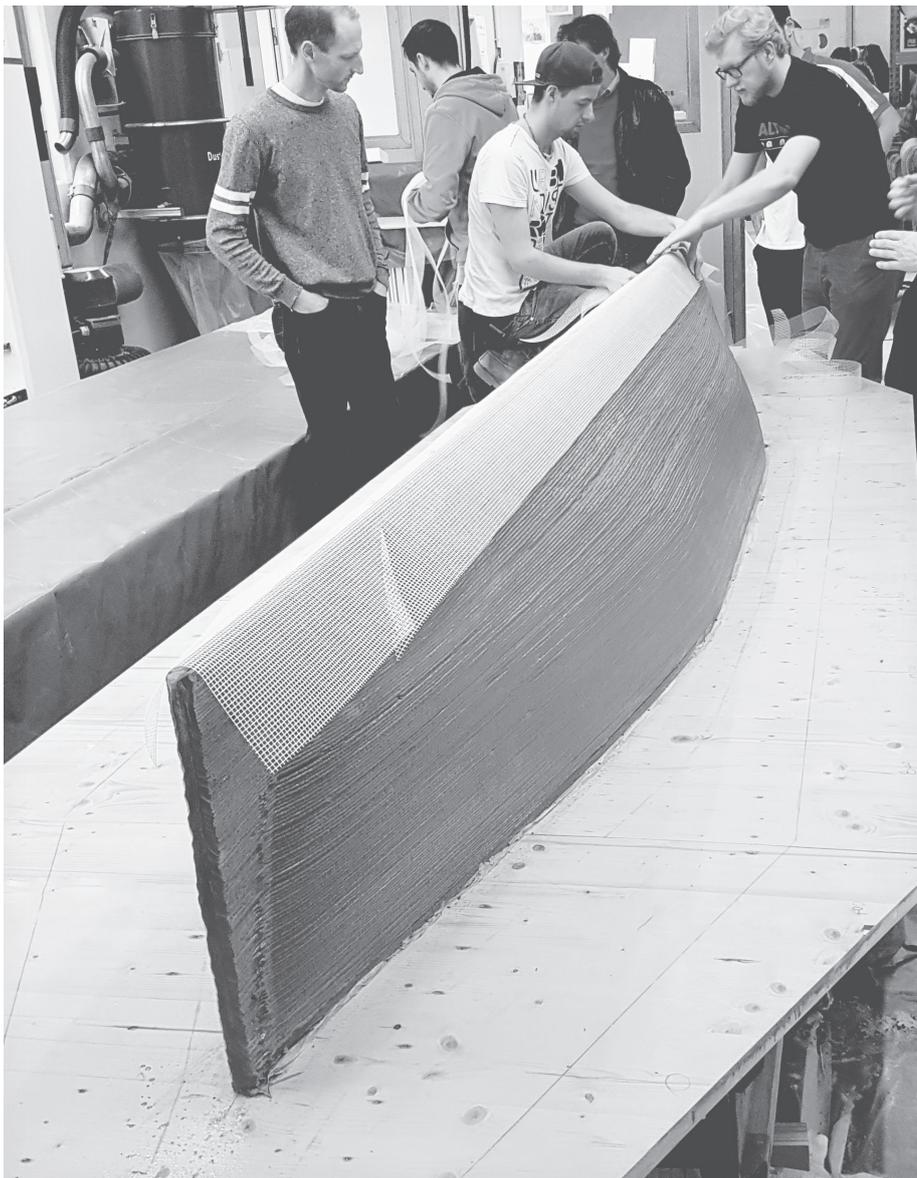
Bild 31. Aufbringen der Bewehrung auf den Bootsumpf

Bild 32. Verspachteln des bewehrten Rumpfes

Bild 33. Fertiges ausgestelltes Kanu nach dem Wettbewerb

## Betonkanu

2017 - Technische Universität Graz



Das für die Betonkanuregatta 2017 gefertigte Kanu der TU Graz wurde durch 3DCP hergestellt. Dabei wurde die Geometrie des Kanus um 180° gedreht, und somit mit der Oberkante des Rumpfes nach unten gefertigt. Beim Druckprozess selbst wurde das Druckteil mit Sand unterstützt, welcher in den entstehenden Hohlkörper schrittweise eingefüllt wurde.

Nach Beendigung des Drucks wurden zur Bewehrung Glasfasermatten über die Außenseite des Rumpfes gelegt. Diese wurden im folgenden Schritt mit einer zusätzlichen Betonschicht von Hand aufgespachtelt. Diese Bewehrung ist insbesondere wichtig, da die Struktur nur layerweise aufgebaut ist und somit keine vertikalen Druckbahnen zur Auskreuzung der Geometrie besitzt, welche den Schwimmkörper möglicherweise verstärken könnten.





Die Anlage

Bild 34. Roboter der Druckanlage

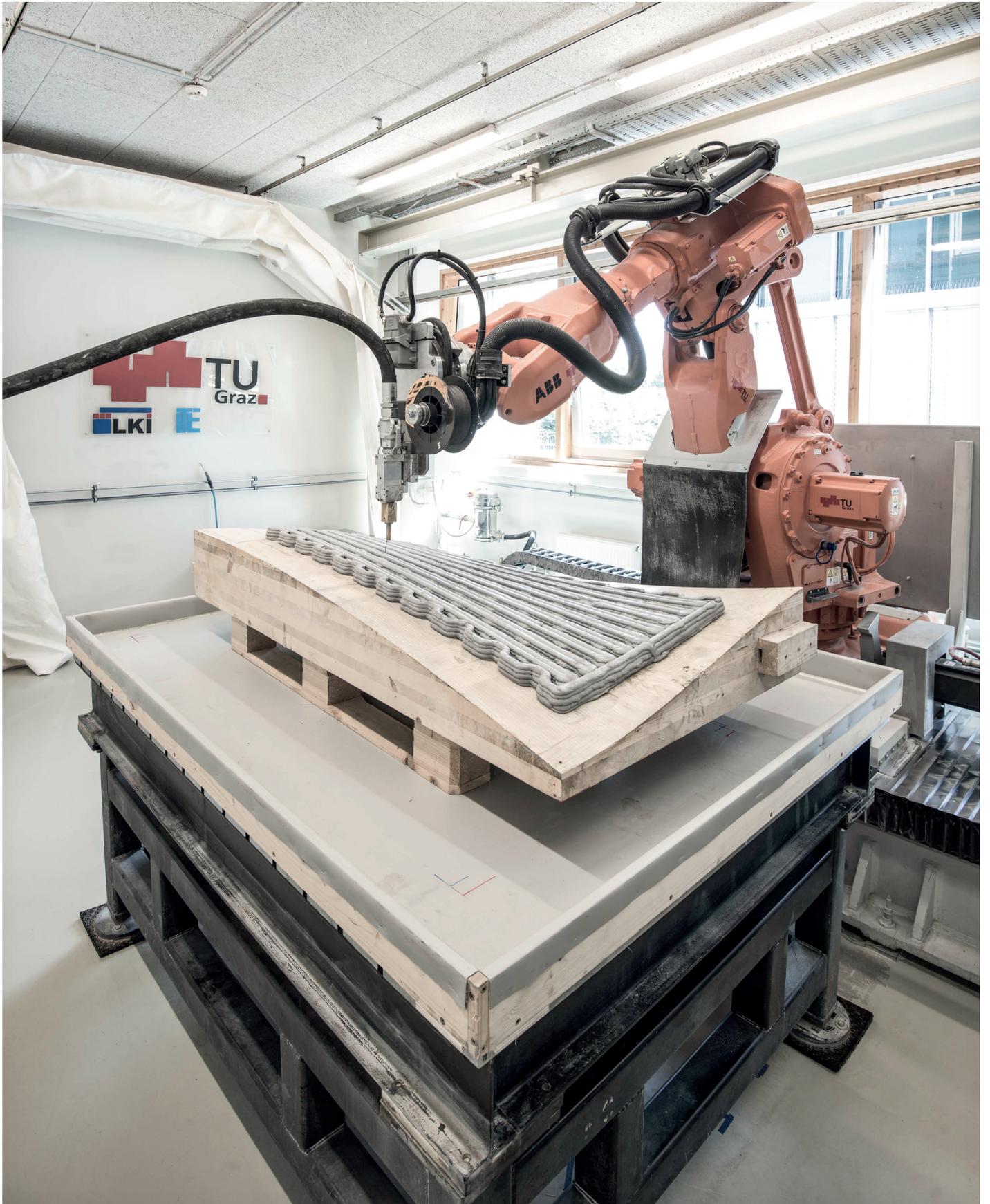


Bild 35. Mischerpumpe mit angeschlossenem Big-Bag

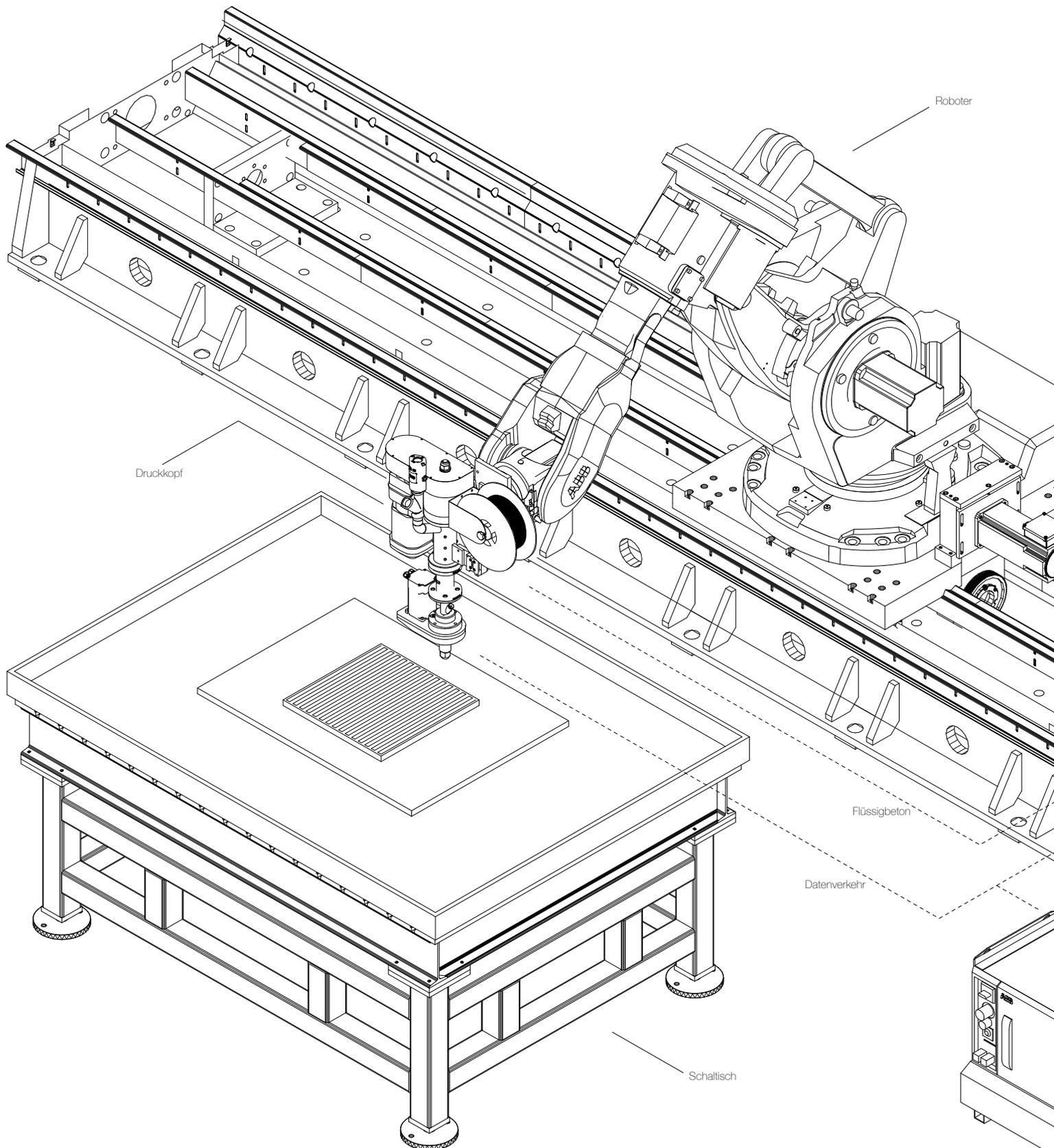


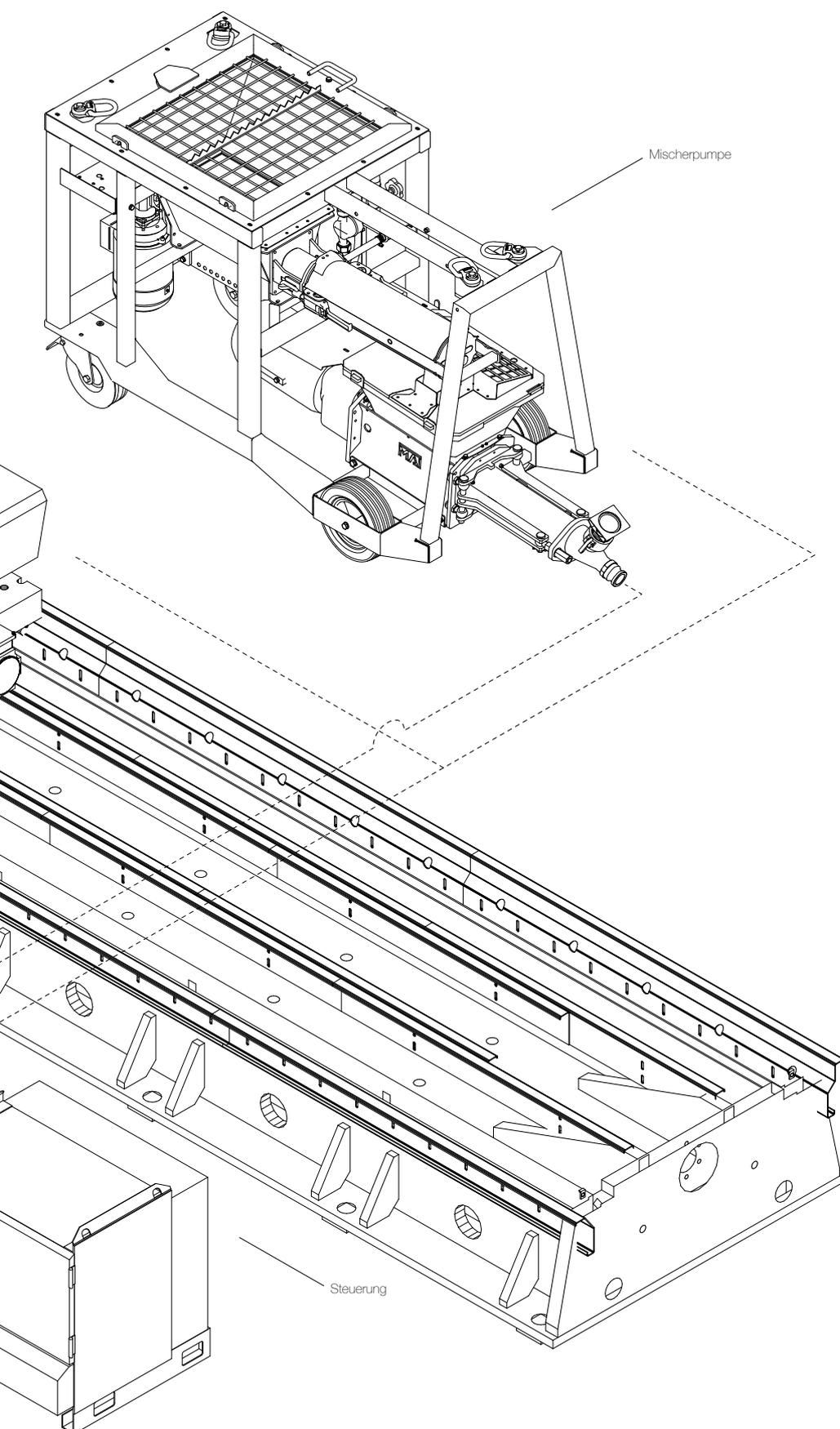
Als Grundvoraussetzung zum Drucken von Betonteilen wird eine entsprechende Anlage benötigt. Im Allgemeinen befinden sich diese Anlagen noch in ihrer Entwicklung und es gibt noch viele zu lösende Punkte um die Serienreife zu erreichen.

Die im Folgenden beschriebene und im COBERO Projekt verwendete Anlage wird als Ausgangspunkt für die Anforderungen und Funktionen an eine 3DCP Anlage, sowie ihrer benötigten Ressourcen und Arbeitsumgebung, herangezogen. Sie befindet sich in einem laufenden Entwicklungsprozess, in welchem Komponenten getestet, angepasst und gegebenenfalls ausgetauscht werden. Ihre Grundelemente, bzw. deren geforderte Funktion, bleibt jedoch erhalten.

Viele Komponenten sind so gewählt, dass sie flexibel in ihrer Anwendung sind, so wie z.B. ein Roboter zur Führung eines Druckkopfes. Andere sind wiederum auf das Drucken von Beton adaptiert worden und wurden aus anderen Fertigungsverfahren herangezogen, wie z.B. eine Mischerpumpe zur Herstellung von Spritzbeton. Wieder andere Komponenten sind eigens für die Nutzung angefertigt worden, wie der Druckkopf.

Bild 36. Gesamte 3DCP Anlage





Die zur Herstellung der Prototypen verwendete 3DCP-Anlage besteht aus einem Roboter, an dessen Arm ein Druckkopf befestigt ist. Dieser Druckkopf wird vom Roboterarm in den gewünschten Bahnen bewegt und legt dabei die ihm zugeführte Betonmischung auf einem Schaltisch ab. Dem Druckkopf können verschiedene Arten von fadenförmigen Bewehrungen zugeführt werden, welche dieser in den Druckstrang integriert. Die Herstellung der Betonmischung erfolgt über eine Mischerpumpe, welche mit einer Betontrockenmischung und Wasser mit optional zugefügten Additiven versorgt wird.

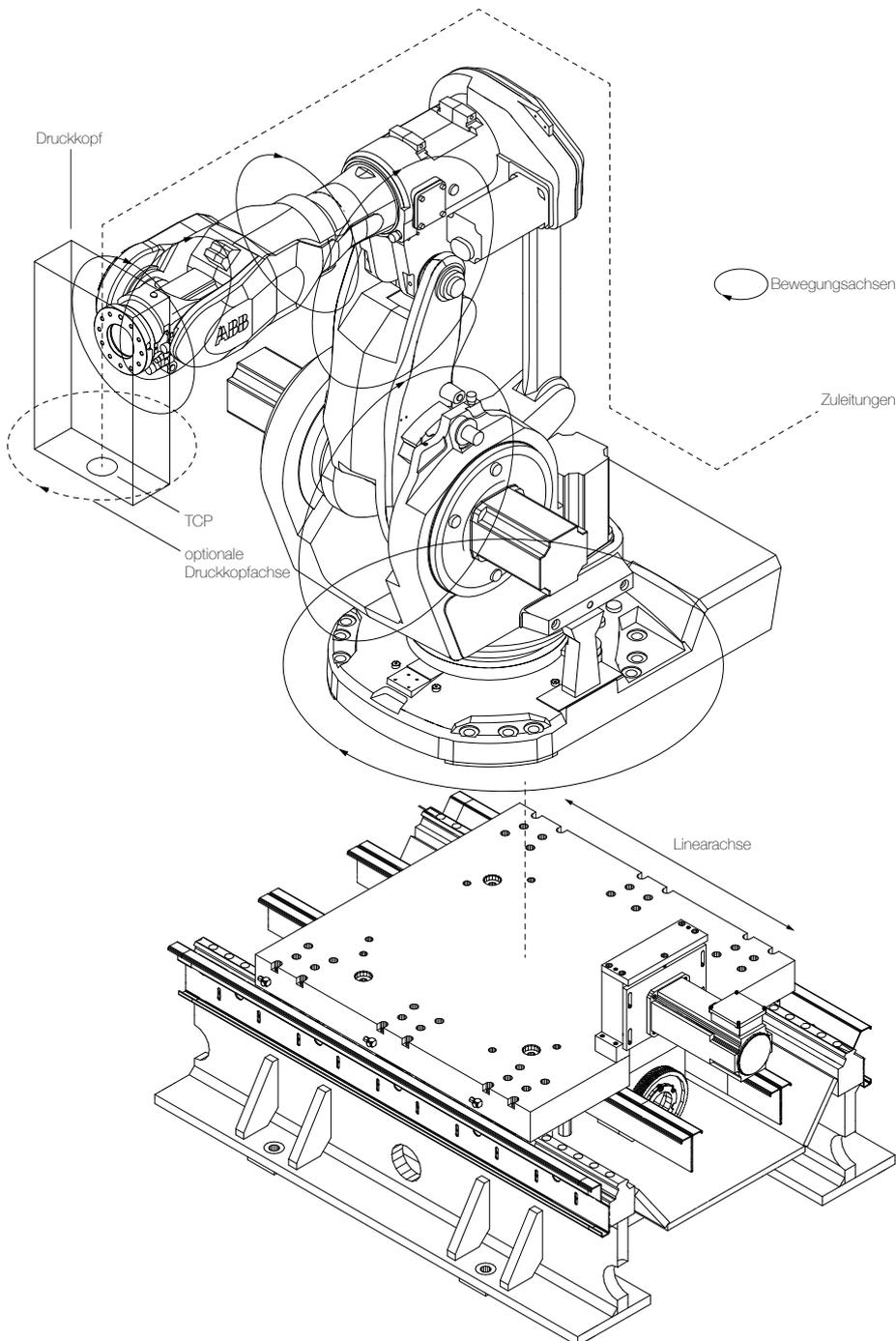
Über einen Schlauch wird der zu verarbeitende Flüssigbeton an den Druckkopf gefördert.

Angesteuert wird die gesamte Anlage über einen Zentralen Rechner. Dieser Rechner wird mit den CAD erstellten Programmen gespeist, welche für diesen Zweck zuerst in einen für ihn lesbaren Maschinencode konvertiert werden.

Die Arbeitsumgebung sollte eine Konstante Temperatur und Luftfeuchtigkeit haben, da diese die Eigenschaften des Betons beeinflussen. Im Allgemeinen ist außerdem eine gute Reinigbarkeit aller Komponenten, sowie die Spülbarkeit von betonführenden Teilen von Vorteil, da ausgehärtete Betonrückstände nur schwierig zu entfernen sind und die Anlage ansonsten in ihrer Funktion einschränken könnten.

Bild 37. Roboter mit seinen Bewegungsachsen

## Roboter



Das Hauptwerkzeug der Anlage ist ein sechsachsiger Roboter. Er ist zusätzlich auf eine Linearachse montiert, um seinen Bewegungsraum in Längsrichtung zum Schaltisch zu vergrößern.

Das Bewegungsfeld des Roboters ist der limitierende Faktor für die Abmaße der druckbaren Werkstücke. Daher sollte die Lage des Schaltisches so gewählt werden, dass dieser sich optimal im Bewegungsfeld befindet. In der Nähe des Tisches ist ein sogenannter Restplace vorgesehen, in welchem der Roboter zwischen den abzufahrenden Druckroutinen verweilt. In diesem können Änderungen oder Reinigungsarbeiten am Druckkopf vorgenommen werden und von ihm herabtropfendes Material wird in einer Wanne, oder ähnlichem aufgefangen. Da lange Standzeiten das Aushärten des Betons in der Förderkette begünstigen, kann dort auch altes Material abgelassen werden.

An seiner letzten Achse angebracht, führt der Roboter den Druckkopf, dessen Düsende als TCP (Tool-Center-Point) deklariert und vermessen ist. Dies bedeutet, dass dieser Punkt als Spitze des Werkzeugs angesehen wird, welches der Roboter entlang der ihm programmierten Bahnen führt. Dabei ist wichtig, dass die Geschwindigkeit des TCP immer in Abstimmung mit der Fördermenge des austretenden Materials und umgekehrt steht, um ein gleichmäßiges Druckbild zu erhalten. Dies betrifft insbesondere Richtungswechsel der Druckpfade und Kurven in Geometrien, da der Roboter dabei abbremst und beschleunigen muss. Schwankt das Verhältnis von Fördermenge zu TCP-Geschwindigkeit, so kommt es zu Unregelmäßigkeiten in der Ausformung der Druckstränge.

Der Druckkopf benötigt einige Zuleitungen (siehe S37 - Druckkopf), welche so um den Roboter geführt werden müssen, dass sie die Anlage in ihrer Bewegung nicht einschränken. Die Tragfähigkeit des Roboters muss so ausgelegt sein, dass er, abgesehen vom Druckkopf, auch diese Leitungen mit ihren Medien tragen kann.

<sup>31</sup> Vgl. philipp aduat + incremental3d showcase experimental objects at milan design week 2018, <<https://www.designboom.com/design/philipp-aduat-incremental3d-milan-design-week-04-04-2018/>>, in <<https://www.designboom.com/>>, 28.9.2018.

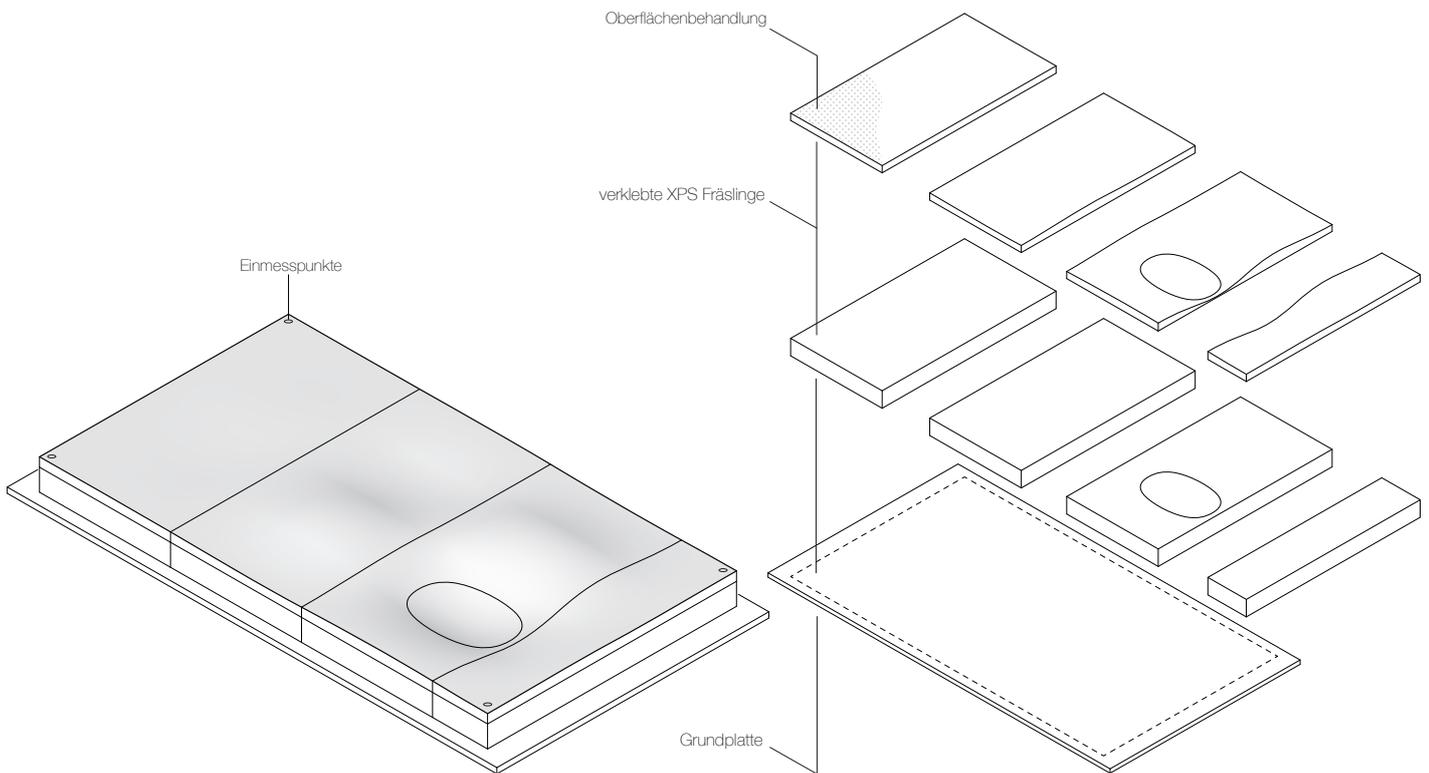
<sup>32</sup> Vgl. Parmann, 2012.

Bild 38. Gefräste Schalung aus XPS für Druckpatten Hexagon

Isometrie der gesamten Schalung

Einzelemente der Schalung

## Schaltisch



Als Oberfläche zur Ablage der Betonstränge dient ein Schaltisch. Dessen Lage muss genau definiert sein, um einen konstanten Abstand zwischen den Druckpfaden und der Schalung zu gewährleisten. Dies gilt im Besonderen, wenn die Schalung eine von einer ebenen Platte abweichende Geometrie besitzt. Dazu können auf ihrer Oberfläche Punkte markiert werden, deren Lage vermessen wird und somit für den Roboter die Position der Schalung im Raum definiert ist. Selbst kleinste Abweichungen oder Unebenheiten ändern den optimalen Abstand des TCP zu seinem Untergrund und schlagen sich somit auf die Qualität der gedruckten Teile nieder.

Ebenen Bauteilen reicht eine gerade Unterlage, für gekrümmte Werkstücke, welche sich nicht im Freidruckverfahren fertigen lassen (siehe S53 - Horizontal- und Vertikaldruck), wird ein Schaltisch in deren entsprechender Form benötigt. Hierbei besteht die Möglichkeit diese aus geeigneten Materialien zu fräsen. Da der gedruckte Beton die Oberfläche seiner Schalung aus-

berst detailliert als Negativ wiedergibt (bei Holzschalungen die Maserung oder bei XPS dessen Poren), ist darauf zu achten, dass bei einer gewünschten ebenmäßigen Oberfläche die Schalung z.B. durch Schleifen entsprechend nachbearbeitet wird.

Als weitere Möglichkeit wurde bei der Fertigung einer mittels 3DCP hergestellten Liege vom Unternehmen Incremental3D die Schalung selbst aus Beton gedruckt.<sup>31</sup>

Grundsätzlich ist eine Schalung wünschenswert, welche keine zusätzlichen Abfälle produziert. Dabei stellen eine Alternative zu gefrästen Formen, Schalungen aus gepresstem und ölgebundenem Formsand dar. Dieser sollte im besten Fall wiederverwendbar sein.<sup>32</sup> Optimaler Weise wäre ein verstellbarer Schaltisch anzudenken, welcher sich immer wieder in eine gewünschte Form bringen lässt.

Für Hinterschnidungen die Unterstützung benötigen, können gefräste Ausparungskörper oder Stützsand verwendet werden, welche wie die restliche Schalung exakt

platziert werden müssen.

Wichtig bei allen Komponenten ist die chemische Beständigkeit gegenüber dem Beton. Insbesondere Holz muss entsprechend geschützt werden, da es sonst Risse bildet, welche bei Wiederverwendung der Schalung ohne Wiederaufbereitung, eine verschlechterte Bauteiloberfläche mit sich führen würde. Weiters müssen die Materialien so gewählt sein, dass sie bei großen Bauteilen deren Gewicht standhalten.

Um ein einfaches Ausschalen der ausgehärteten Druckteile zu gewährleisten, sollte die Schalung im Vorhinein mit Schalöl benetzt werden. Dieses vermindert das Anhaften des aufgetragenen Betons. Bei gekrümmten Formen mit starken Steigungen ist dabei zu beachten, dass an diesen die frisch abgelegten Betonstränge so gut anhaften müssen, dass sie nicht auf der Oberfläche abrutschen.

Bild 39. Einzelteile der Mischerpumpe

### Mischerpumpe

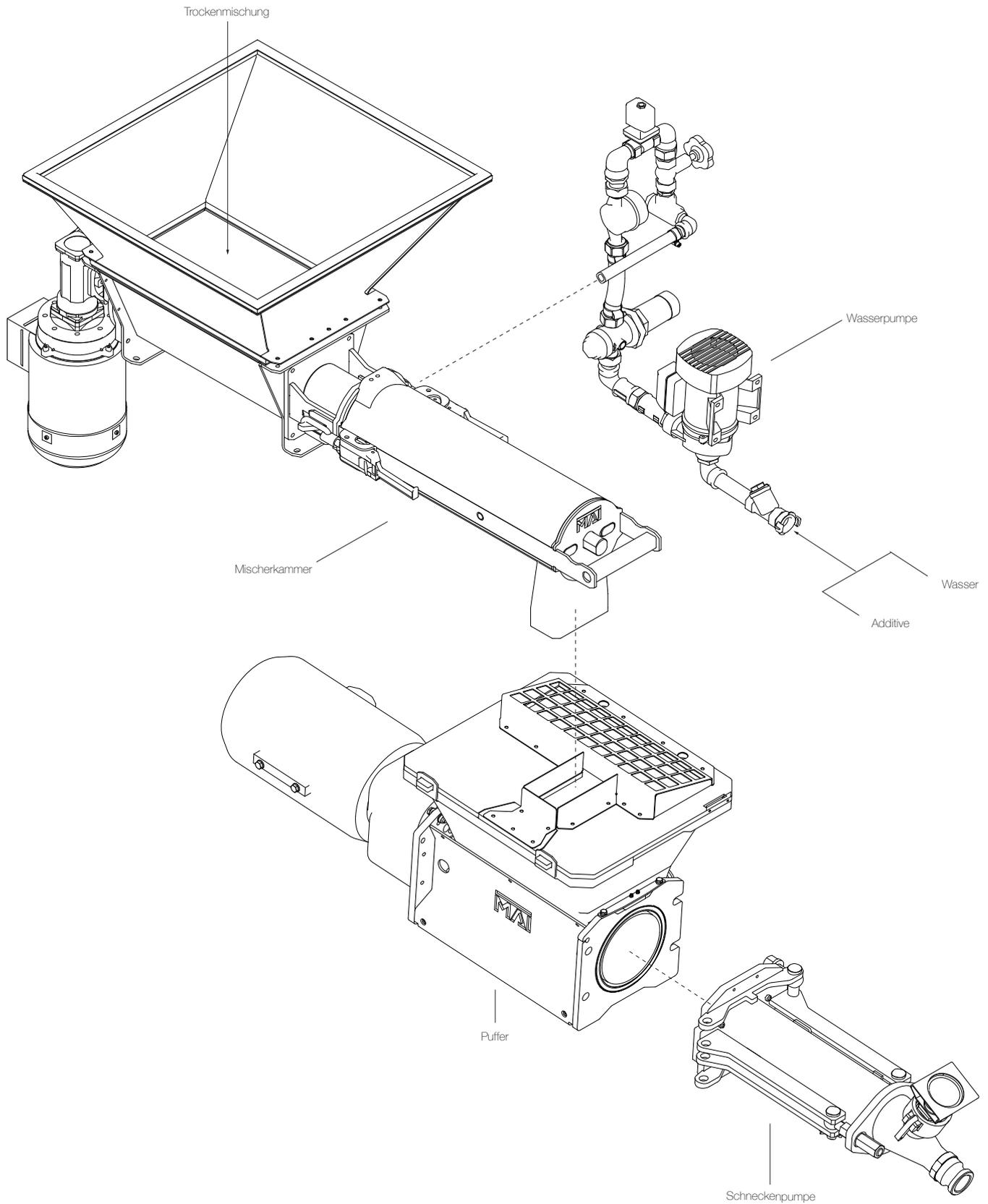
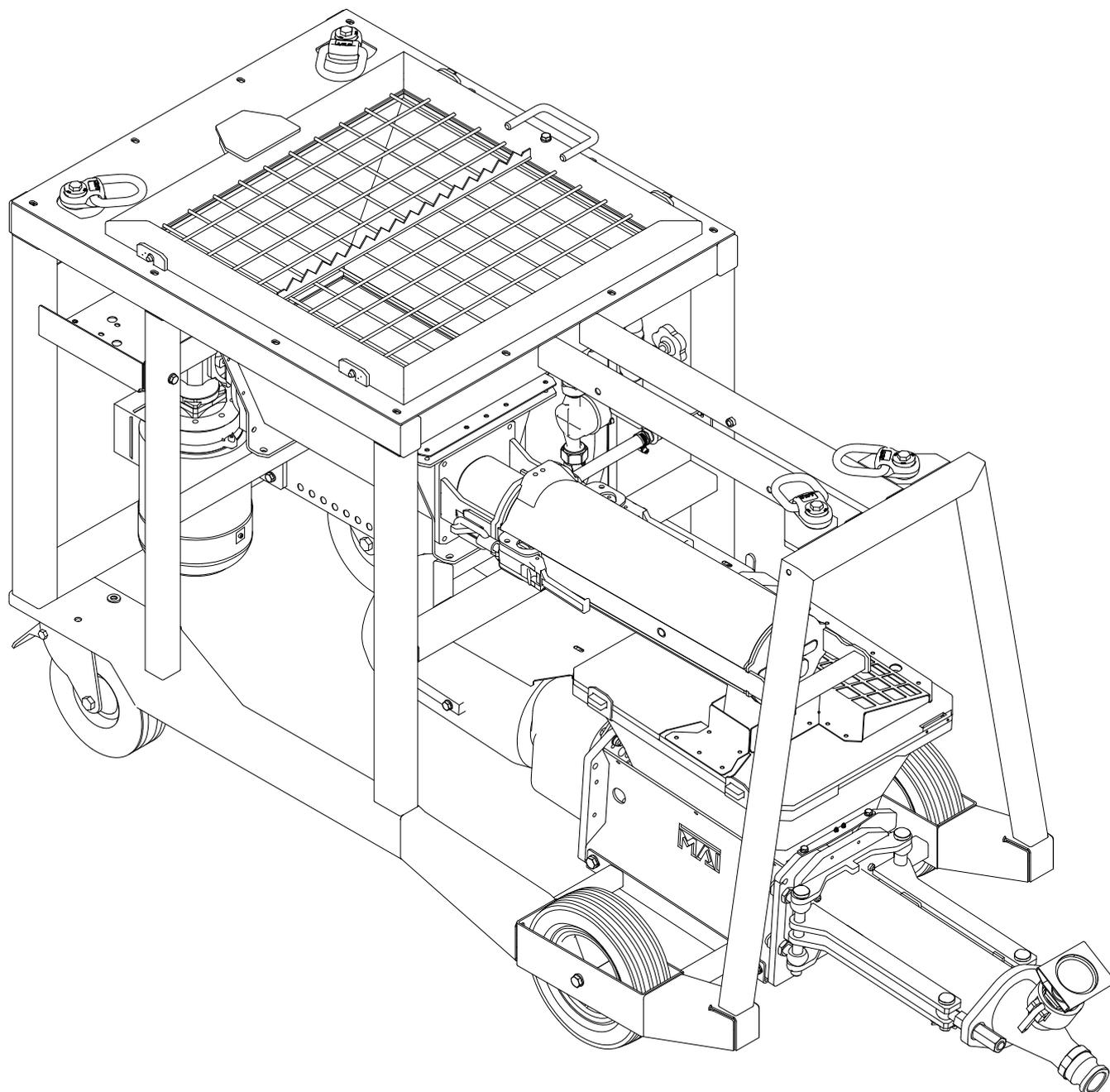


Bild 40. Mischerpumpe



Zur Bereitstellung und Förderung des Flüssigbetons kommt eine Kombination aus einem Mischer und einer anschließenden Pumpe zum Einsatz. Ihr ursprünglicher Verwendungszweck war die Herstellung und Förderung von Spritzbeton. Im Gegensatz zu ihrer konventionellen Nutzung, belaufen sich die Fördergeschwindigkeiten dabei beim 3DCP um vieles niedriger.

Die Aufgabe der Mischerpumpe ist im ersten Schritt, eine homogene Masse aus

einer zugeführten Betontrockenmischung und Wasser mit optional beigemengten flüssigen Additiven, in einer Mischerschnecke zu erstellen. Diese Mischung wird in einem Pufferspeicher aufgefangen und mittels eines Rührwerkes permanent in Bewegung gehalten. Dies verhindert ein Entmischen von Wasser und Zement und verlängert die Zeit der Förderbarkeit. Im nächsten Schritt wird der Beton einer Schneckenpumpe zugeführt, welche für

die Förderung des Betons zuständig ist.

Die wichtigsten Faktoren für die Mischerpumpe sind, dass ein konstantes Mischverhältnis der einzelnen Komponenten gewährleistet, sowie eine homogene Mischung gewährleistet wird. Die Pumpgeschwindigkeit soll präzise steuerbar sein und ebenfalls keinen Schwankungen unterliegen, da an der Druckdüse bereits geringe Änderungen große Auswirkung haben.

Bild 41. Einzelteile des Druckkopfes

Druckkopf

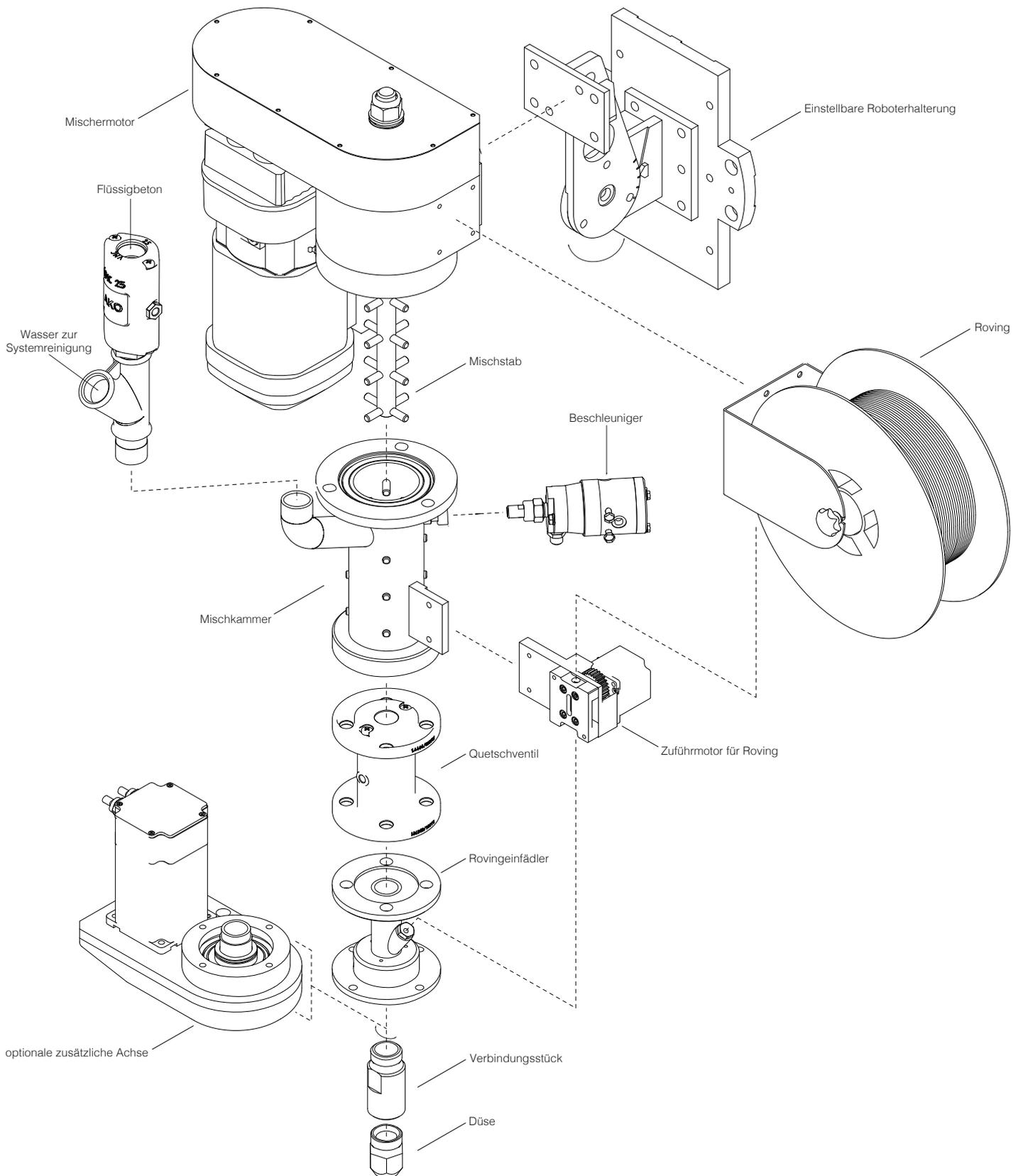
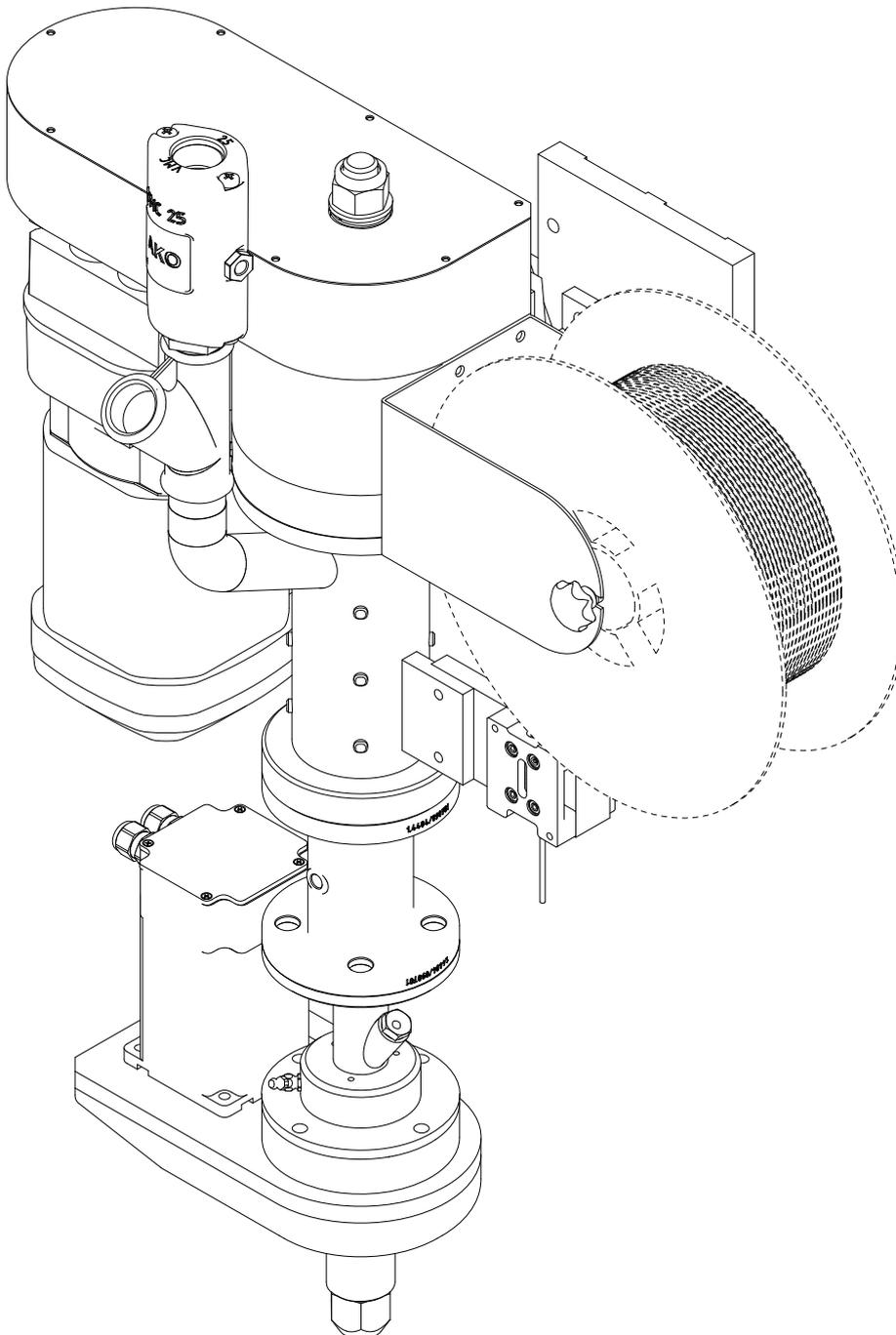


Bild 42. Druckkopf



Die gezielte und gleichmäßige Ablage des Betonstranges erfolgt durch den Druckkopf.

An seinem Ende besitzt er eine Düse, aus welcher der Beton austritt der zu einem Druckstrang geformt wird. Bei einer nicht kreisrunden Form muss die Düse mit einer zusätzlichen Bewegungsachse, mit der bevorzugten Lage am Ende des Druckkopfes, immer gleich zur Verfahrrichtung ausgerichtet sein. Um in verschiedenen Dicken drucken zu können, ist ein Austausch der Düse möglich. Es wäre denkbar, eine Düse mit verstellbarem Durchmesser einzusetzen.

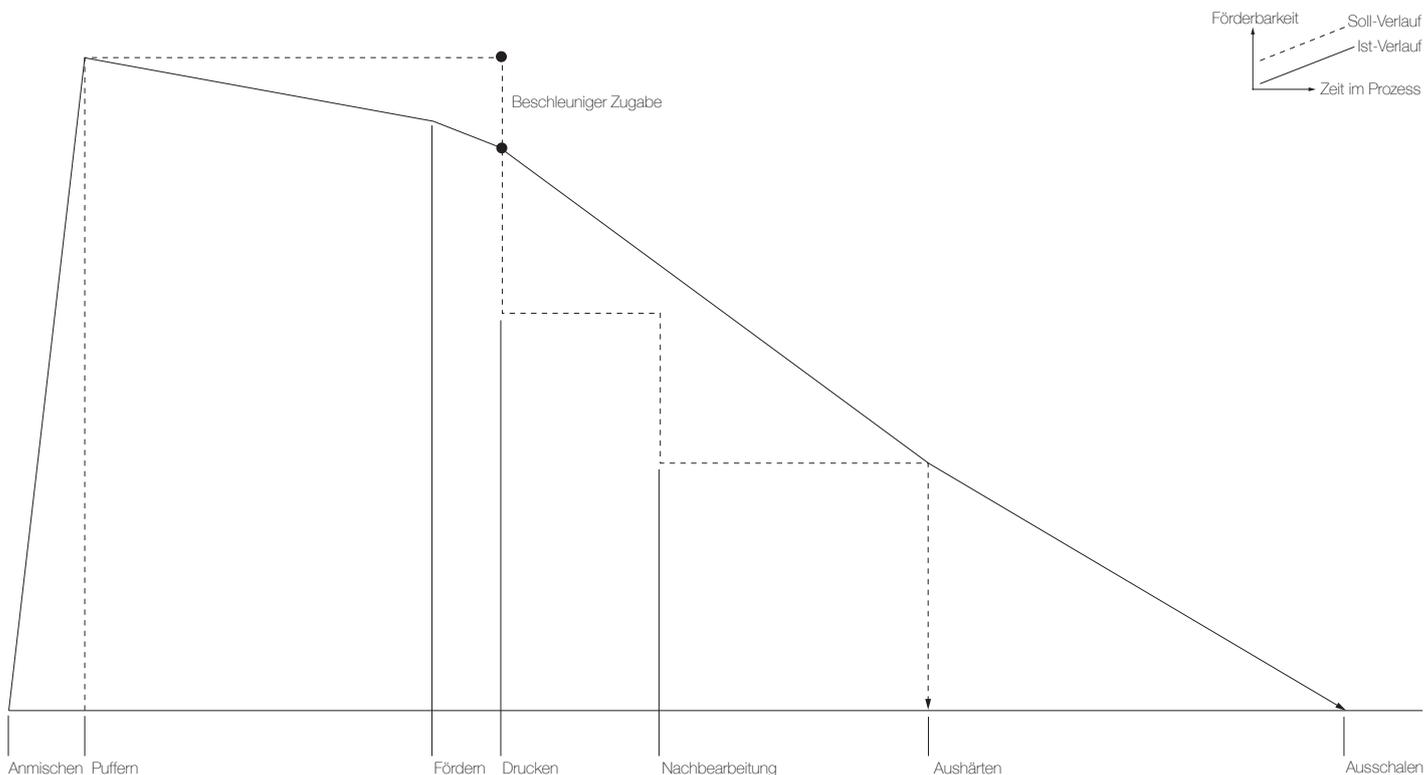
Um den Druckstrang zu unterbrechen bzw. gezielt starten zu können, wird aufgrund der Trägheit des Systems ein Quetschventil benötigt, welches innerhalb des Druckkopfes den Materialfluss unterbricht. Als schwierig stellt sich dabei das Zurückhalten des sich unter dem Quetschventil befindlichen Materials dar, welches nach dem Schließen noch nachfließen kann.

Dem Druckkopf wird des Weiteren durch einen Einfädler die Bewehrung (siehe S40 - Bewehrung) zugeführt, welche er zentriert in die Mitte des Druckstranges integriert. Die stetige Förderung der Bewehrung wird durch den entstehenden Zug des ausfließenden Materials gewährleistet. Zusätzlich besteht die Möglichkeit das Roving durch einen Antrieb vorzuschieben. Um es zu ermöglichen Bewehrung nur dort im Bauteil zu verteilen, wo sie benötigt wird, wäre zusätzlich noch ein Abscheider nötig, welcher das Roving an der gewünschten Stelle unterbricht.

Um ein schnelles Aushärten des gedruckten Betons zu gewährleisten besteht die Möglichkeit, im Druckkopf dem flüssigen Beton einen Beschleuniger beizumengen. Für die homogene Mischung der Komponenten sorgt dabei ein integrierter Mischstab. Da es bei Standzeiten schnell zum Verstopfen der betonführenden Leitungen kommen kann, wird eine Möglichkeit zum Spülen und somit zum Befreien von jeglichen Betonresten der betroffenen Teile benötigt.

Bild 43. Festigkeitsverlauf der Betonmischung über den gesamten Prozess

## Beton



Um möglichst gute Druckergebnisse zu erzielen, ist eine Betonmischung mit einer Vielzahl verschiedener Eigenschaften nötig.

Der zu verarbeitende Beton muss gute Fließeigenschaften aufweisen, um leicht förderbar zu sein. Er soll das enthaltene Wasser gut binden können, dass dieses unter Druck nicht ausgepresst wird. Diese Gefahr besteht in der Schneckenpumpe (siehe S35 - Mischerpumpe) und in Bereichen mit verminderten Querschnitt, da hier höhere Drücke als in der restlichen Förderkette herrschen. In weiterer Folge kann dies zu Verstopfungen führen, da sich dann der Druck durch die entstehende Reibung weiter erhöht und damit auch die Temperatur steigt, sodass das Wasser gänzlich ausgedrückt wird und gegebenenfalls sogar verdampft.

Eine lange Verarbeitungszeit ist ebenfalls wichtig, da es im Prozess immer wieder zu Standzeiten kommt. In diesen Fällen muss gewährleistet sein, dass der im System enthaltene Flüssigbeton nichts an seiner Förderbarkeit verliert.

Wird er hingegen durch die Düse an seinem Bestimmungsort abgelegt, sollte er so schnell wie möglich aushärten und seine ihm gegebene Strangform beibehalten. Gleichzeitig muss er aber auch eine Verbindung mit den bereits abgelegten Bahnen und den noch folgenden eingehen können, um die Festigkeit des entstehenden Druckteils zu gewährleisten.

Ziel ist, dass über diese Verbindungen die gleiche Kraftübertragung herrscht, wie in den einzelnen Strängen, um somit ein homogenes Gefüge zu erreichen.

Nach Abschluss und schon während des Druckprozesses beginnt die Aushärtung des gefertigten Bauteils. Dabei zieht der Beton von seiner Umgebungsluft Wasser. Ist hier nicht ausreichend vorhanden, können sich Risse bilden.

Dieser Rissbildung kann mit einer ausreichenden Luftfeuchtigkeit der Arbeitsumgebung, sowie dem Benetzen mit Wasser der Druckteile und dem Abdecken bis zu ihrer fertigen Aushärtung mit Kunststoffplanen

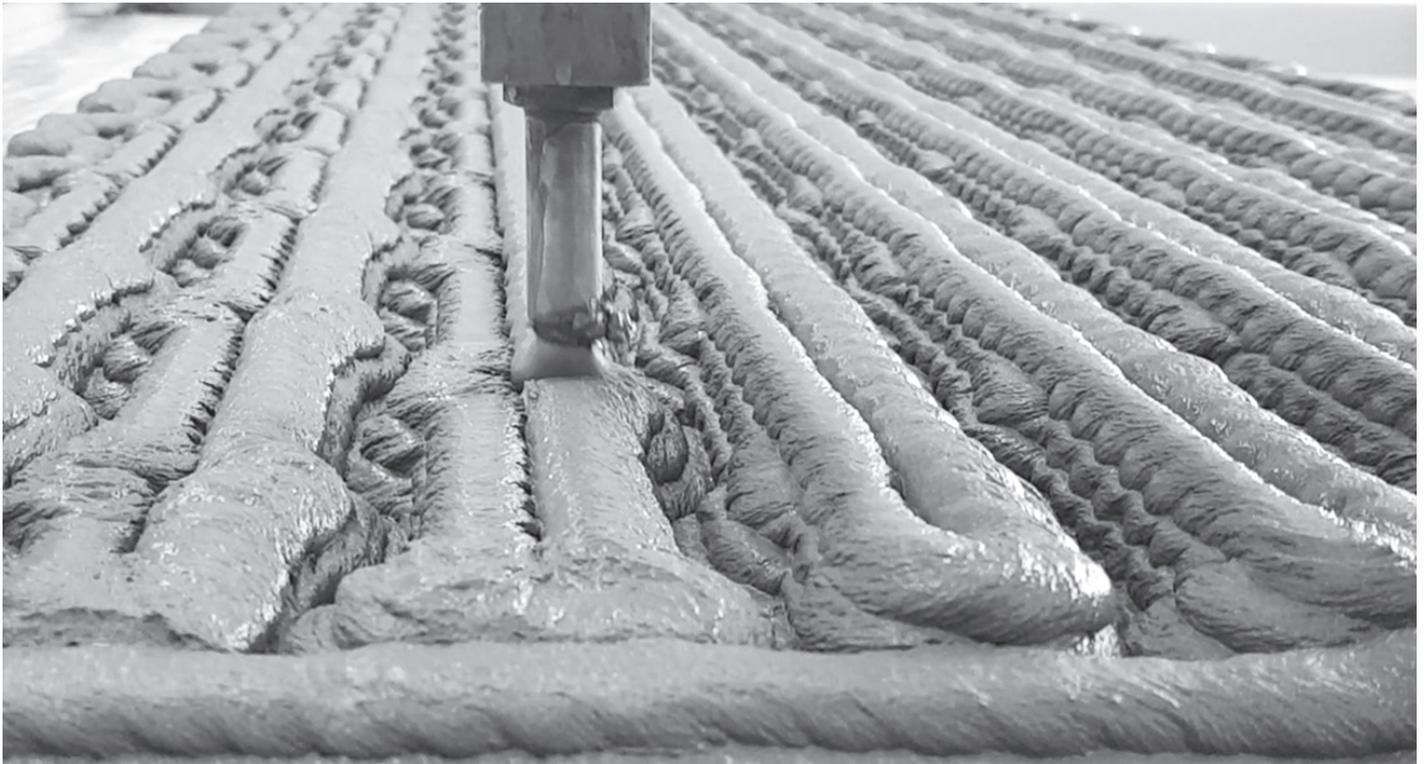
entgegen gewirkt werden.

Die optimale Bindung von Wasser im Flüssigbeton wird unter anderem durch die Verwendung von besonders feinen Stäuben in der Trockenmischung erreicht. Diese benötigen besondere Sicherheitsmaßnahmen in ihrer Handhabung, da sie so fein sind, dass sie teilweise gesundheitsschädlich sind. Schnelle Aushärzeiten und gute Pumpeigenschaften können durch chemische Zusätze im beigemengten Wasser, sowie durch zugemischte Beschleuniger im Druckkopf erreicht werden.

Bild 44. Bewehrte Betonbahnen

Die Stirnseiten der Bahnen zeigen eine Strukturierung auf, welche durch die zugeführte Bewehrung entsteht

## Bewehrung



Die in der Anlage verwendete fadenförmige Bewehrung, genannt Roving, wird konzentrisch in die Betonstränge eingelegt. Dies geschieht im Druckkopf vor der Düse. Beim Austritt aus der Düse muss sich diese im Betonstrang um einen geringen Radius biegen können, um ihre Position zu den Rändern des Stranges einzuhalten. Daher benötigt sie eine hohe Biegsamkeit und einen möglichst geringen Querschnitt.

Diese Eigenschaften sollen mit einer hohen Zugfestigkeit einhergehen, um die auftretenden Zugkräfte in den fertigen Bauteilen aufzunehmen. Dabei müssen sie eine kraftschlüssige Verbindung und einen sicheren Verbund mit dem umliegenden Beton eingehen, um eine Aktivierung des Rovings bei Krafteinwirkung auf das Bauteil zu gewährleisten.

Des Weiteren ist es wichtig, dass sie im Lastfall keine Längsdehnung besitzen, da im Falle der Belastung eines bewehrten Werkstücks, erst nach erheblicher Rissbildung die Rovings aktiviert werden würden. Diese könnten dadurch erst zu spät die

auftretenden Zugkräfte aufnehmen. Beim Aushärten der Druckteile vermindern eingebrachte Rovings die Rissbildung. Da es beim 3DCP zu einer sehr geringen Überdeckungsschicht des Betons über die Bewehrung kommt, ist es wichtig, dass diese, abgesehen von einer chemischen Beständigkeit gegenüber des Betons, ebenfalls eine hohe Korrosionsbeständigkeit aufweist.

Um ein zuverlässiges Zuführen der Bewehrung in den Betonstrang zu ermöglichen, ist zu beachten, dass diese nicht ausfranst und sich leicht fädeln lässt, da sie durch ein feines Rohr zugeführt wird, welches mit seinem geringen Durchmesser verhindert, dass der sich in dem Druckkopf befindliche Beton durch diese Öffnung hinaus gedrückt wird. Zu beachten ist, dass beim Eintreten des Rovings in den Druckkopf Reibung entsteht, welche feine Staubpartikel freisetzt.

Phänomen von Aufgenommenen Verwirbelungen der Fördersäule:

Einer zum jetzigen Zeitpunkt noch ungeklärter Punkt ist bei dieser Methode des Einbringens der Bewehrung, insbesondere bei dem hier verwendeten Anlagenbau, das Aufnehmen der durch das Extrudieren des Betons entstehenden Verwirbelungen im geförderten Beton. Dies macht sich in einer verdrehten Ausformung mit undefinierten Rändern des abgelegten Betonstranges bemerkbar.

Abhilfe zu diesem Phänomen könnte ein Bremsen des Rovings in der Zuführung bieten, indem der auf ihm lastenden Zug, ihm es nicht mehr ermöglicht, Verwirbelungen im Förderrohr so leicht zu folgen. Ist dies nicht ausreichend, so könnte im weiteren Schritt die Verwendung einer anderen Fördermethode des flüssigen Betons angedacht werden, welche sich keinem Extruder bedient, der als Ursprung des in der Fördersäule entstehenden Dralls vermutet wird.

Bild 45. Verlauf der Erstellung von Druckdaten vom Entwurf bis zur Fertigung

## Daten

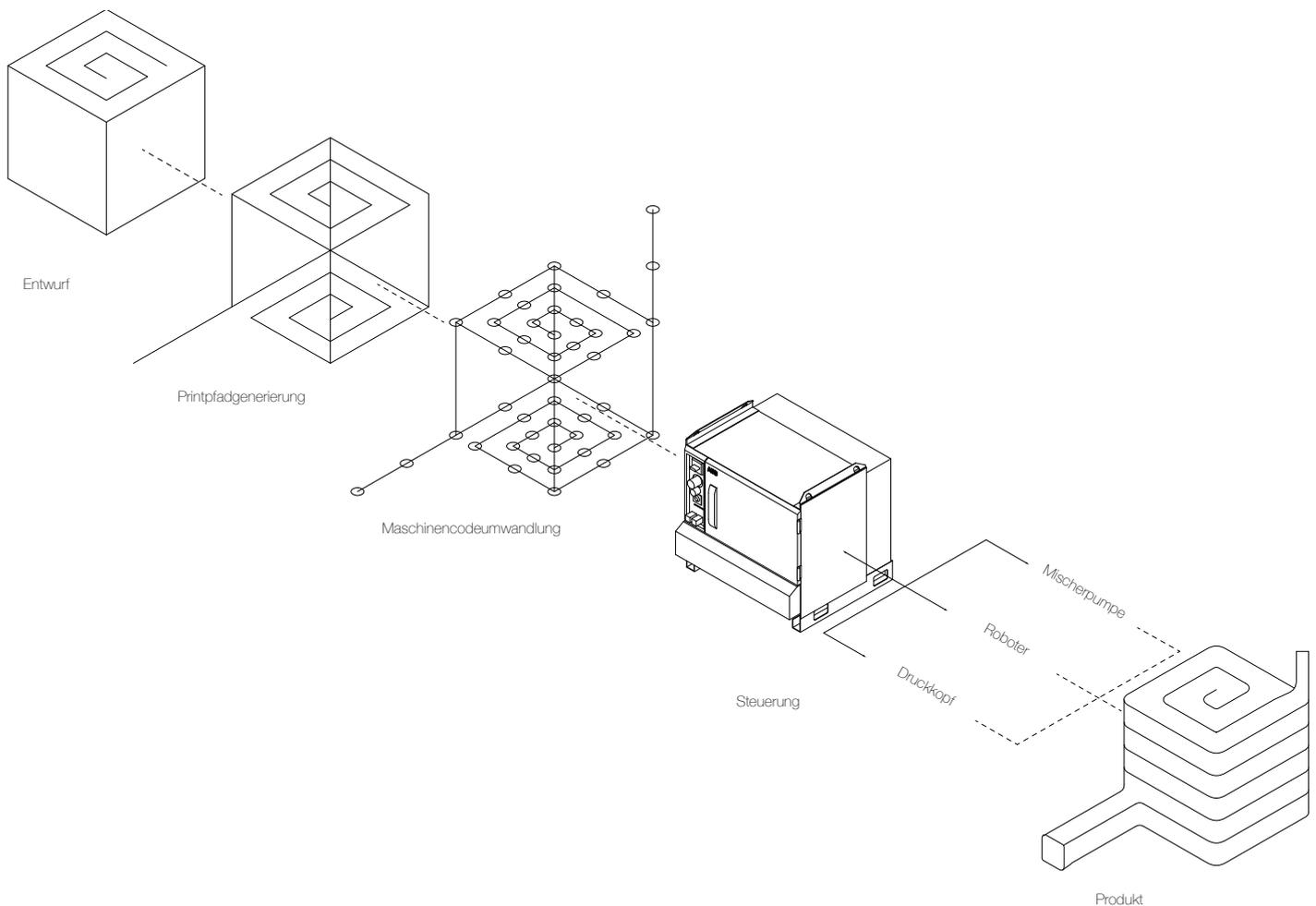


Bild 46. Timeline der Herstellung eines 3DCP Bauteils

Als digitale Fertigungsmethode ist 3DCP eng mit dem Entwerfen in 3DCAD Programmen verknüpft. Die dabei erstellten Geometrien sind in Printpfade umzuwandeln. Diesen Punkt übernehmen beim herkömmlichen 3DPrint mit Kunststoffen sogenannte Slicer, welche den Bauteil in Schichten aufteilen und diese mit Druckpfaden verfüllen. Im 3DCP fehlen diese Werkzeuge noch, bzw. sind die bestehenden Werkzeuge für 3DPrint, aufgrund der

höheren Strangdicken nur bedingt einsetzbar.

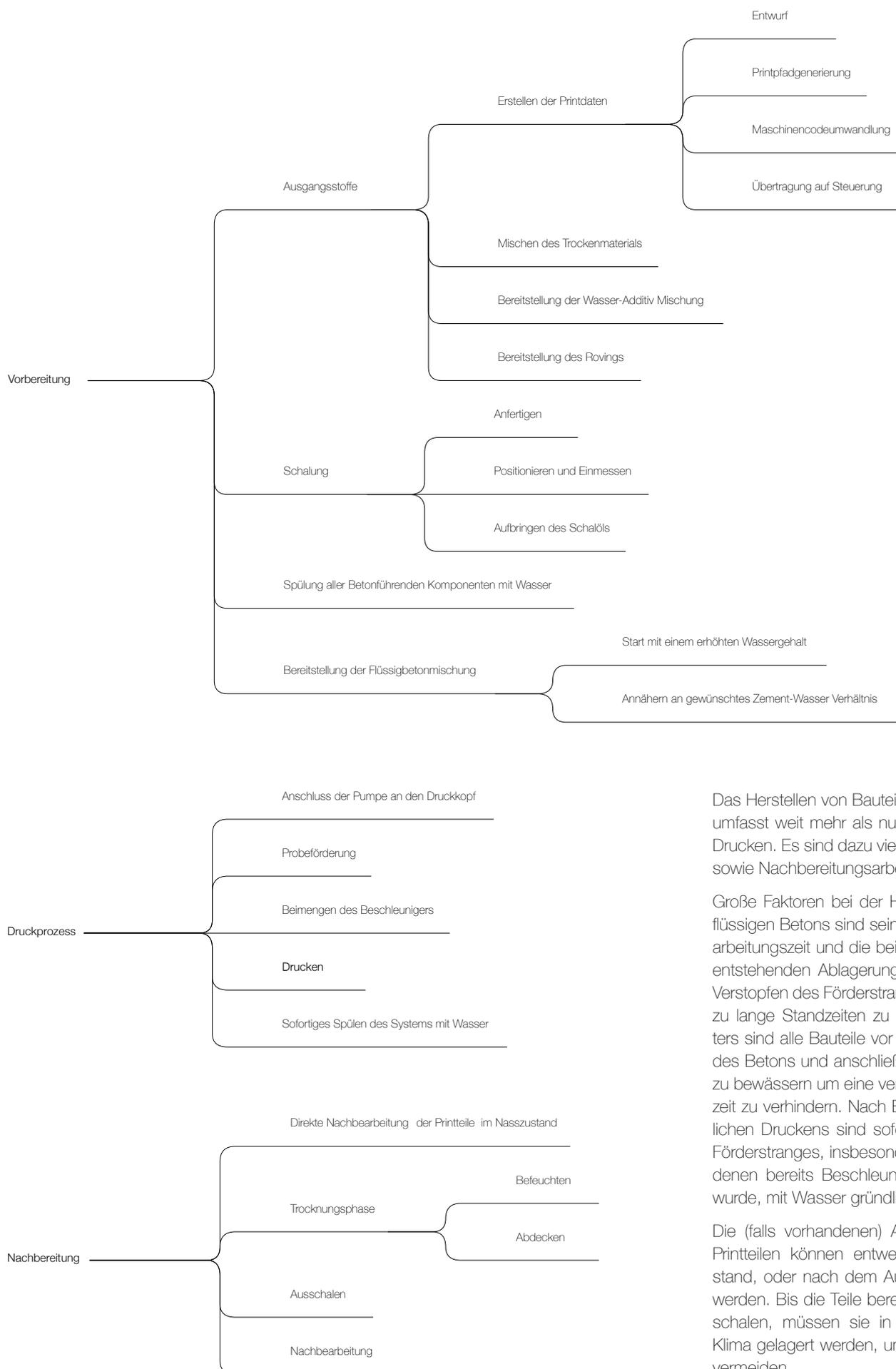
Daher ist es ratsam, schon im Entwurfsprozess die herrschenden Parameter zu berücksichtigen (siehe S43 - Entwerfen in Strängen).

Die erstellten Printpfade werden im folgenden Schritt in einen für die Steuerung lesbaren Maschinencode umgewandelt. Dabei werden die Pfade zu einzelnen Punkten

aufgelöst, welche vom Roboter angefahren werden. Mit der dazu verwendeten Software besteht die Möglichkeit der Simulation des Druckprozesses und der damit einhergehenden Kollisionserkennung.

Der erhaltene Maschinencode wird anschließend auf eine Steuerung übertragen, welche die einzelnen Komponenten der Anlage während des Druckvorganges kontrolliert und mit denen sie in ständigem Datenaustausch steht.

## Druckprozess



Das Herstellen von Bauteilen mittels 3DCP umfasst weit mehr als nur das eigentliche Drucken. Es sind dazu viele Vorbereitungs- sowie Nachbereitungsarbeiten nötig.

Große Faktoren bei der Handhabung des flüssigen Betons sind seine begrenzte Verarbeitungszeit und die bei Nichtbeachtung entstehenden Ablagerungen, bis hin zum Verstopfen des Förderstranges. Daher sind zu lange Standzeiten zu vermeiden. Weiters sind alle Bauteile vor dem Anmischen des Betons und anschließendem Fördern, zu bewässern um eine verkürzte Aushärtezeit zu verhindern. Nach Ende des eigentlichen Druckens sind sofort alle Teile des Förderstranges, insbesondere Bereiche, in denen bereits Beschleuniger beigemischt wurde, mit Wasser gründlich zu spülen.

Die (falls vorhandenen) Angüsse an den Printteilen können entweder im Nasszustand, oder nach dem Aushärten entfernt werden. Bis die Teile bereit sind zum Ausschalen, müssen sie in einem feuchten Klima gelagert werden, um Rissbildung zu vermeiden.



Entwerfen in Strängen

Bild 47. Schalungsseite einer gedruckten Gitterstruktur

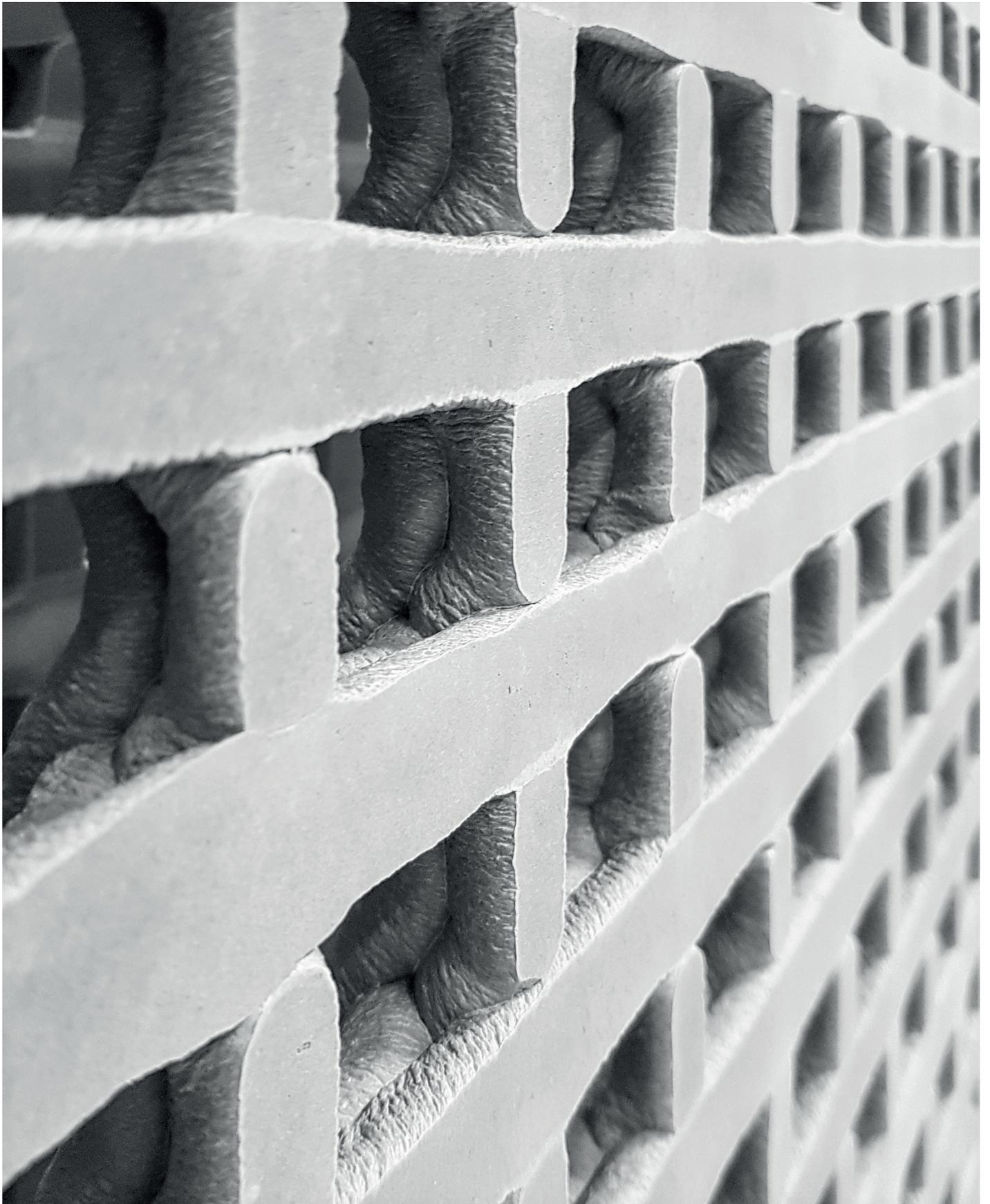
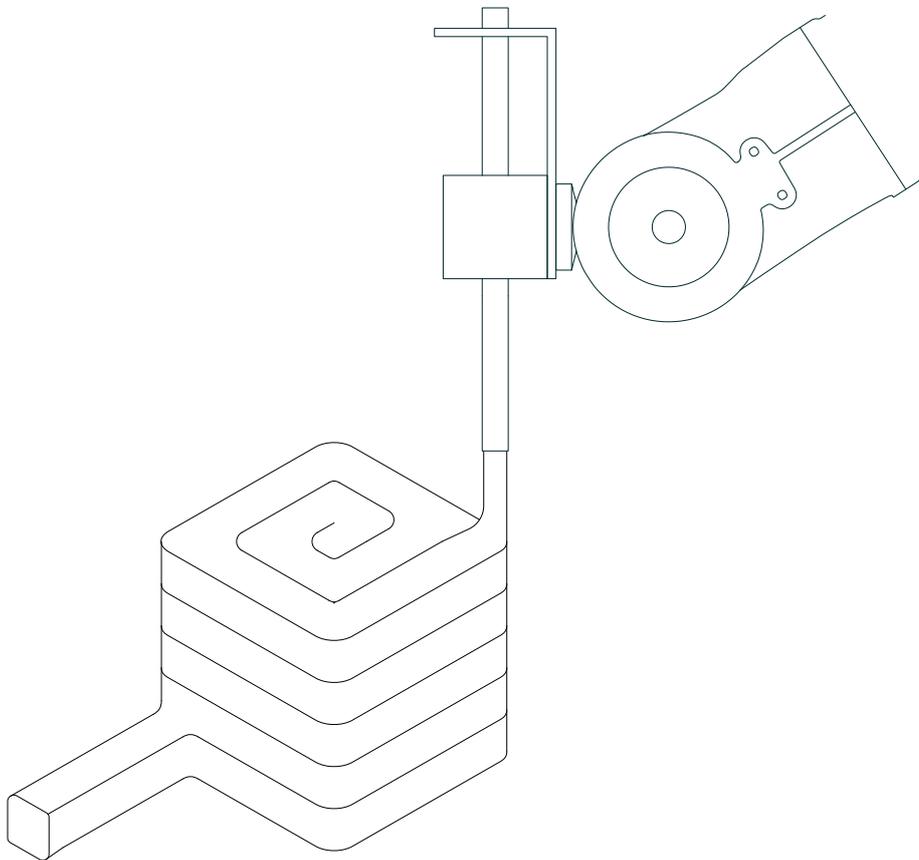


Bild 48. Schematisches Drucken eines Quaders



Wie bei jeder Herstellungsmethode herrschen auch beim 3DCP gewisse prozessbedingte Parameter, welche eingehalten werden müssen und bereits im Entwurfsprozess bedacht werden sollten.

Ausgangspunkt des Entwurfes ist der Druckpfad.

Denn grundlegend gilt: Die fertigen Bauteile ergeben sich aus der Addition von einzelnen Betonbahnen. Dabei werden die Bahnen in der Horizontalen nebeneinander gelegt, sodass sich diese genug berühren, um einen nahezu nahtlosen Übergang zu schaffen. Ist eine horizontale Lage fertiggestellt, so wird die nächste darauf gelegt, mit dem selben Ziel des nahtlosen Überganges.

Herkömmliche, aus dem Kunststoff 3DPrint stammende Softwarewerkzeuge wie Slicer, stoßen bei dem Verfahren an ihre Grenzen, da die Druckstränge um ein Vielfaches größer sind und die exakten Bahnabstände genauer eingehalten werden müssen, da Kreuzungspunkte und Überschneidungen

schnell zu unzufriedenstellenden Ergebnissen führen können.

Zu verfüllende Flächen müssen, in welchen Bahnen auch immer, abfahrbar sein und zwar so, dass sie ganzheitlich ausgefüllt werden. Genau diese Abfahrbarkeit und Zerlegung in Druckpfade ist die große Herausforderung des Verfahrens. Daher sollte dies von der ersten Entwurfsphase an bedacht und konsequent verfolgt werden.

Um die Festigkeit der fertigen Bauteile zu gewährleisten sei zu bedenken, dass in den einzelnen Schichten die Bewehrungen immer in Strangrichtung verlaufen. Daher ist es ratsam, diese von Schicht zu Schicht auszukreuzen, bzw. diese in die Richtung der auftretenden Zugkräfte zu verlegen.

Maßgeblich für die maximal herstellbaren Abmaße der Bauteile ist der Arbeitsbereich des Roboters. Dieser fällt umso mehr ins Gewicht, wenn vom Roboterarm abgewandte Krümmungen zu bearbeiten sind, da sich in diesem Fall der Bereich verkleinert. Bei abzufahrenden Krümmungen sind

die Radien so zu wählen, dass Bauteile des Druckkopfes und Roboterarms nicht auf der gegenüberliegenden Oberfläche kollidieren.

Charakteristisch für das Verfahren des 3DCP sind die Oberflächen der gefertigten Körper. Diese weisen auf der im Druckprozess unterliegenden Seite eine glatte, ebenmäßige Struktur auf, welche die ursprünglich abgelegten Druckstränge nur leicht zu erkennen gibt, sowie die Oberfläche der verwendeten Schalung. Die vom Schaltisch abgeneigte Seite des Körpers weist eine raue reliefartige Zeichnung auf, welche den Verlauf der Druckpfade wiedergibt.

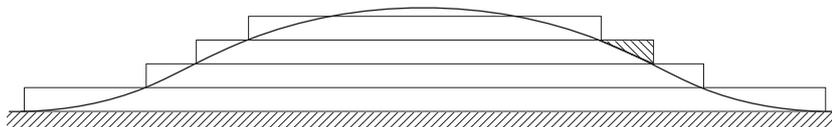
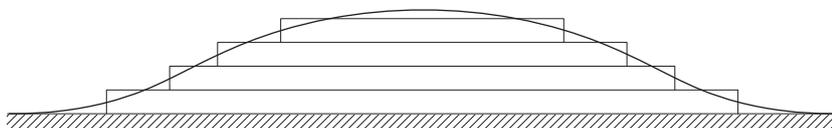
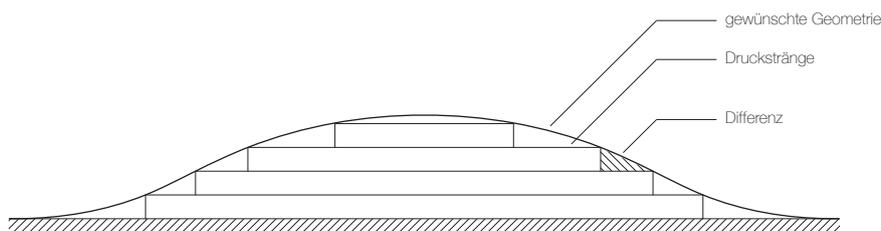
Bild 49. Möglichkeiten der Annäherung an eine gewünschte Geometrie mittels Approximation

Minimaler Materialaufwand

Über- und Unterschneidung der gewünschten Geometrie

Maximaler Materialaufwand

## Approximation



Da beim 3DCP die Geometrien in Pfade und Schichten aufgelöst werden, kommt es immer nur zu einer Annäherung an die gewünschte Geometrie.

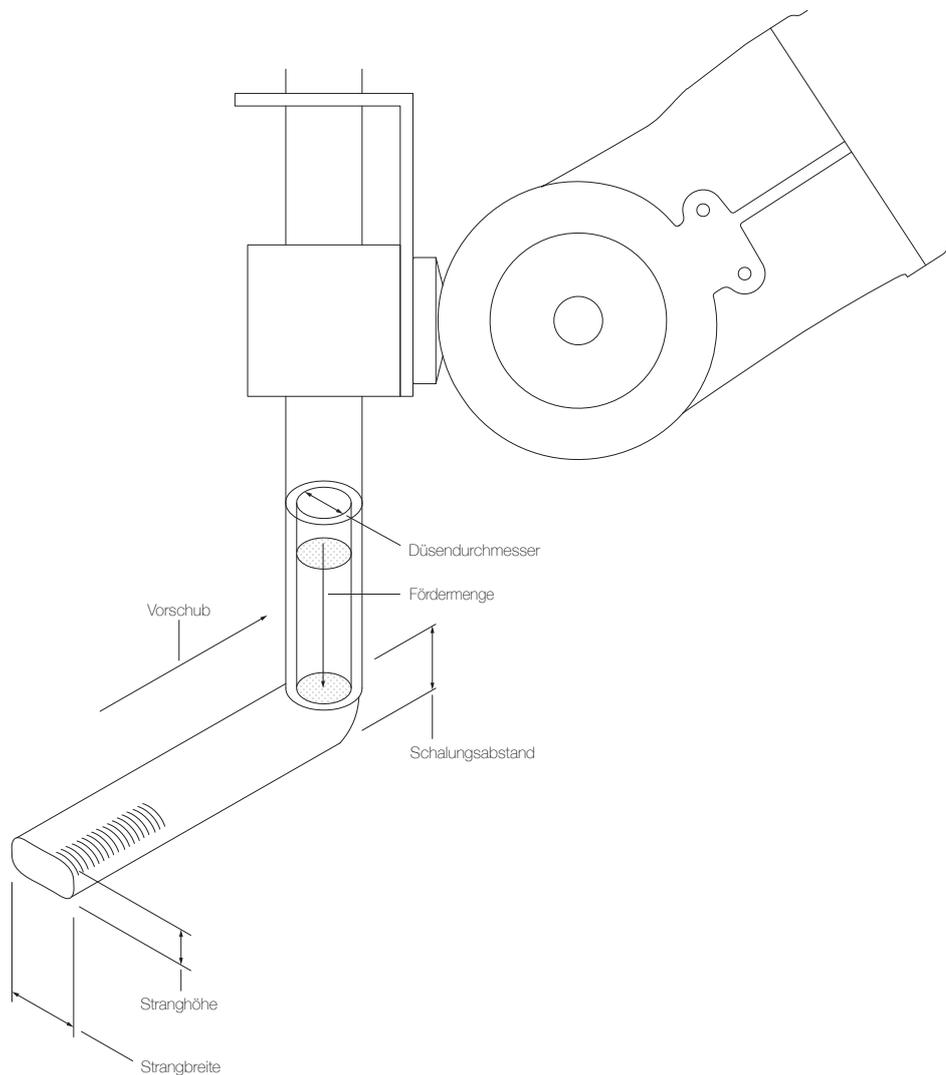
Die entscheidenden Faktoren dabei sind die Abmessungen der Druckstränge. Die Größe der Stränge kann als Auflösung angesehen werden. Je feiner diese gewählt ist, umso mehr Strängen besteht die gedruckte Geometrie bei gleichzeitig größerer Annäherung an die erdachte Form.

Daher besitzen gekrümmte Körper immer eine gewisse Abtreppung in Abhängigkeit der Stranggröße.<sup>33</sup>

Bei der Annäherung an Krümmungen kommt es zu Bereichen die entweder ein Über- oder Untermaß besitzen. Des Weiteren besteht eine höher aufgelöste Geometrie aus einem längeren Druckpfad. Dadurch entsteht bei gleichbleibender Verfahrensgeschwindigkeit des Druckkopfes eine längere Fertigungsdauer des Bauteils.

Vom Entwerfenden ist daher zu entscheiden, welche Annäherung sich zur gewünschten Anwendung des Bauteils am besten eignet und inwieweit das Verhältnis von Auflösung zu Fertigungszeit eine Rolle spielt.

Bild 50. Ablegen eines Druckstranges und die dabei relevanten Variablen



Ein entscheidender Faktor zur Herstellung von 3D-gedruckten Bauteilen ist die Querschnittsform der einzelnen Betonstränge. Diese ergibt sich grundlegend aus dem Verhältnis von Vorschubgeschwindigkeit, sprich die Geschwindigkeit des TCP, zu Betonfördergeschwindigkeit.

Je schneller sich der TCP bewegt, desto dünner wird der Strang bei gleichbleibender Förderleistung und umgekehrt. Der Abstand der Düse zum Druckuntergrund, sei

es die Schalung oder ein bereits gedruckter Layer, bestimmt die Höhe des Stranges. Da die Düse das austretende Material auch in die Breite drückt, beeinflusst der Abstand ebenfalls die Breite und zwar wiederum in Abhängigkeit der Förderleistung.

Das Breitdrücken des Druckstranges ist insofern nötig, da er mit einem darunterliegenden Layer eine zuverlässige Verbindung eingehen soll. Hierbei reicht es nicht, dass der Druckstrang nur aufgelegt

wird, sondern er sollte mit einem gewissen Druck aufgebracht werden.<sup>34</sup>

Die Parameter für eine Strangform, welche sich optimal in ihrer Ausformung addieren lässt, wurden bisher auf experimentellen Weg erarbeitet. Daher basieren die Werte, welche bei der Fertigung der im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Druckteile herangezogen wurden, auf Erfahrungen.

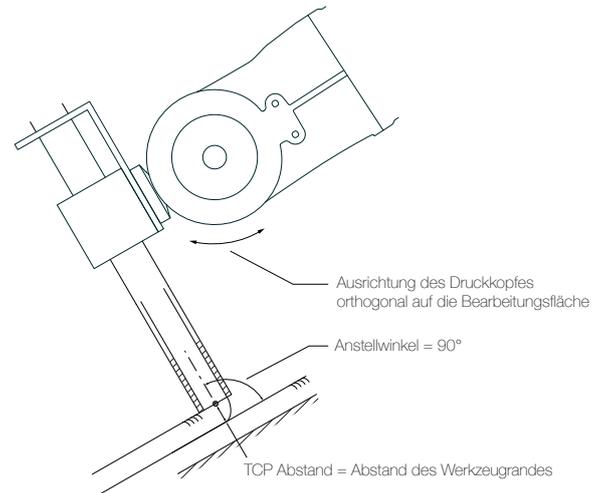
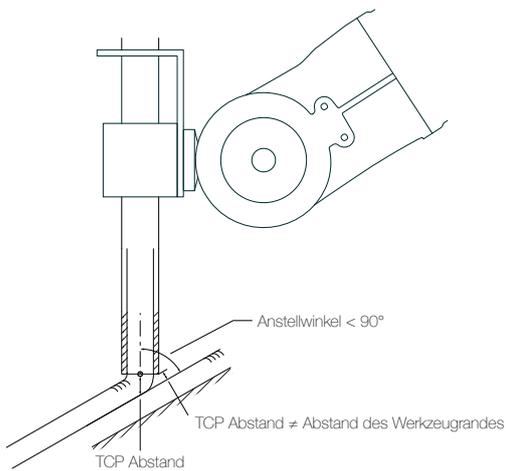
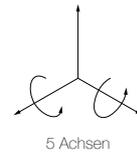
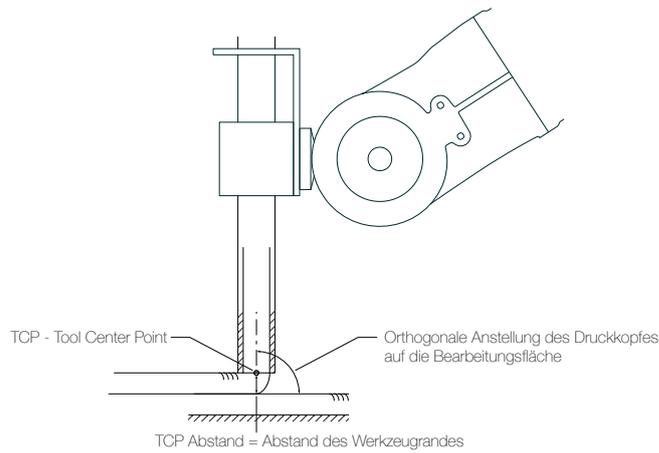
Bild 51. Positionierung des Druckkopfes

Drucken auf horizontaler Fläche

Drucken auf schräger Fläche mit dreiachsiger Positionierung

Drucken auf schräger Fläche mit fünfachsigiger Positionierung

## Positionierung



Grundsätzlich gilt, dass die Druckdüse für ein gleichmäßiges Druckbild orthogonal auf die zu bedruckende Fläche ausgerichtet ist.

Deren Positionierung kann je nach verwendetem Roboter bzw. verwendeter Anlage auf zwei Arten erfolgen. Eine dreiachsige Anlage kann rein in x-, y- und z-Achse verfahren, wobei sich die Ausrichtung der Düse dabei nicht verändert. Bei der Verwendung einer fünfachsigener Anlage be-

steht zusätzlich die Möglichkeit, die Düse um die x- und y-Achse rotieren zu lassen.

Bei horizontalen Flächen sind drei Bewegungsachsen ausreichend. Sind jedoch Krümmungen in vertikaler Richtung abzufahren, besteht bei der dreiachsigen Ausrichtung nicht die Möglichkeit, den Druckkopf orthogonal auszurichten. Dabei wandert der in Vorschubrichtung vorne liegende Rand der Düse näher an die Bearbeitungsfläche. Dies kann bis zu einer Kollisi-

on mit der Schalung, oder eines darunter liegenden Layers führen. Daraus folgt im schlechtesten Fall eine qualitative Minderung des Druckbildes.

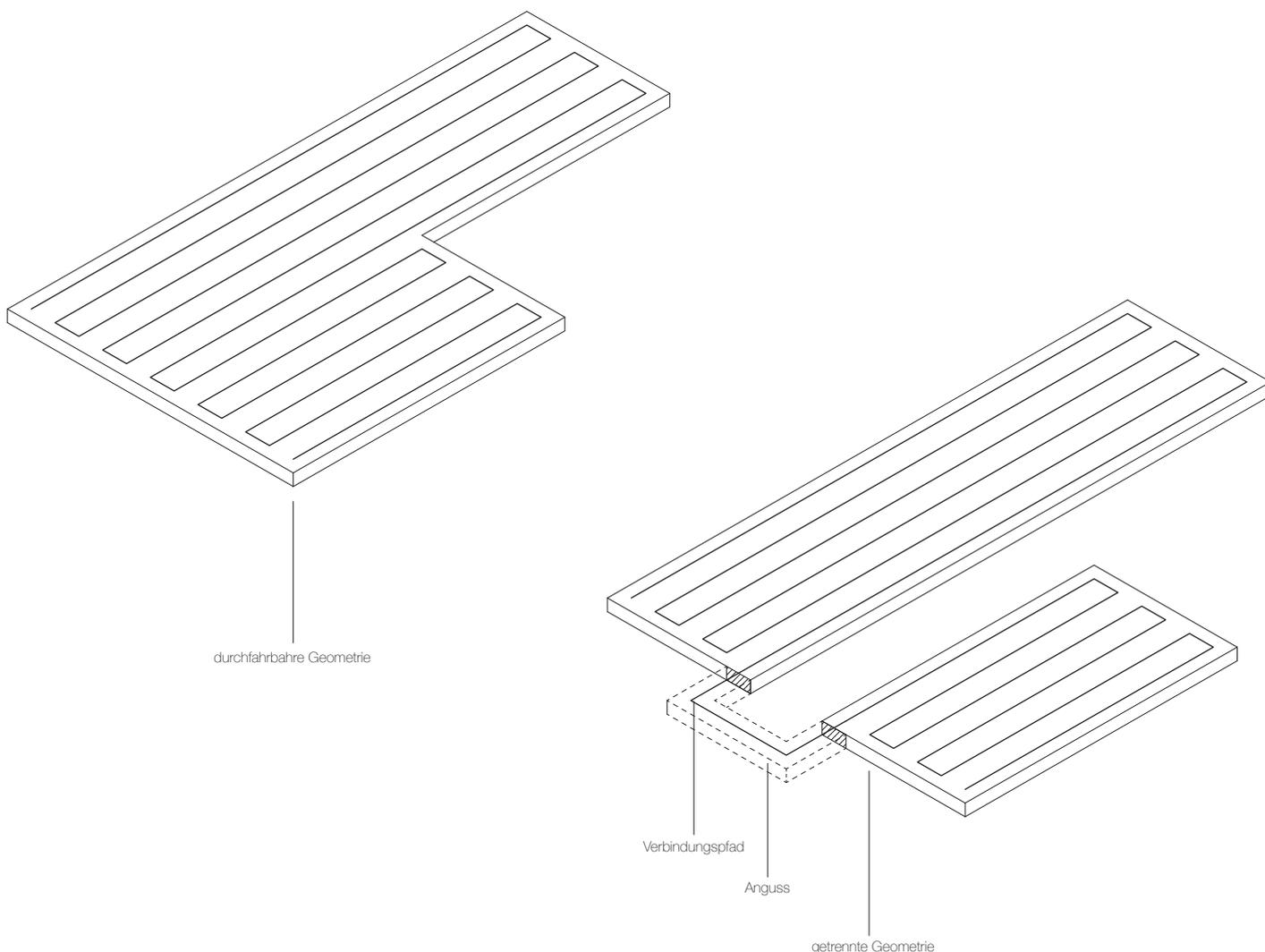
Bei fünfachsigiger Ausrichtung des Druckkopfes kann dieser in Steigungen ange stellt werden. Somit ist gewährleistet, dass er immer orthogonal zur darunterliegenden Schicht liegt.

Bild 52. Ausfüllen von Geometrien mit Druckpfaden

Geometrie mit kontinuierlichem Druckfad

Geometrie mit unterbrochenem Druckfad

## Druckpfade



Da sich das gesamte System mit Pumpe, Schlauch und Printdüse bis zu einem gewissen Maß träge verhält, ist im momentanen Stadium der Anlage darauf zu achten, dass die zu druckenden Geometrien in einem Pfad durchfahrbar sind.

Grund dafür ist, dass beim Stoppen der Pumpe noch ein gewisses Maß an Material wegen der Trägheit nachfließt. Selbst bei der Verwendung eines Quetschventils zur Unterbrechung des angeforderten

Materials, entsteht kein definiertes Strangende. Weiters müsste hierbei das zugeführte Roving abgeschnitten werden können. Wichtig wäre die Möglichkeit, das Abschalten der Pumpe oder Abschneiden des Materialflusses so zu timen, dass die Ablage des Betonstranges genau an der gewünschten Stelle endet. Da es hierbei zu keinem abrupten Stopp des Flusses kommt, ist zu überprüfen ob es zu keinem Einschnüren des Druckstranges kommt.

Falls dies auftritt, müsste die Verzögerung des Druckkopfes darauf abgestimmt werden, den weniger werdenden Materialfluss zu kompensieren.

Bis dahin ist es bei getrennten Geometrien oder Geometrien die ein Unterbrechen des Strangs brauchen, nötig, dass zusätzliche Verbindungspfade vorgesehen werden. Diese Pfade können dann mittels Nachbearbeitung entfernt werden, hinterlassen jedoch sichtbare Nahtspuren.

Bild 53. Addition von Drucksträngen

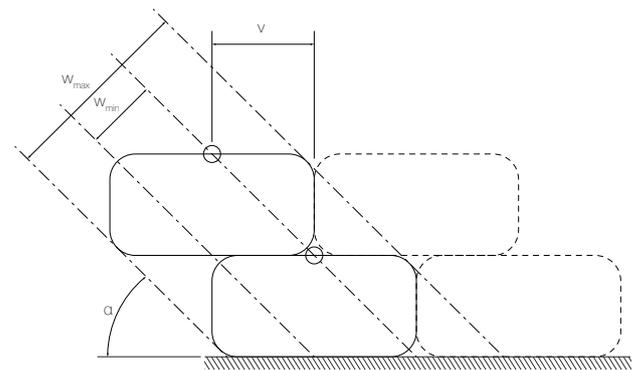
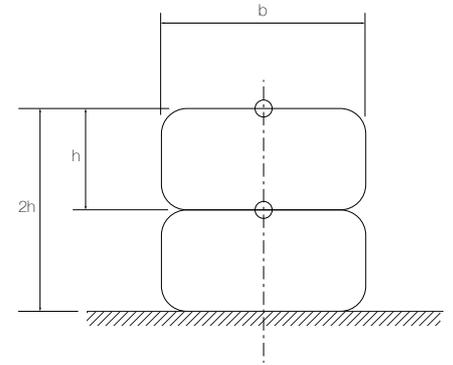
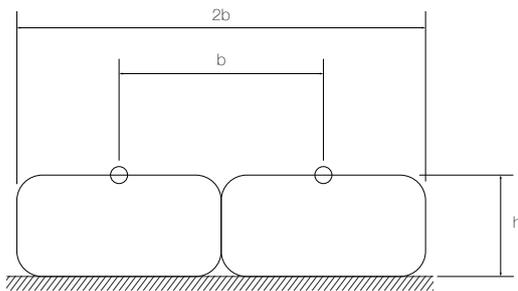
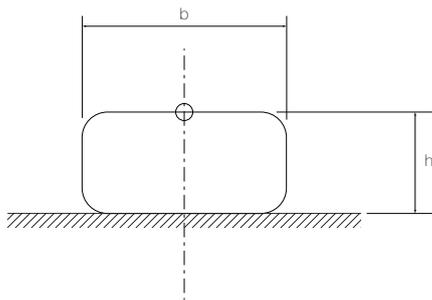
Einzelner Druckstrang

Horizontale Addition

Vertikale Addition

Versetzte Addition, gleichzeitig horizontal und vertikal

## Addition



$$\alpha = \tan^{-1} \frac{h}{v}$$

$$w_{\min} = s \times b - v$$

$$w_{\max} = \sqrt{h^2 + (s \times b)^2}$$

- b** Strangbreite
- h** Stranghöhe
- v** horizontaler Versatz pro Layer
- $\alpha$**  entstehender Steigungswinkel
- s** Anzahl horizontal addierte Stränge
- $w_{\min}$**  minimal entstehende Wandstärke
- $w_{\max}$**  maximal entstehende Wandstärke

Stränge können horizontal und vertikal addiert werden. Der Abstand zwischen den Pfaden ergibt sich dabei in horizontaler Richtung als einmal die Strangbreite, sowie in vertikaler Richtung als einmal die Stranghöhe.

Um gekrümmte Flächen, Stufen, Nuten, usw. fertigen zu können, besteht die Möglichkeit, die Pfade layerweise in horizontale Richtung zu verschieben. Dies wird dann als Freidruck bezeichnet, da ein Teil der

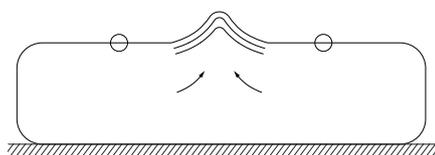
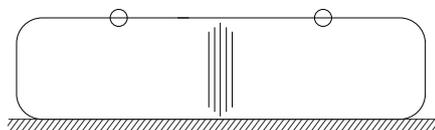
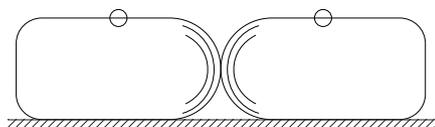
Stränge im Randbereich jeweils über die darunterliegende Schicht ausragt und somit frei von Unterstützung in der Luft hängt.

Der maximal mögliche Versatz und dadurch entstehende Winkel der Auskragung, wird durch den Zusammenhalt der Layer, sowie deren Fähigkeit zur Formhaltung bestimmt. Dies soll meinen, dass die Stränge im Randbereich sich nicht über die Kante der darunterliegenden Schicht biegen und verformen. Ausschlaggebend

dafür ist die Aushärtungsgeschwindigkeit des gedruckten Betons. Je schneller dieser erhärtet, desto flachere Winkel und niedrigere Überlappungen zwischen den Schichten sind möglich.

<sup>35</sup> Vgl. Buswell u.a., 40 f.

Bild 54. Berührungsarten einzelner Druckstränge



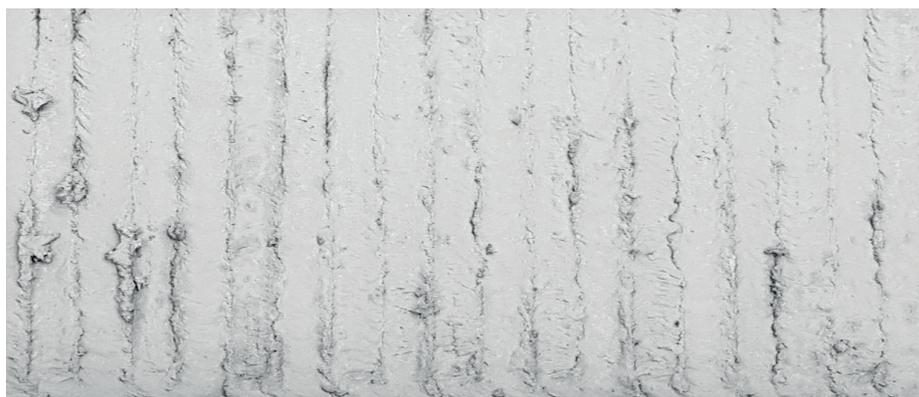
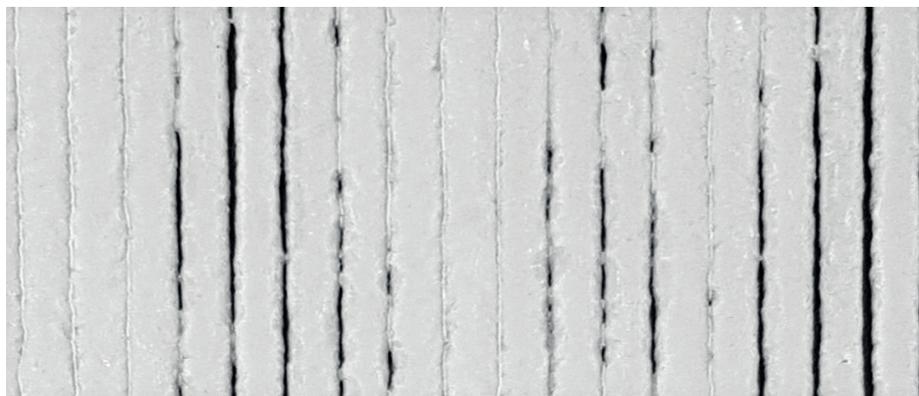
Die Verbindungsstellen innerhalb eines Layers der einzelnen Stränge sollen eine gute Verbindung zur Gewährleistung der Kraftübertragung zwischen ihnen ergeben. Ausschlaggebender Faktor ist dabei ein optimales Verhältnis der Strangabmessung zum Pfadabstand.

Bei zu geringem Kontakt durch zu weit entfernte Printpfade entstehen vor allem in horizontaler Richtung Riefen und somit keine hinreichende Kraftübertragung, bzw.

Geringer Kontakt der Druckstränge

Optimaler Kontakt

Überfüllung und somit Materialüberschuss



Verbindung zwischen den Strängen.

Liegen die Pfade zu nahe beieinander, so kommt es zu einem Materialüberschuss in den Kontaktbereichen. Dieses Material wird dabei unkontrolliert nach oben und zu den Seiten verdrängt. Im ausgeprägtesten Fall verringert sich dadurch der Düsenabstand so weit, dass die Düse das bereits abgelegte Material durchstreift und damit das Druckbild verschlechtert.

Bild 55. Druckschicht mit Materialmangel

Bild 56. Druckschicht mit optimaler Verbindung

Bild 57. Druckschicht mit Materialüberschuss

Cold Joints:

Wenn schon abgelegte Stränge zu früh aushärten, kommt es trotz passendem Füllverhältnis zu einem schlechten Zusammenhalt der Stränge. Daher ist eine angemessene Aushärtungszeit des Materials zu finden, da, wenn die Stränge noch zu wenig ausgehärtet sind, bei horizontaler Addition die darunterliegenden Layer verdrängt und zusammengedrückt werden.<sup>35</sup>

Bild 58. Hauptfertigungsrichtung von plattenförmigen Geometrien

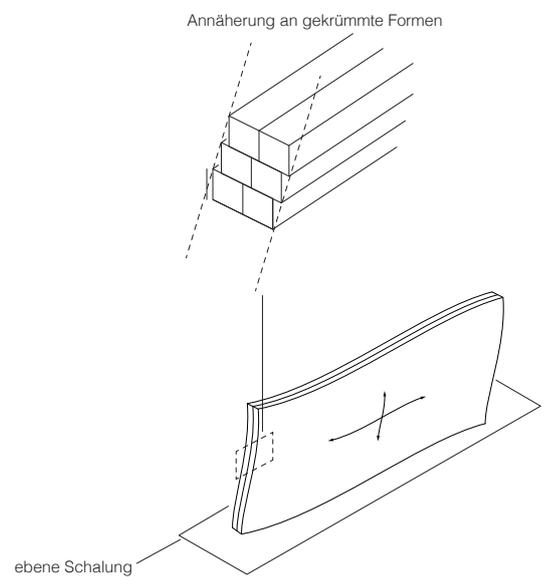
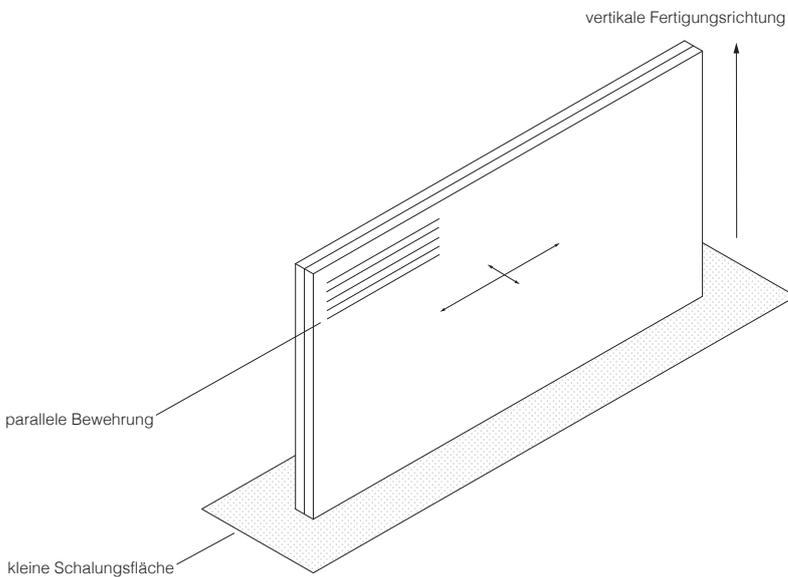
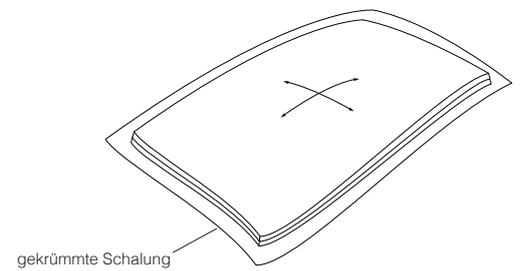
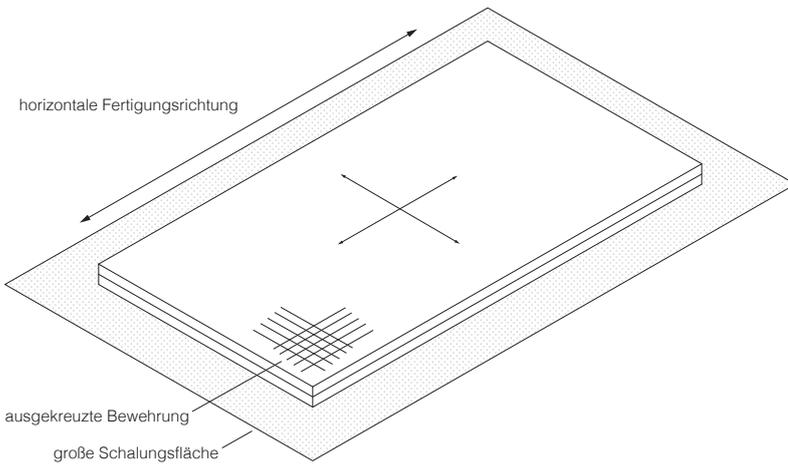
Horizontale Fertigung von ebenen Platten

Vertikale Fertigung von ebenen Platten

Horizontale Fertigung von gekrümmten Platten

Vertikale Fertigung von gekrümmten Platten

## Horizontal- &amp; Vertikaldruck



Bei der Fertigung von Platten kann die Hauptausdehnungsrichtung sowohl horizontal, als auch vertikal gewählt werden. Dies bestimmt den Verlauf der Printpfade und somit auch den Verlauf der Bewehrungen grundlegend.

Horizontal liegend gefertigte Platten benötigen eine größere Schalungsfläche. Dies ergibt wiederum einen größeren Anteil an glatter, geschalteter Werkstückfläche. Die Methode ermöglicht außerdem, dass die

Bewehrungen bei der Fertigung in mehreren Layern über die Bauteilfläche ausgekreuzt werden können. Gekrümmte Platten benötigen eine ihrer Form entsprechende vorgefertigte Schalung.

Vertikal stehend gedruckte Platten brauchen eine geringere Schalungsfläche. Dies ergibt eine Platte mit zwei Seiten gleichem Druckbildes. Aber da Stränge immer parallel nach oben addiert werden, findet kein Auskreuzen der Pfade und dadurch der Be-

wehrung über die Hauptausdehnungsrichtungen der Platte statt. Gekrümmte Platten können bis zu einem gewissen Grad im Freidruckverfahren gefertigt werden. Diese benötigen zwar keine gekrümmte Schalung, sind dafür in ihrer Krümmung durch den maximal möglichen Freidruck begrenzt und besitzen eine abgestufte Oberfläche.

Bild 59. Gegenüberstellung der Möglichkeiten von horizontal und vertikal gefertigten Platten in Aufsicht

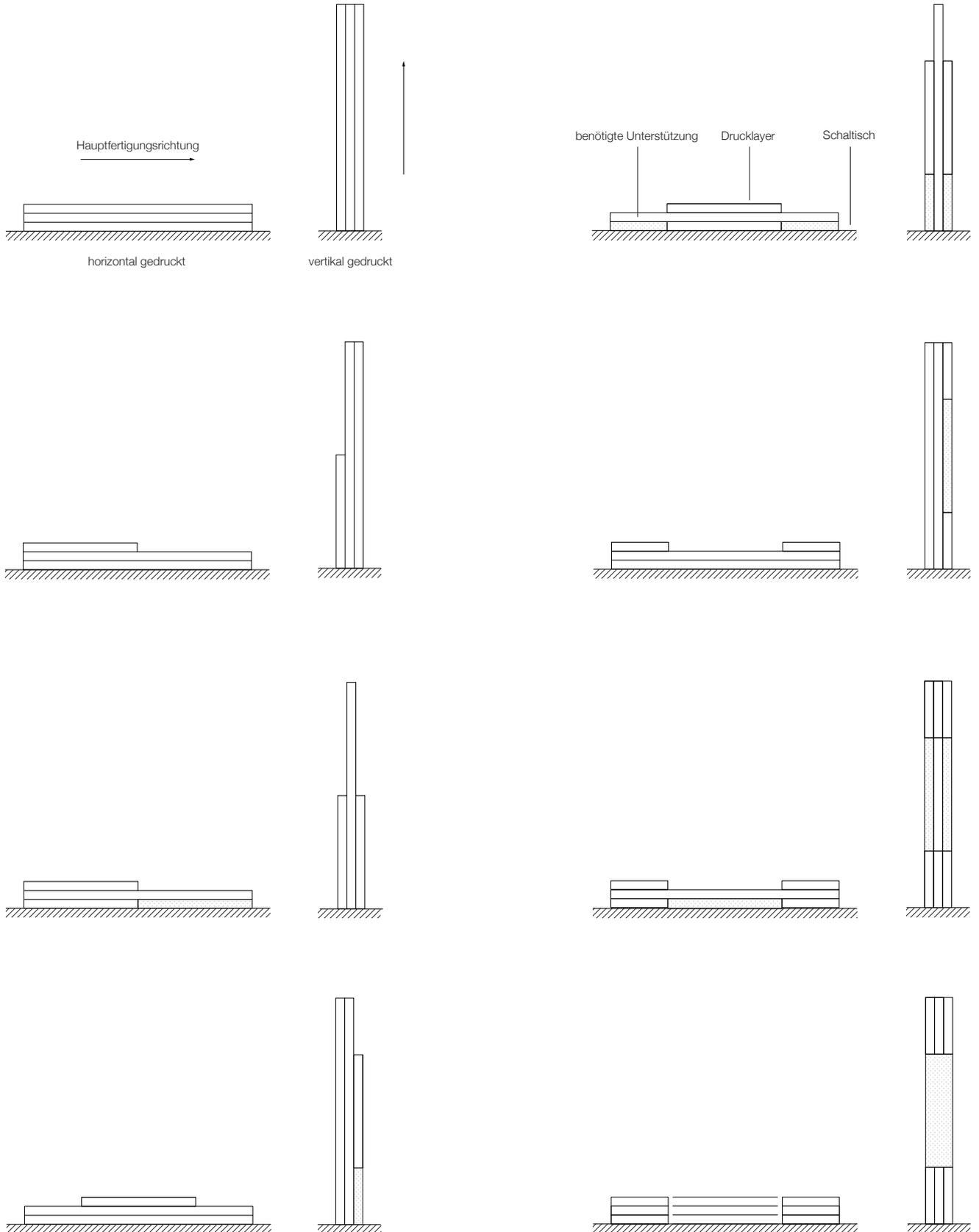
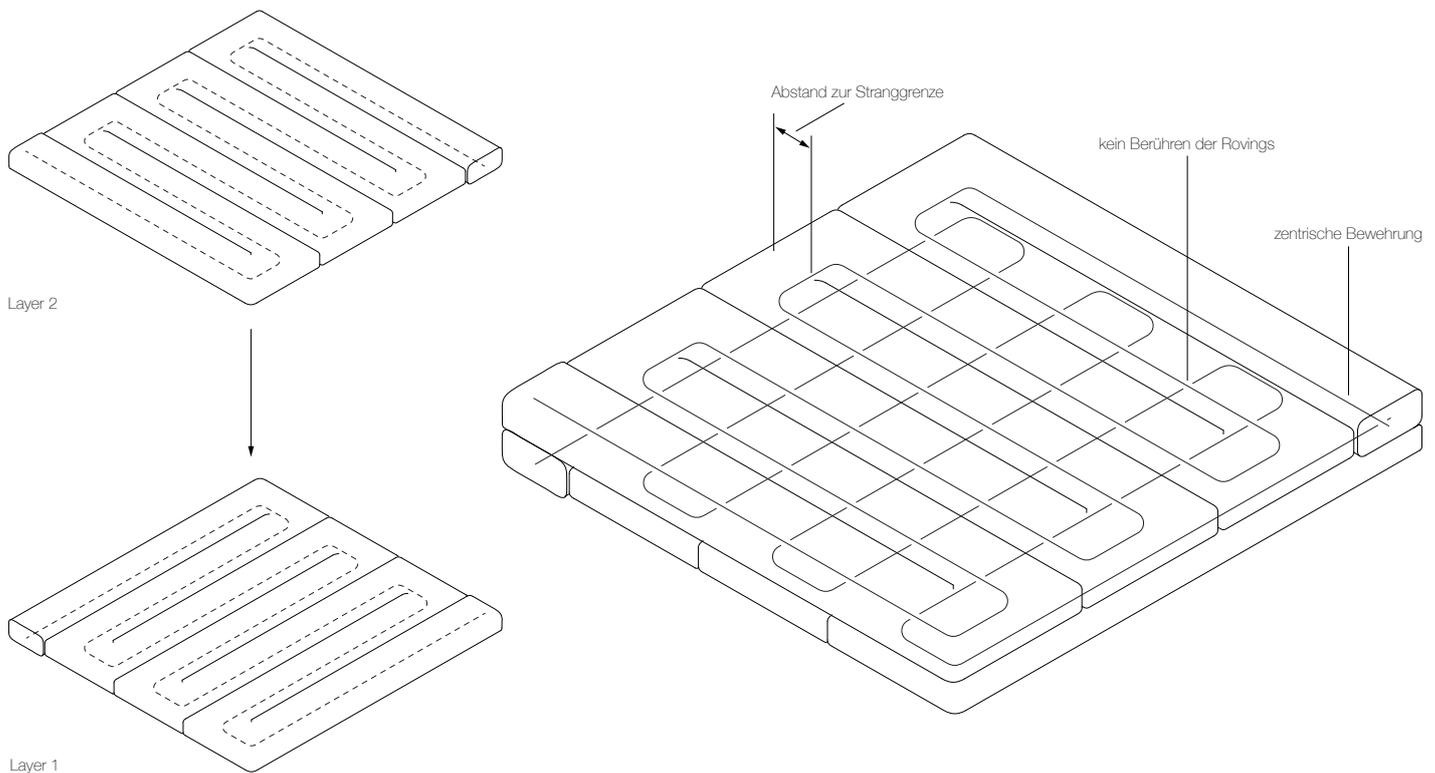


Bild 60. Zusammensetzung einer in X- und Y-Richtung bewehrten Platte

Schichtung zweier gegeneinander ausgekreuzten Layer

Bewehrungsverlauf in der Platte

## Bewehrungsführung



Wird im Druckkopf eine Bewehrung mitgeführt, so wird diese konzentrisch im Strangquerschnitt platziert. Dadurch ist die Bewehrung immer layerweise den Druckbahnen folgend verlegt.

Da prozessbedingt die Bewehrung immer in Strangrichtung verläuft, kommt es zu keinem direkten Kontakt und dadurch Verbindungspunkten zwischen den einzelnen Rovingbahnen. Dies bedeutet, dass keine Bewehrungsgitter im herkömmlichen Sinn hergestellt werden können, sondern dass diese durch layerweise Überlagerung ohne Knotenpunkte entstehen.

Grundsätzlich wird eine statisch wirksame Bewehrung daher beispielsweise so bewerkstelligt, indem jeweils übereinander liegende Layer um 90° versetzt zueinander abgefahren werden. Dies gewährleistet somit eine Kraftaufnahme der Bewehrung in X- und Y-Richtung in der gedruckten Platte.

Ein Abschneiden, welches ein Unterbrechen des dem Druckstranges zugeführten Rovings ermöglicht, wäre sinnvoll, um die

Dichte der Bewehrungsmenge innerhalb eines Layers zu variieren und sie somit nur in Bereichen abzulegen, wo diese benötigt wird. Alternativ kann der Druck eines Layers in zwei Druckpfade aufgeteilt werden. Dabei würde in einem die Bewehrung verlegt werden und im anderen die entstehenden Leerbereiche verfüllt. Falls zwischen bewehrtem und unbewehrtem Strang ein Werkzeugwechsel nötig ist, so muss dieser rasch erfolgen, da die bereits abgelegten Stränge in dieser Zeit aushärten und die Gefahr von Cold Joints auftreten kann.

Alternativen und Erweiterung:

Eine weitere Möglichkeit zur flächigen Bewehrung bestünde im Einlegen von Bewehrungsmatten zwischen den Layern (siehe S26 - Betonkanu). Diese Methode erfordert jedoch ein manuelles Eingreifen des Bedieners in den Prozess, bzw. ist sie momentan noch mit nur sehr großem Aufwand automatisierbar.

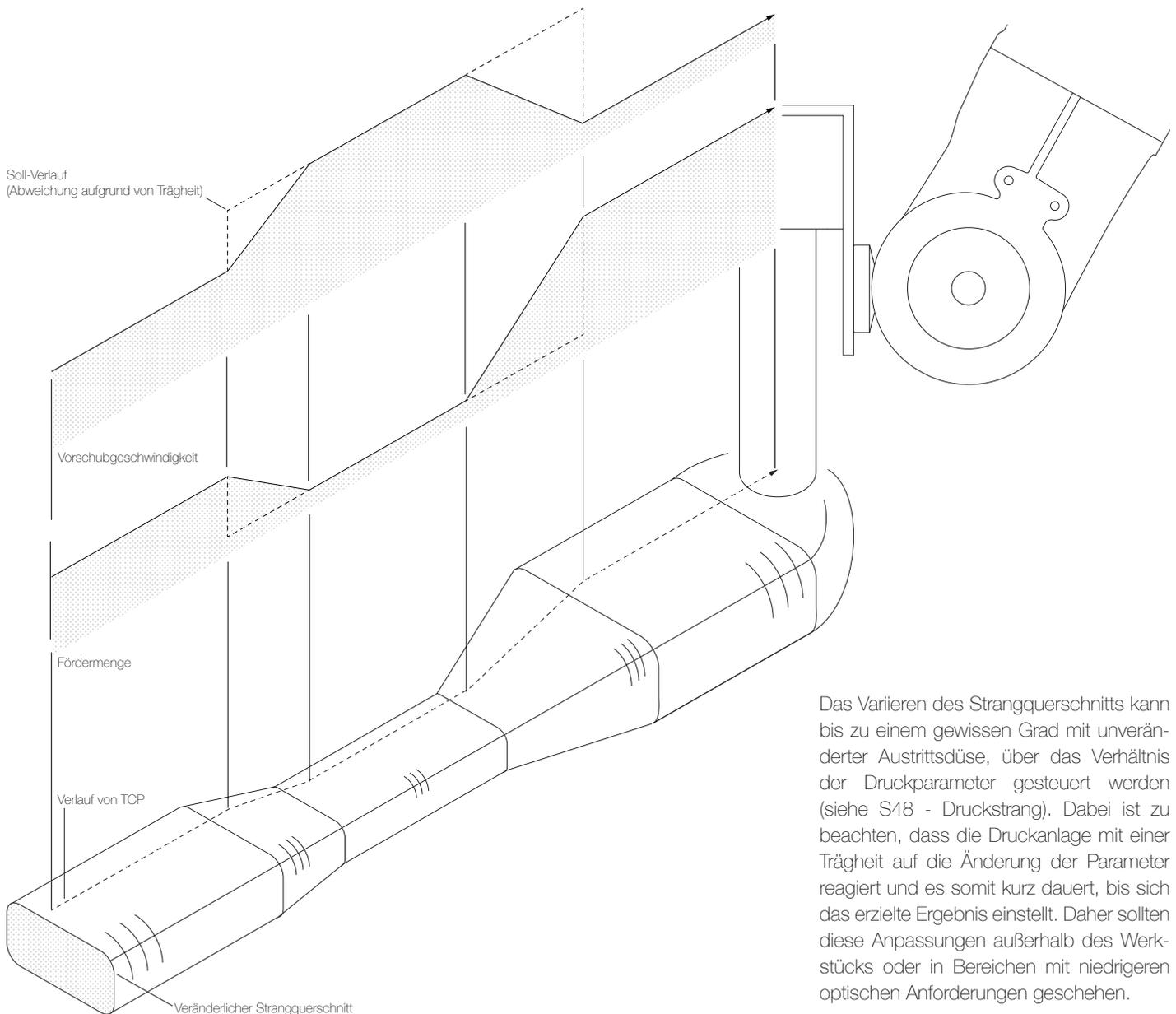
Das Einarbeiten einer Bewehrung, wel-

che über die Ränder der Stränge hinausgreift und diese verbindet, ist eine noch zu lösende Aufgabe. Eine Möglichkeit, um zwischen ihnen den Zusammenhalt zu erhöhen, wäre z.B. von Hand stabförmige Elemente oder Haken zwischen den Bahnen einzulegen oder zu drücken. Die große Herausforderung lautet dabei ebenfalls diesen Vorgang automatisiert in den Fertigungsprozess zu integrieren.

Bild 61. Verhältnis von Vorschubgeschwindigkeit zu Fördermenge beim Drucken mit variablem Strangquerschnitt

Dabei besteht die Möglichkeit den Querschnitt über die Vorschubgeschwindigkeit, die Fördermenge oder beide gleichzeitig zu regeln.

## Drucken mit variablem Strangquerschnitt



Je kleiner die Abmessungen des gedruckten Stranges, desto höher ist die Auflösung der gewünschten Geometrie (siehe S47 - Approximation).

Dabei wäre es optimal, wenn der Querschnitt des Stranges über den Druckprozess veränderlich wäre. Somit könnten hoch auflösende Bereiche, oder jene mit benötigtem hohem Bewehrungsanteil, mit feineren Strängen abgefahren werden. Mit großem Strangquerschnitt könnten Bereiche verfüllt werden, bei welchen die Auflö-

sung eine untergeordnete Rolle spielt oder bei deren eine niedrigere Bewehrungsdichte ausreicht.

Bei gekrümmten Flächen ist zu beachten, dass trotz einer orthogonalen Ausrichtung der Düse (siehe S49 - Positionierung), bei hohen Krümmungsradien der zu bedruckenden Fläche, der Randabstand der Düse über ihren Umkreis schwankt. Dies kann zu einem unvorhersehbaren Druckergebnis mit verminderter Oberflächenqualität führen.

Das Variieren des Strangquerschnitts kann bis zu einem gewissen Grad mit unveränderter Austrittsdüse, über das Verhältnis der Druckparameter gesteuert werden (siehe S48 - Druckstrang). Dabei ist zu beachten, dass die Druckanlage mit einer Trägheit auf die Änderung der Parameter reagiert und es somit kurz dauert, bis sich das erzielte Ergebnis einstellt. Daher sollten diese Anpassungen außerhalb des Werkstücks oder in Bereichen mit niedrigeren optischen Anforderungen geschehen.

Um eine weitere Bandbreite des Strangquerschnitts zu ermöglichen, wäre eine Düse mit veränderlichem Querschnitt anzudenken, welche ihren Durchmesser während des Druckprozesses ändert. Momentan kann dies nur durch einen manuellen Düsenwechsel außerhalb des Werkstücks bewerkstelligt werden.

Auch andere Düsengeometrien mit z.B. Abstreifern wären zukünftig eine Option. Diese könnten genutzt werden, um die Bauteilränder zu glätten oder zu strukturieren.



Drucksamples

Bild 62. Druck des Prototyps Hexagon



Bild 63. Druck des Prototyps Welle



Die geometrischen Möglichkeiten des 3DCP sind bisweilen noch nicht systematisch festgehalten und katalogisiert. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit quadratische Musterstücke entworfen und mittels manuell erstellter Druckpfade im Horizontaldruck gefertigt. Sie erforschen die Möglichkeiten des Verfahrens hinsichtlich plattenförmiger Geometrien. Diese verschiedenen Designs sind frei kombinierbar und in folgende Gruppen klassifiziert:

#### Schalungsform:

- ebene Platte
- gekrümmte Platte

#### Reliefdruck:

- ebenes Relief
- Rippen
- variierende Plattendicke
- Öffnung

#### Freidruck:

- Freidruck
- Hinterschneidung

Für die errechneten Druckdaten wurde eine Betondichte von  $2300\text{kg/m}^3$  und eine durchschnittliche Verfahrensgeschwindigkeit von  $250\text{mm/s}$  angenommen, um für eine Anwendung der Samples auf Entwürfe eine Prognose der benötigten Ressourcen erstellen zu können.

Bild 64. Eigenschaften Dreischichtige Ebene Platte Drucksamples

Abmaße der Drucksamples

Entstehende Oberflächen durch 3DCP

Abmaße der Druckstränge

Ausrichtung der Druckpfade in den einzelnen Layern

### Dreischichtige Ebene Platte

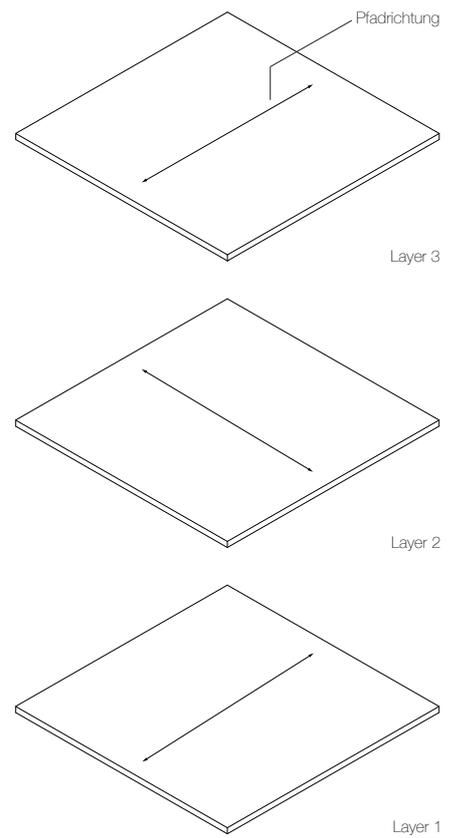
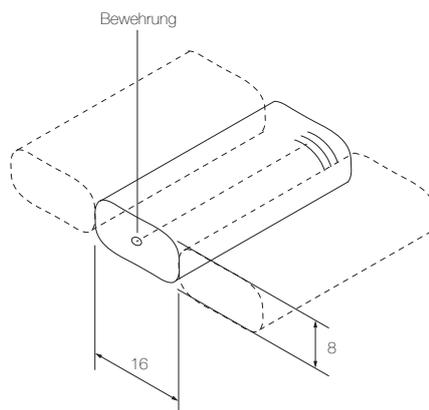
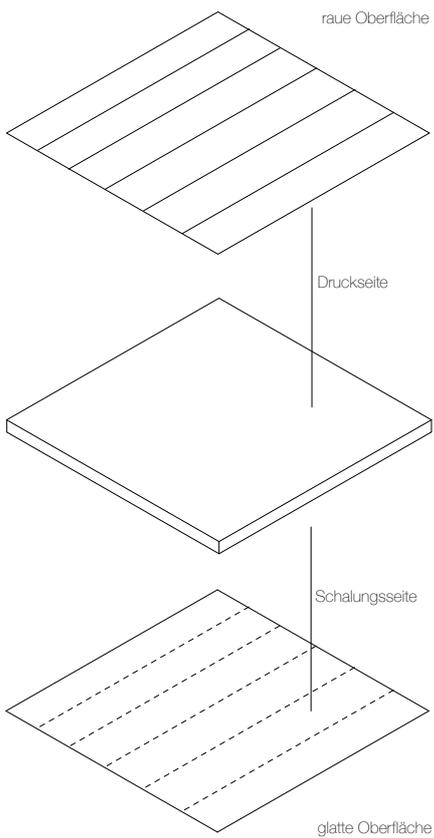
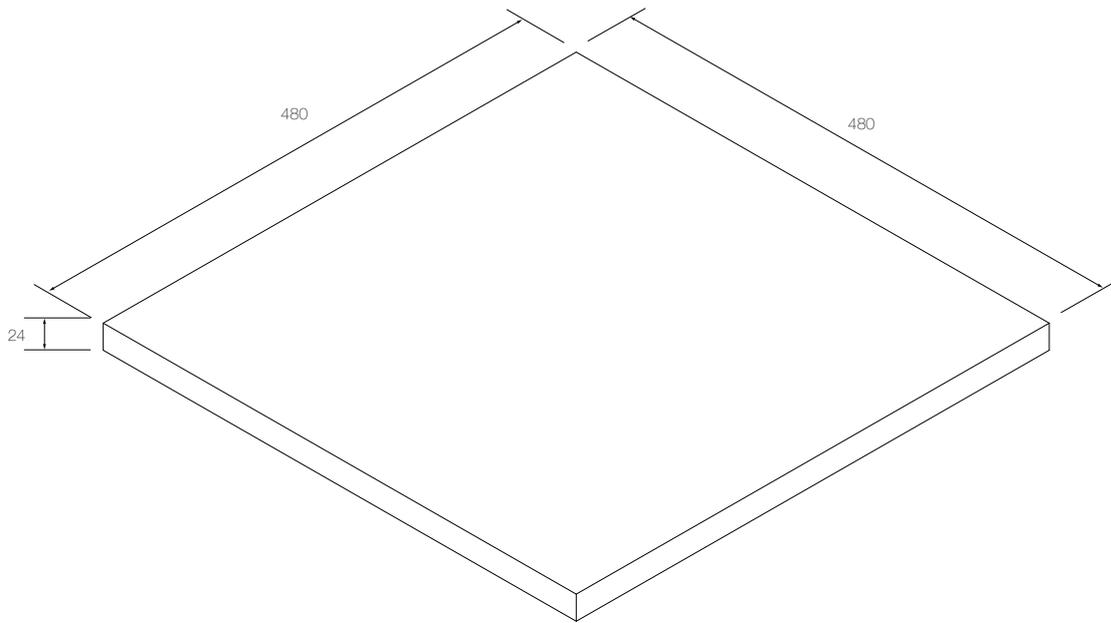
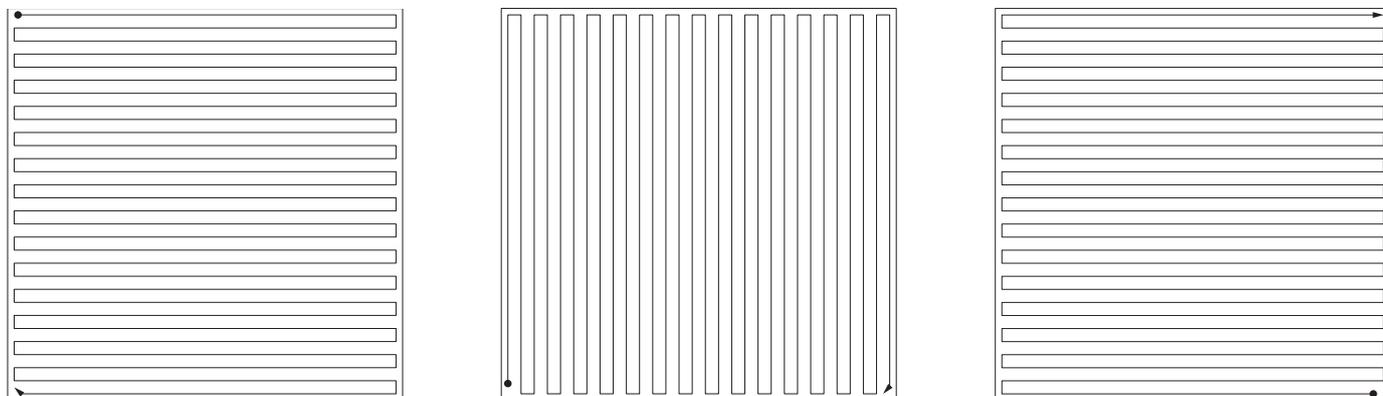


Bild 65. Printpfade Drucksample Ebene Platte

(in aufsteigender Reihenfolge von links nach rechts und oben nach unten (Punkt= Start des jeweiligen Layers, Pfeil= Druckrichtung, dünne Umrandung= Außenkontur des Bauteils))



Druckdaten	/Teil	/m <sup>2</sup>	[ ]
Zeit:	2:53	12:29	min
Pfadlänge:	43,2	187,3	m
Volumen:	5,5	24,0	l
Gewicht:	12,7	55,1	kg

Als Ausgangskörper aller Printsamples dient eine dreischichtige bewehrte, quadratische Platte. In dieser Platte verlaufen die Printpfade jeweils parallel zu den Bauteilrändern. Dabei sind die Schichten um 90° gegeneinander ausgekreuzt, um (falls eingebracht) einen statisch wirksamen Verlauf der in die Stränge eingebrachten Bewehrung zu erreichen.

Der fertige Körper weist auf seiner im Prozess unten befindlichen Seite aufgrund der

Schalung eine glatte Oberfläche auf. Diese gibt die einzelnen Printpfade nur leicht zu erkennen. Auf der Oberseite wiederum weist der Druckteil die charakteristische raue Printoberfläche mit den gut zu erkennenden Betonsträngen auf.

Bild 66. Druckseite des Samples Dreischichtige Ebene Platte

---



Bild 67. Schalungsseite des Samples Dreischichtige Ebene  
Platte



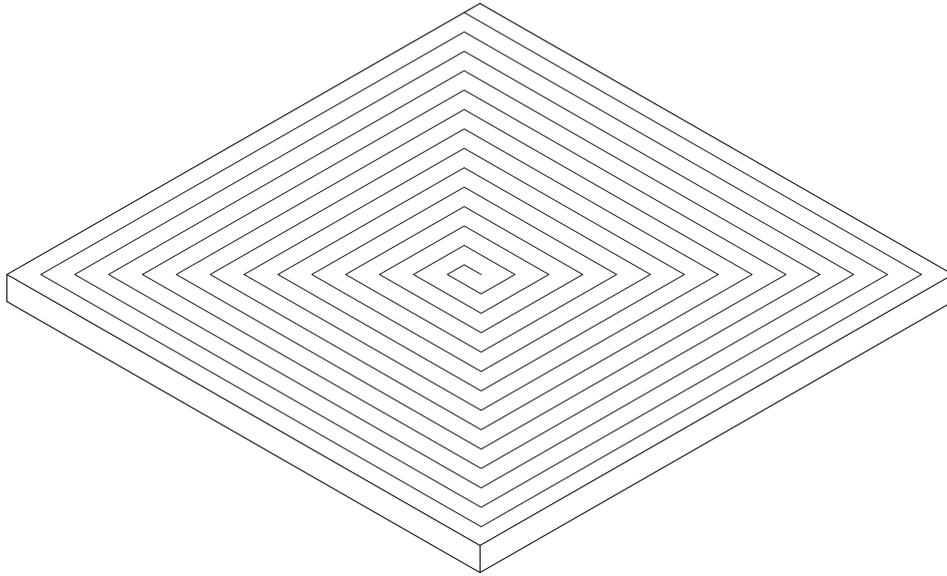
Bild 68. Eigenschaften Reliefprint Drucksample

Drucksample idealisiert

Entstehung des Reliefs

Ausrichtung der Druckpfade in den einzelnen Layern

## Reliefprint



Abstand > Standardabstand

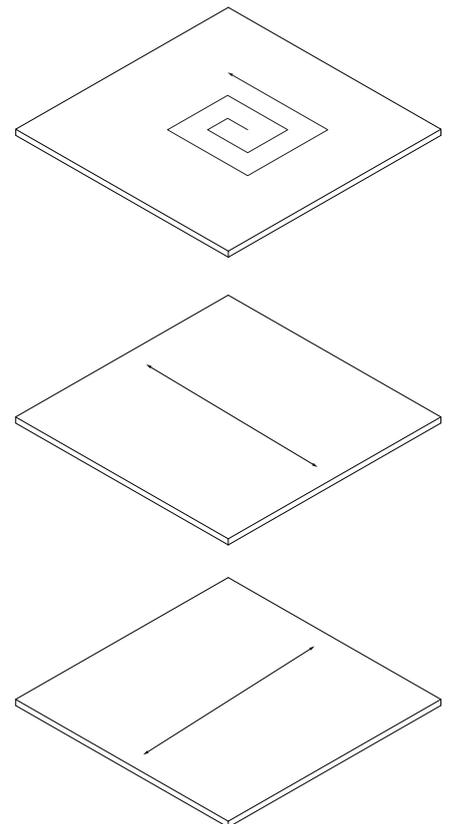
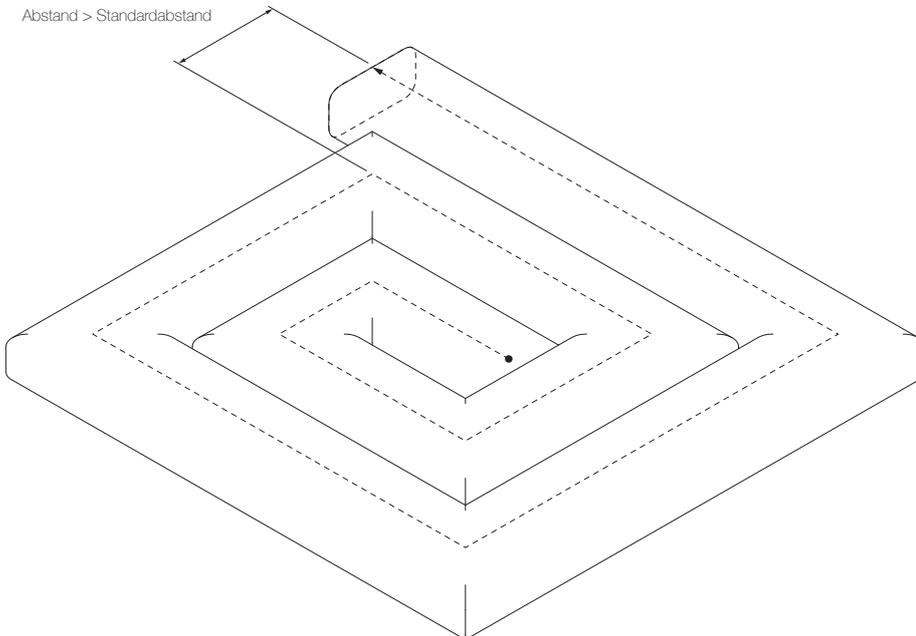
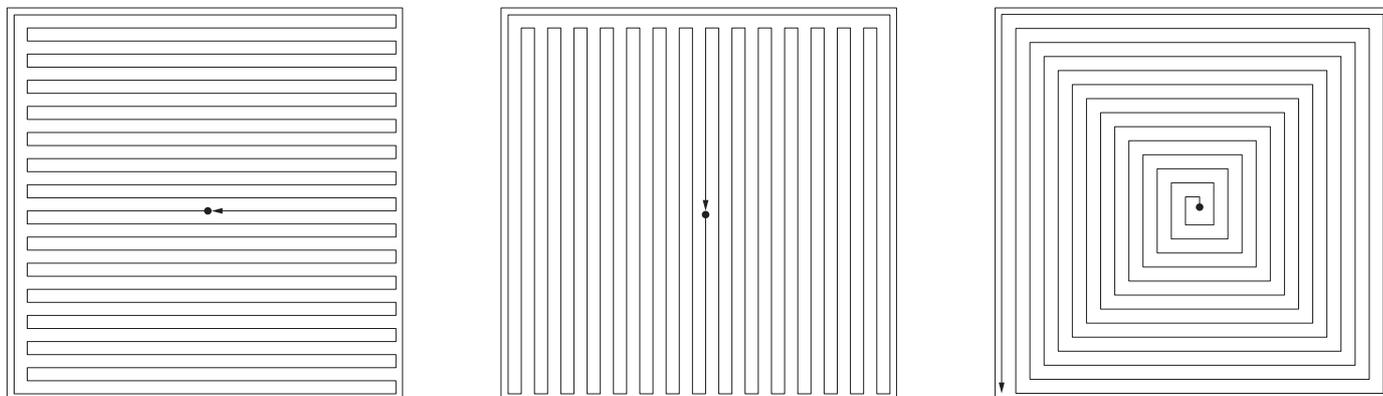


Bild 69. Printfade Reliefprint Drucksample



Druckdaten	/Teil	/m <sup>2</sup>	[ ]
Zeit:	2:53	12:30	min
Pfadlänge:	43,2	187,5	m
Volumen:	5,5	24,0	l
Gewicht:	12,7	55,2	kg

Um das Druckbild einer einzelnen, z.B. dekorativ aufgetragenen Schicht, stärker hervorzuheben und somit eine reliefartige Oberfläche zu erhalten, bestehen mehrere Möglichkeiten. Alle basieren dabei auf der Variation der Druckparameter, abweichend von einer optimal verfüllten Fläche.

Einerseits lässt sich mit einer leichten Vergrößerung des Abstandes zwischen den Bahnen mit gleichbleibender Fördermenge dieser Effekt erreichen.

Andererseits ist es möglich, das Verhältnis von Fördermenge zu Verfahrensgeschwindigkeit so anzupassen, dass ein leichter Materialmangel entsteht, welcher die Stränge schmaler ausfallen lässt.

Zu beachten ist bei all diesen Maßnahmen, dass der Zusammenhalt zwischen den einzelnen Strängen in dieser Schicht nicht optimal gegeben ist.

Bild 70. Druckseite des Samples Reliefprint

---



Bild 71. Schalungsseite des Samples Reliefprint



Bild 72. Eigenschaften Variierende Dicke Drucksample

Drucksample idealisiert

Approximation an eine Steigung durch Stufen

Ausrichtung der Druckpfade in den einzelnen Layern

### Variierende Dicke

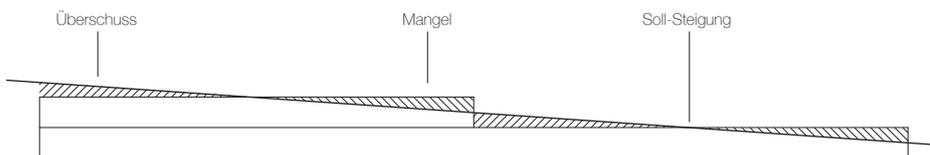
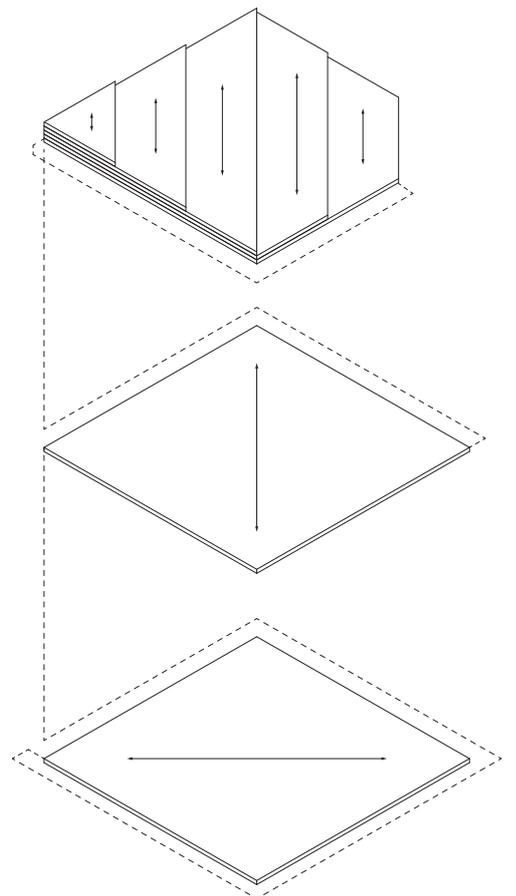
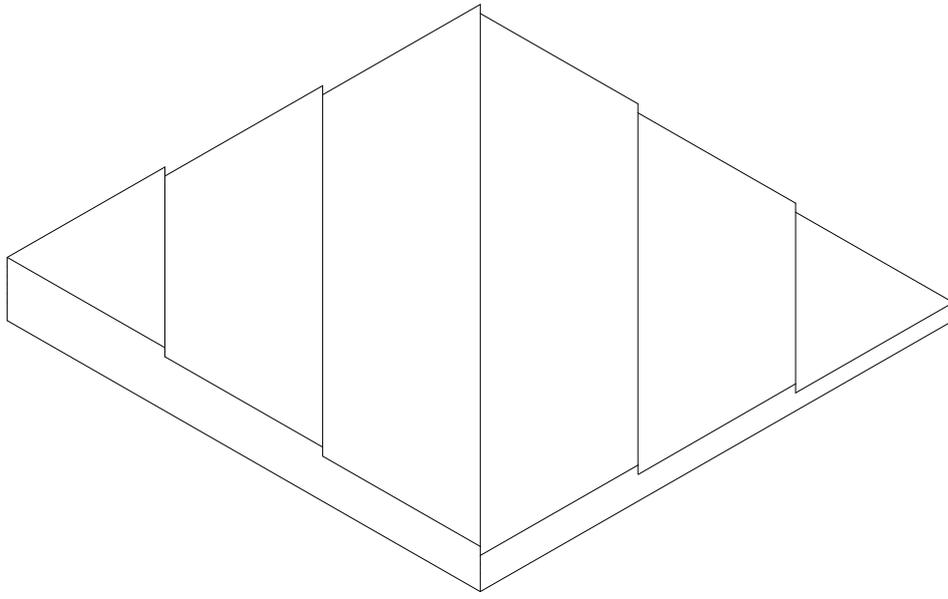
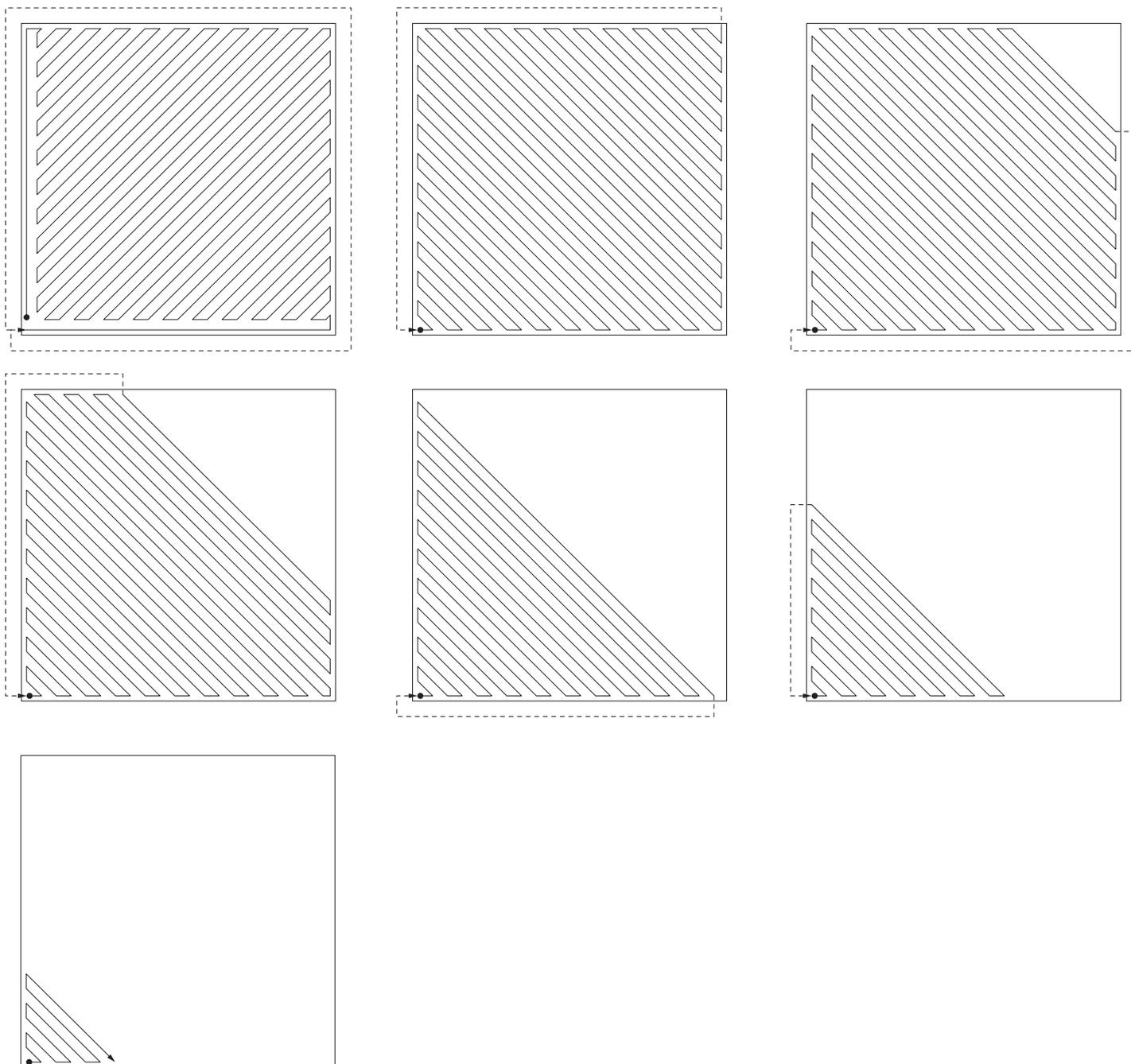


Bild 73. Printfade Drucksample Variierende Dicke



Druckdaten	/Teil	/m <sup>2</sup>	[ ]
Zeit:	4:42	20:24	min
Pfadlänge:	70,5	306,1	m
Volumen:	9,0	39,2	l
Gewicht:	20,7	90,1	kg

Die Variation der Dicke von Platten erfolgt durch die Wegnahme oder Zugabe von Drucklayern. Daher lassen sich, wie beim im Beispiel angeführten Printkörper, keilförmige Platten nur mit Stufen herstellen, welche sich an die gewünschte Form annähern (Näheres S48 - Approximation).

Das gefertigte Sample ist wie folgt aufgebaut: Die Abtreppung der gefertigten Platte erfolgt quer zu den Bauteilrändern. Als Basis dienen dazu zwei ausgekreuzte

Schichten.

Die Bahnen der aufgesetzten abgetreppten Schichten verlaufen alle parallel. Diese werden durch zusätzliche Verfahrswege außerhalb des Werkstücks verbunden, deren Stränge mittels Nachbearbeitung entfernt werden müssen (Näheres S51 - Druckfade).

Bild 74. Druckseite des Samples Variierende Dicke

---



Bild 75. Schalungsseite des Samples Variierende Dicke



Bild 76. Eigenschaften Rippen Drucksamle

Drucksamle idealisiert

Lösungsmethoden der Kreuzungspunkte:  
 - vertikales Ausweichen der Bahnen  
 - Durchkreuzen

Ausrichtung der Druckfade in den einzelnen Layern

## Rippen

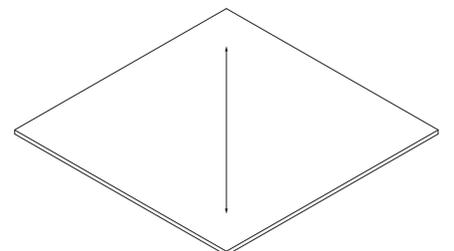
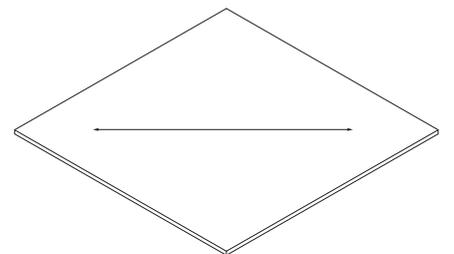
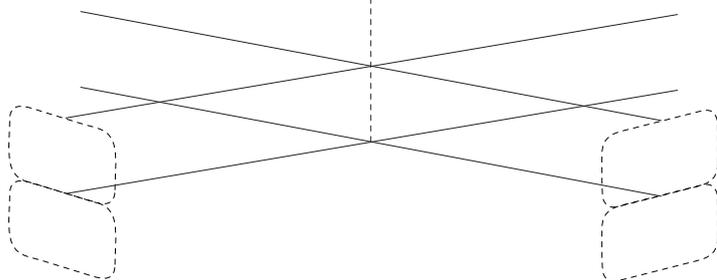
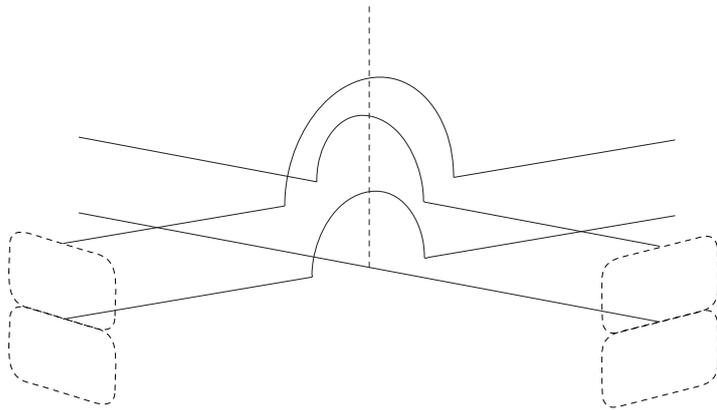
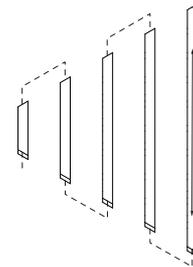
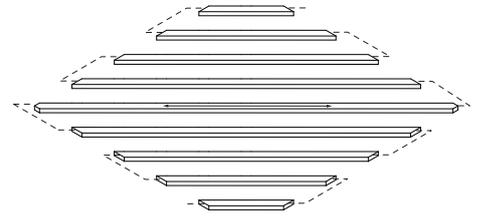
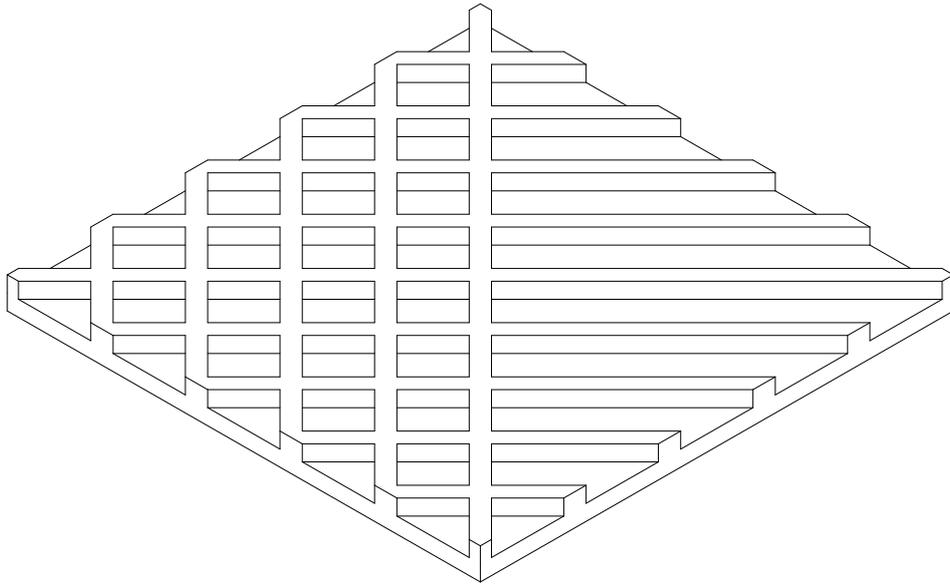
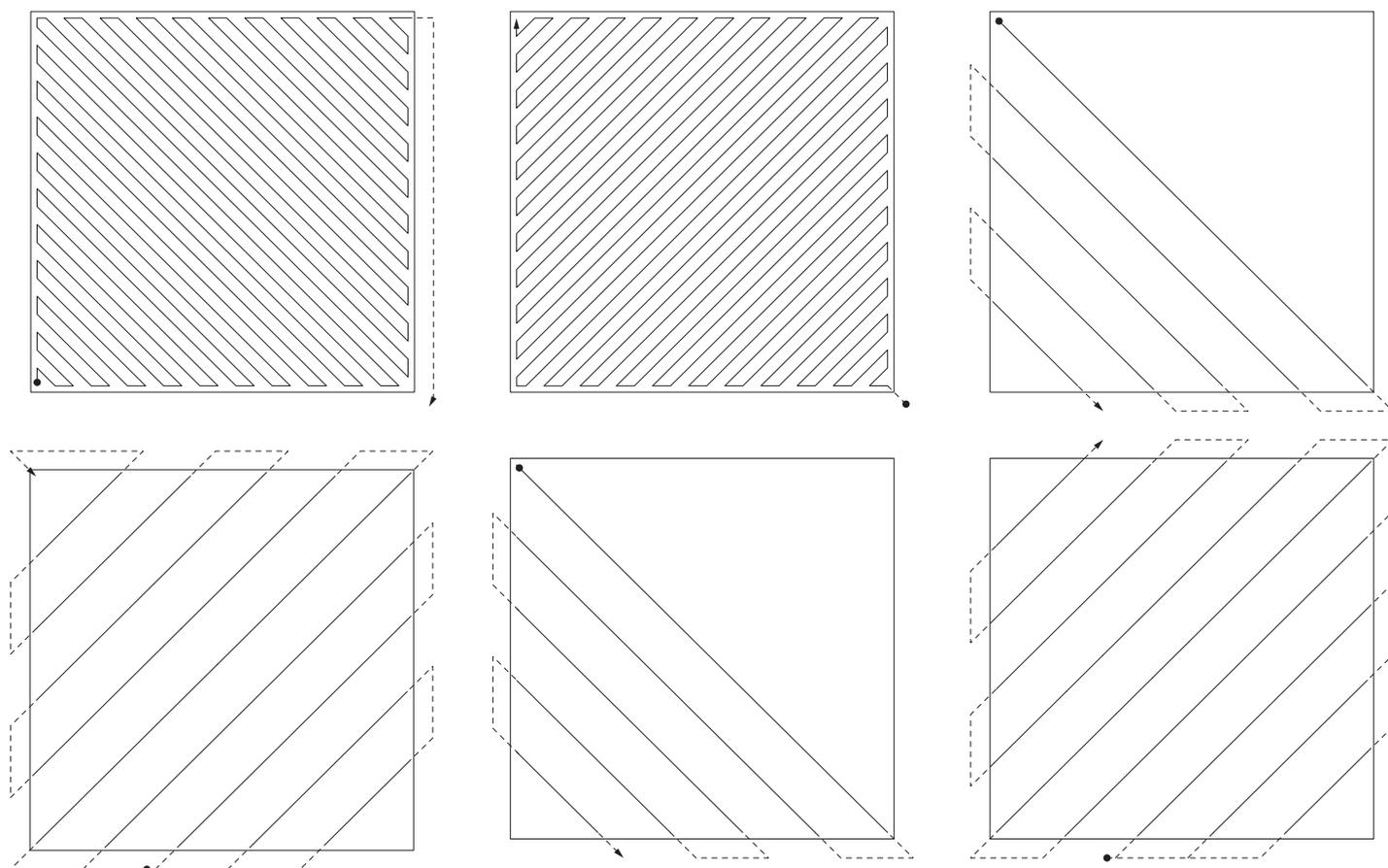


Bild 77. Printfade Drucksample Rippen  
(strichliert Angüsse)



Druckdaten	/Teil	/m <sup>2</sup>	[ ]
Zeit:	3:03	13:16	min
Pfadlänge:	45,9	199,0	m
Volumen:	5,9	25,5	l
Gewicht:	13,5	58,6	kg

Als mehrschichtiges Relief aufgebrachte parallele Bahnen, ergeben Rippen, welche zur statischen Optimierung des Bauteils herangezogen werden können. Im Fall des produzierten Prototyps verlaufen diese quer zu den Bauteilrändern und benötigen zusätzliche Verfahrswege, um einen kontinuierlichen Druckstrang zu gewährleisten.

Um eine statisch wirksame Bewehrung sicherzustellen, müssen die Rovings an den Kreuzungspunkten des Rostes durch-

laufen. Dies ist auf zwei verschiedene Arten gelöst. In der einen Variante laufen die Bahnen ohne einander auszuweichen durch und es entsteht somit ein Materialüberschuss im Knoten, welcher ihn in horizontale Richtung vergrößert.

In der anderen Variante weichen sich die Pfade in der zweiten Bauteilhälfte in konzentrischen Bögen aus. Dies ergibt eine Vergrößerung des Knotens in vertikale Richtung.

Bild 78. Druckseite des Samples Rippen

---

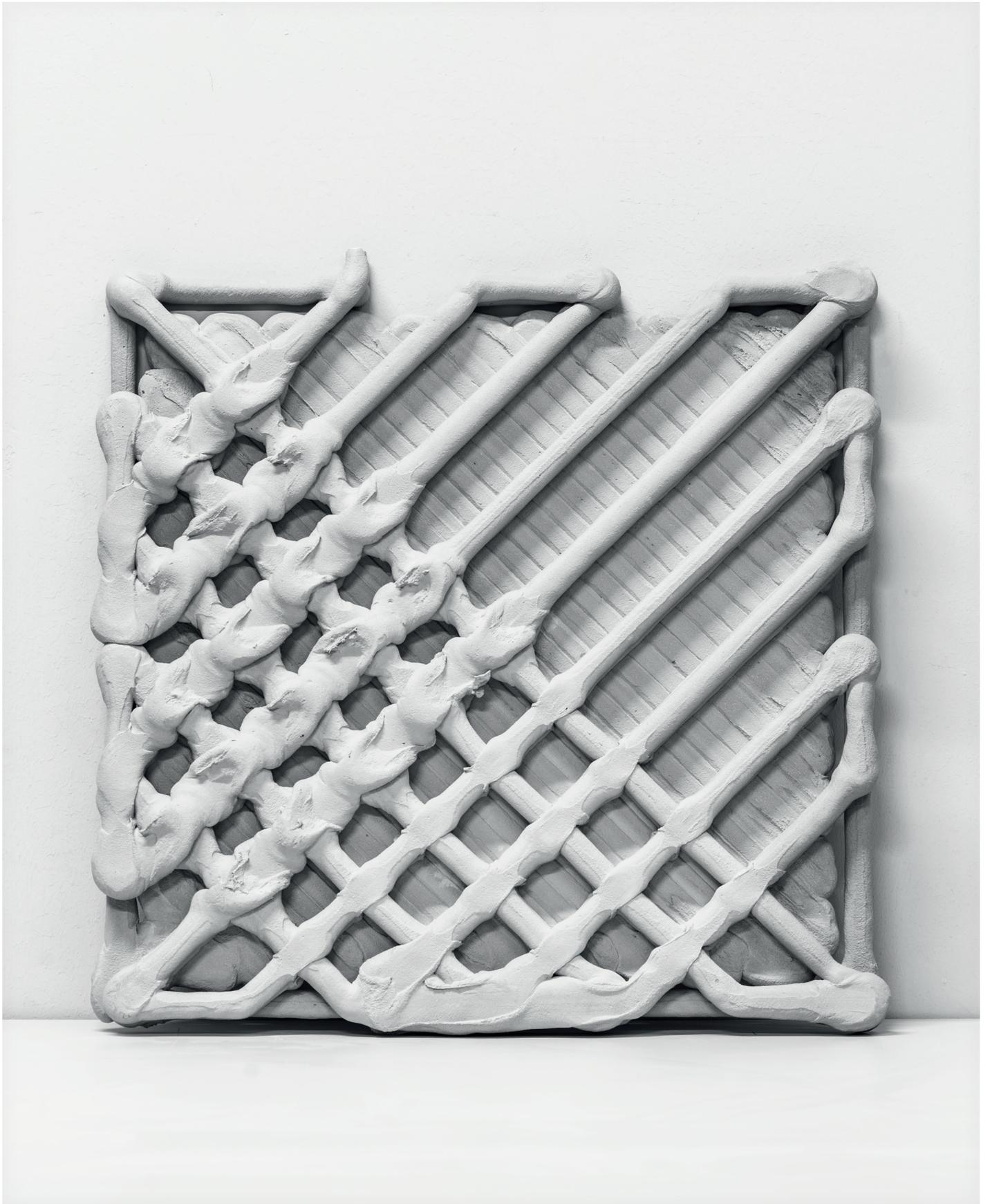


Bild 79. Schalungsseite des Samples Rippen



Bild 80. Eigenschaften Drucksampl Öffnung

Drucksampl idealisiert

Lösungsversionen der Randabschlüsse:  
parallel verlaufende zusätzliche Randschichten  
konventioneller Randabschluss ohne Einfassung

Ausrichtung der Druckpfade in den einzelnen Layern

## Öffnung

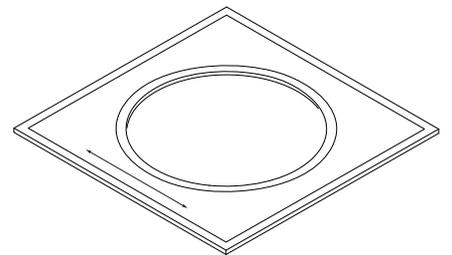
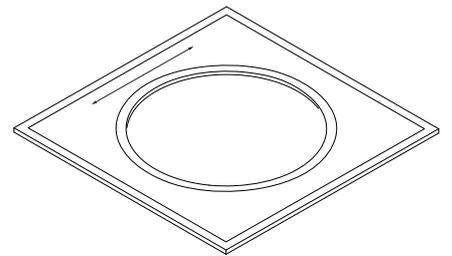
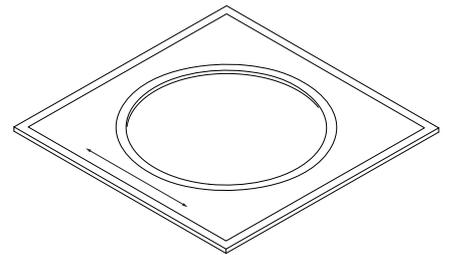
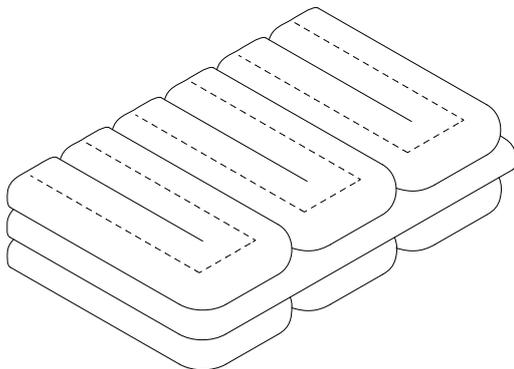
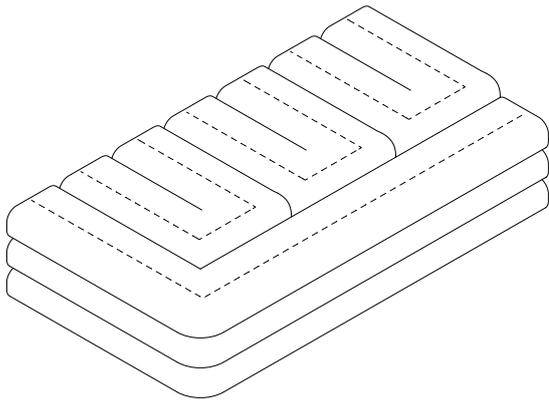
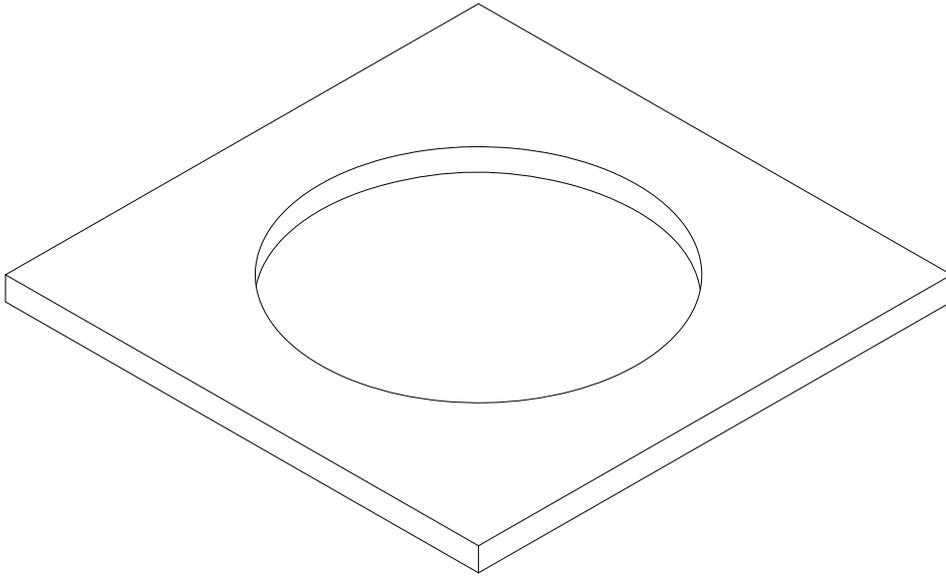
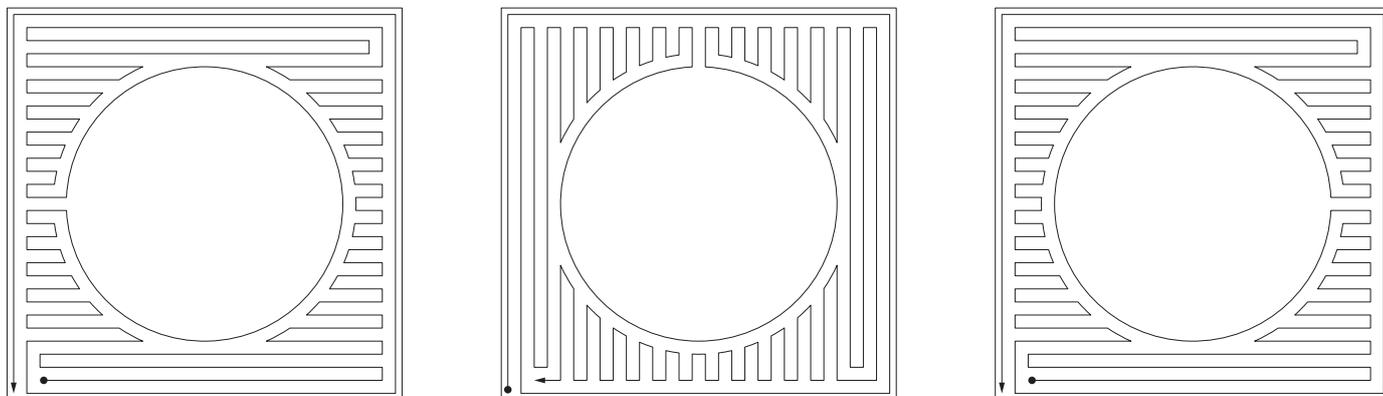


Bild 81. Printfade Drucksample Öffnung



Druckdaten	/Teil	/m <sup>2</sup>	[ ]
Zeit:	00:52	8:06	min
Pfadlänge:	28,0	121,4	m
Volumen:	3,6	15,5	l
Gewicht:	8,2	35,7	kg

Um einen besonders sauberen Randabschluss von Platten zu erreichen, besteht die Möglichkeit, die Ränder mit einem umgehenden Druckpfad einzufassen. Dies ist besonders bei runden Öffnungen oder Bauteilen ratsam, da an diesen sonst die Ränder eine gewisse Abtreppung erhalten.

Der gefertigte Prototyp besitzt eine runde, eingefasste Öffnung, sowie einen eingefassten Rand. Die dazwischenliegenden Flächen sind mit schichtweise ausgekreuz-

ten Bahnen verfüllt, um ein statisch wirksames Bewehrungsgitter zu erstellen. Dabei ist zu beachten, dass dieses durch die zusätzlichen Bahnen an den Rändern nicht bis ganz an den Bauteilrand reicht.

Bild 82. Druckseite des Samples Öffnung

---



Bild 83. Schalungsseite des Samples Öffnung



Bild 84. Eigenschaften Drucksamplere Freidruck

Drucksamplere idealisiert

Lösung des Layerwechsels im Bereich des Pyramidenstumpfes

Detail der entstehenden Steigung

Schnitt des Samples

Ausrichtung der Druckpfade in den einzelnen Layern

## Freidruck

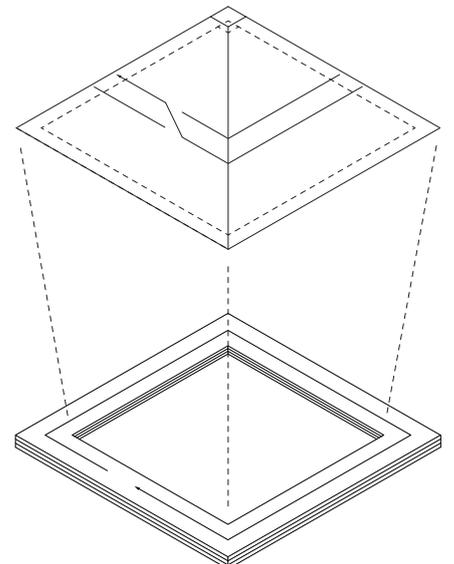
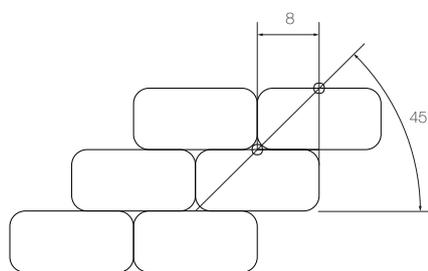
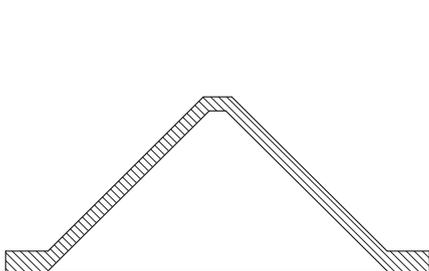
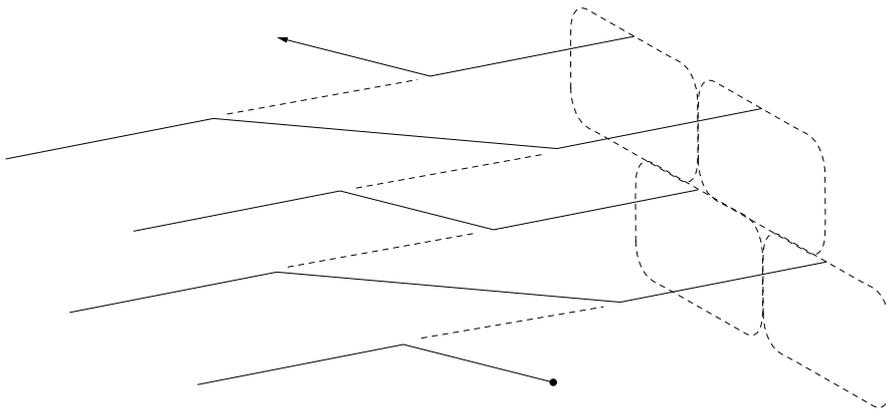
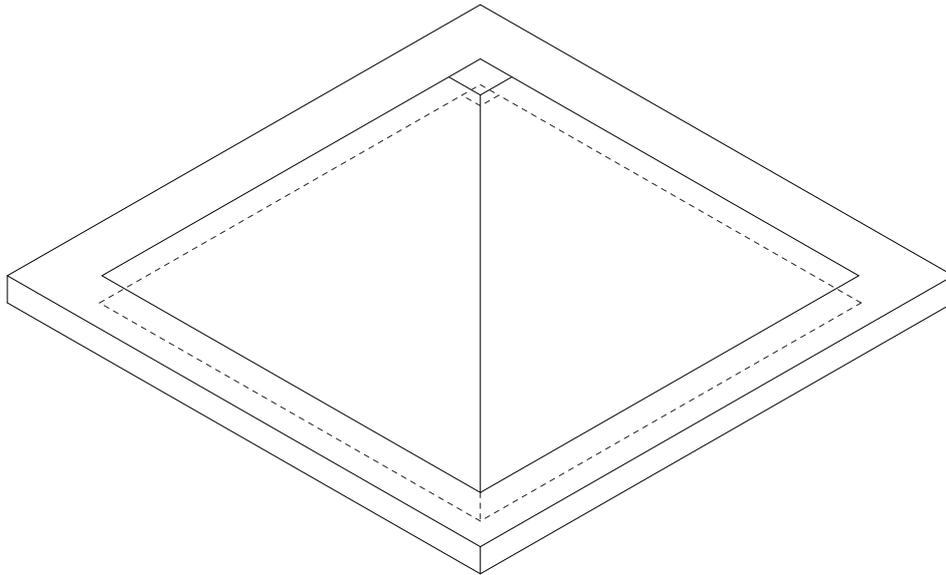
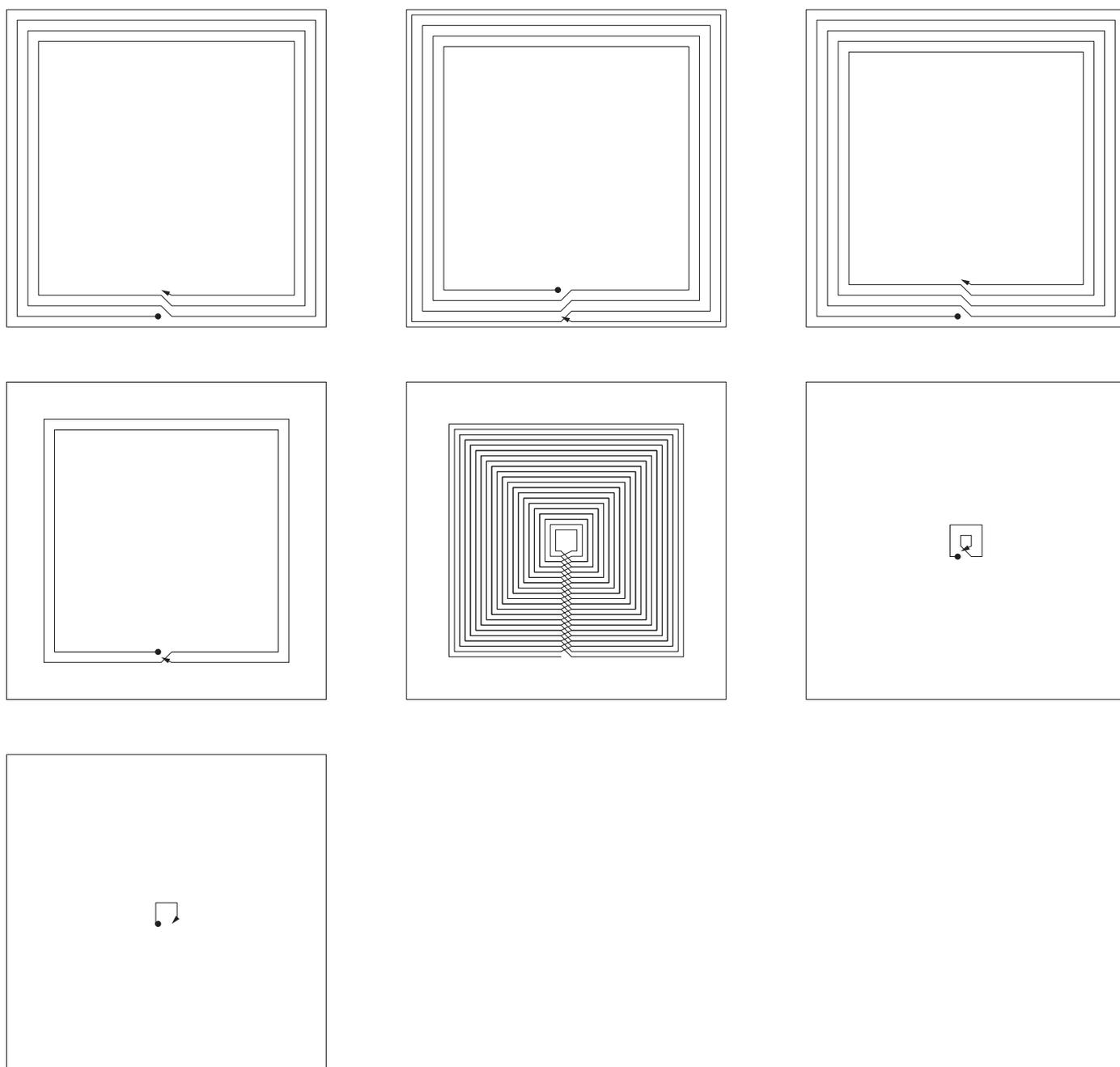


Bild 85. Auszug Printpfade Drucksample Freidruck



Druckdaten	/Teil	/m <sup>2</sup>	[ ]
Zeit:	3:24	14:45	min
Pfadlänge:	51,0	221,2	m
Volumen:	6,5	28,3	l
Gewicht:	15,0	65,1	kg

Bis zu einem gewissen Punkt ermöglicht 3DCP Geometrien mit einem Freidruckanteil herzustellen. Dies bedeutet, dass die Stränge sich teilweise nicht vollständig auf deren darunterliegenden Schicht abstützen. Der dazu gefertigte Prototyp besteht aus konzentrischen, zur Bauteilmitte hinlaufenden Bahnen, welche in einer Spirale verlaufen. Nach einer dreischichtigen Basis, verjüngt sich dieser auf einen zwei Schichten breiten Pyramidenstumpf.

Dessen Steigung ergibt sich aus einer Verschiebung der aufeinanderfolgenden Bahnen in Richtung Zentrum. Diese ist durch den Zusammenhalt der einzelnen Lagen begrenzt (Näheres siehe S51 - Addition).

Der Wechsel von einer auf die nächst höher liegende Schicht erfolgt über einen Knoten, an welchem sich die Bahnen überkreuzen. Dadurch wird der Pyramidenquerschnitt layerweise jeweils von innen nach außen gedruckt.

Bild 86. Druckseite des Samples Freidruck

---

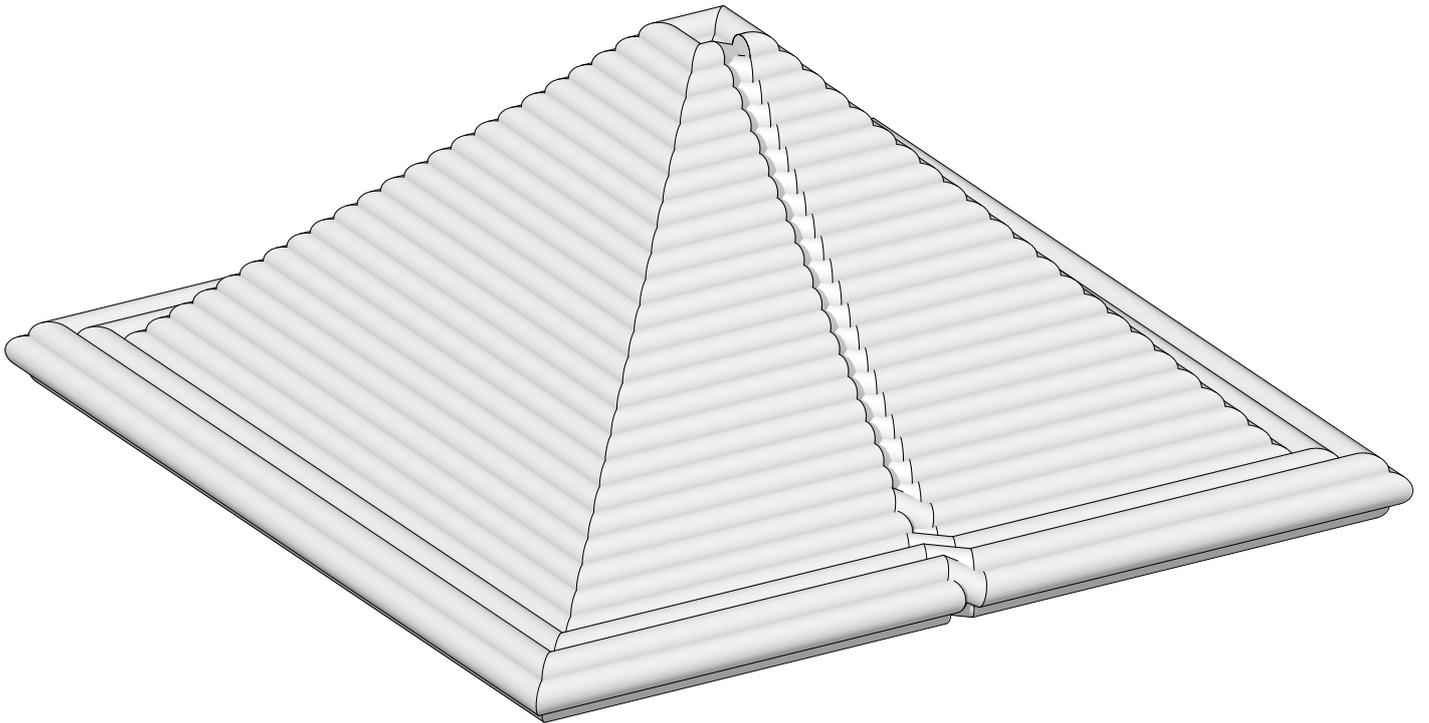


Bild 87. Schalungsseite des Samples Freidruck

Stand Oktober 2018: Die angezielten Überhänge des Samples sind zu diesem Zeitpunkt noch nicht fertigbar, da der Zusammenhalt zwischen den auskragenden Druckstränge noch keine ausreichende Stabilität gewährleistet.

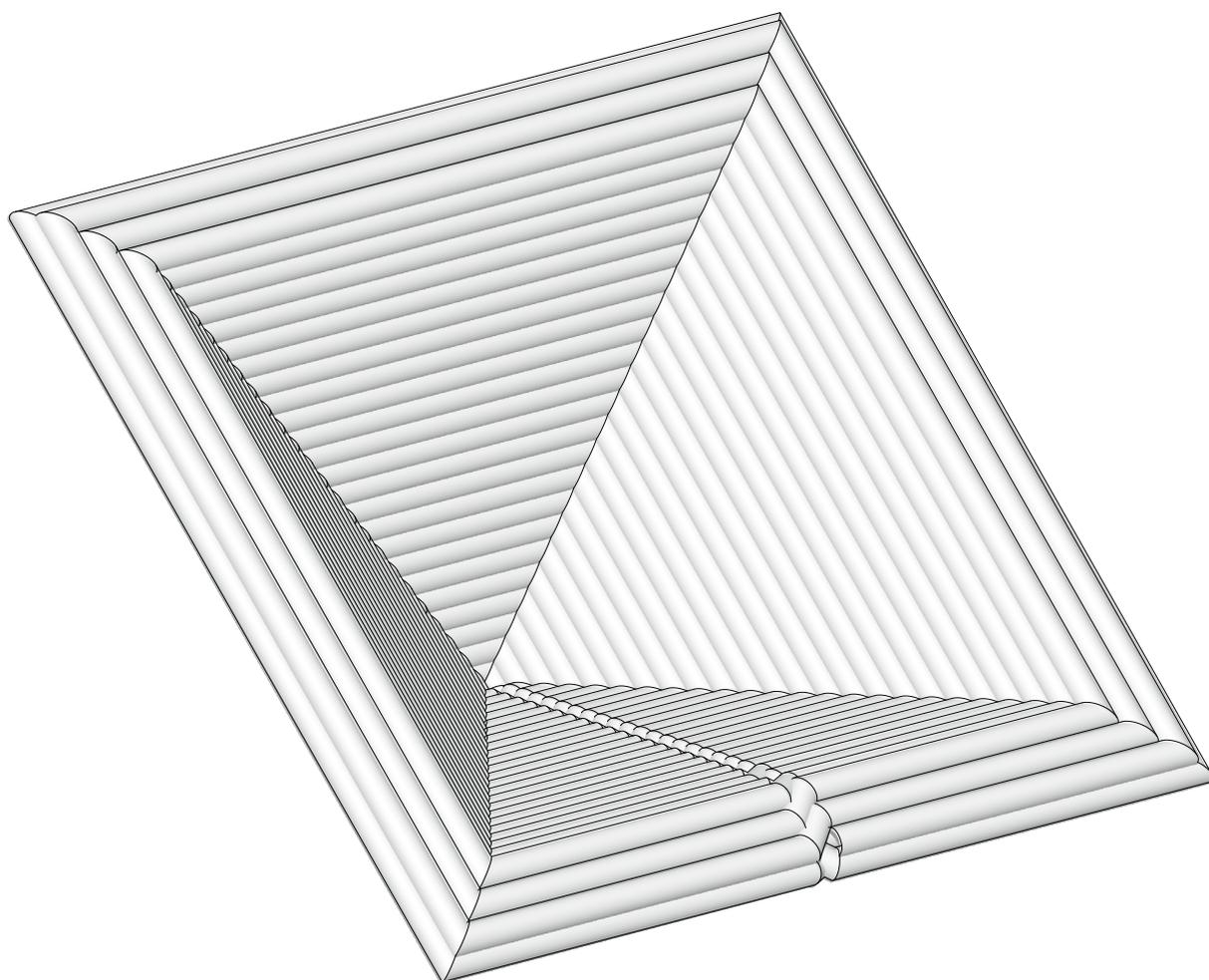


Bild 88. Eigenschaften Drucksamle Hinterschneidung

Drucksamle idealisiert

Lösung des Layerwechsels im Freidruckbereich

Schnitt des Samples

Ausrichtung der Druckpfade in den einzelnen Layern

## Hinterschneidung

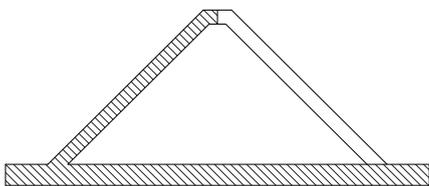
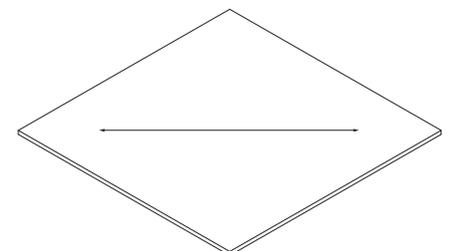
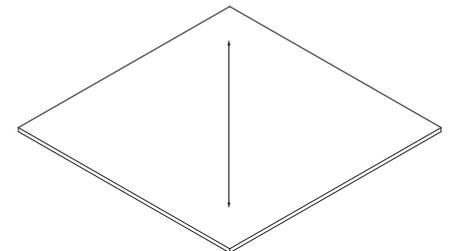
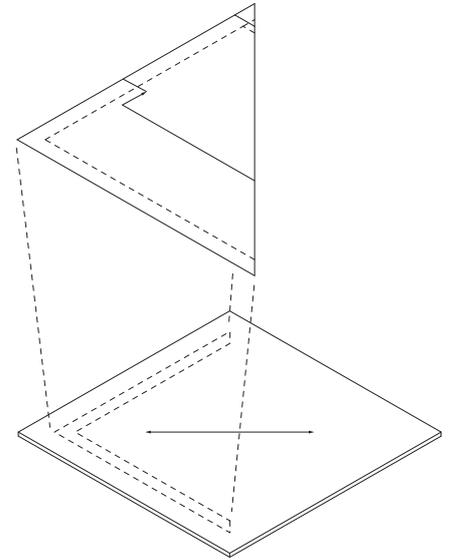
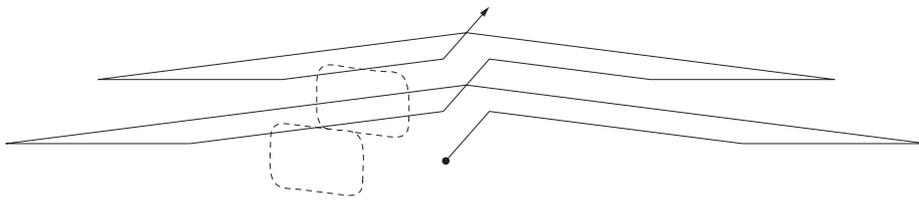
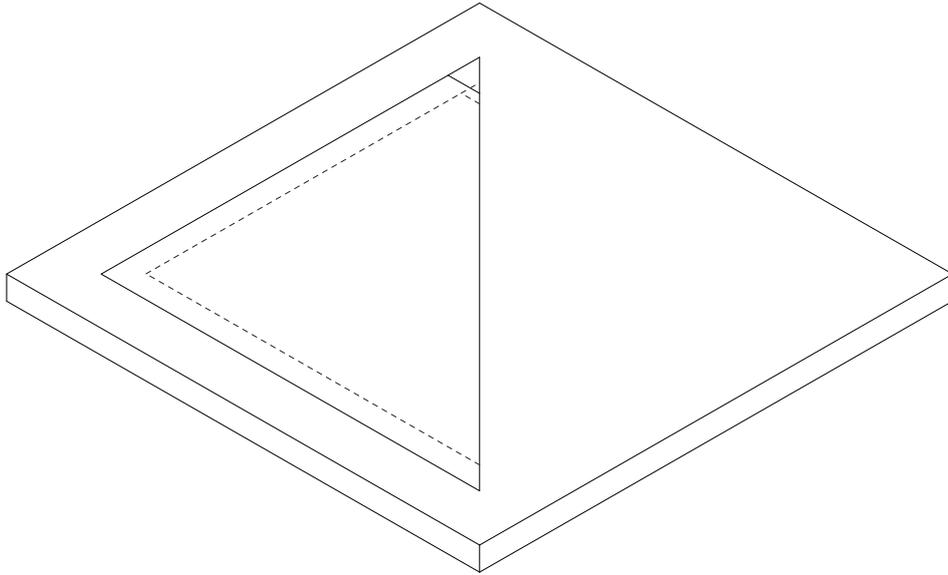
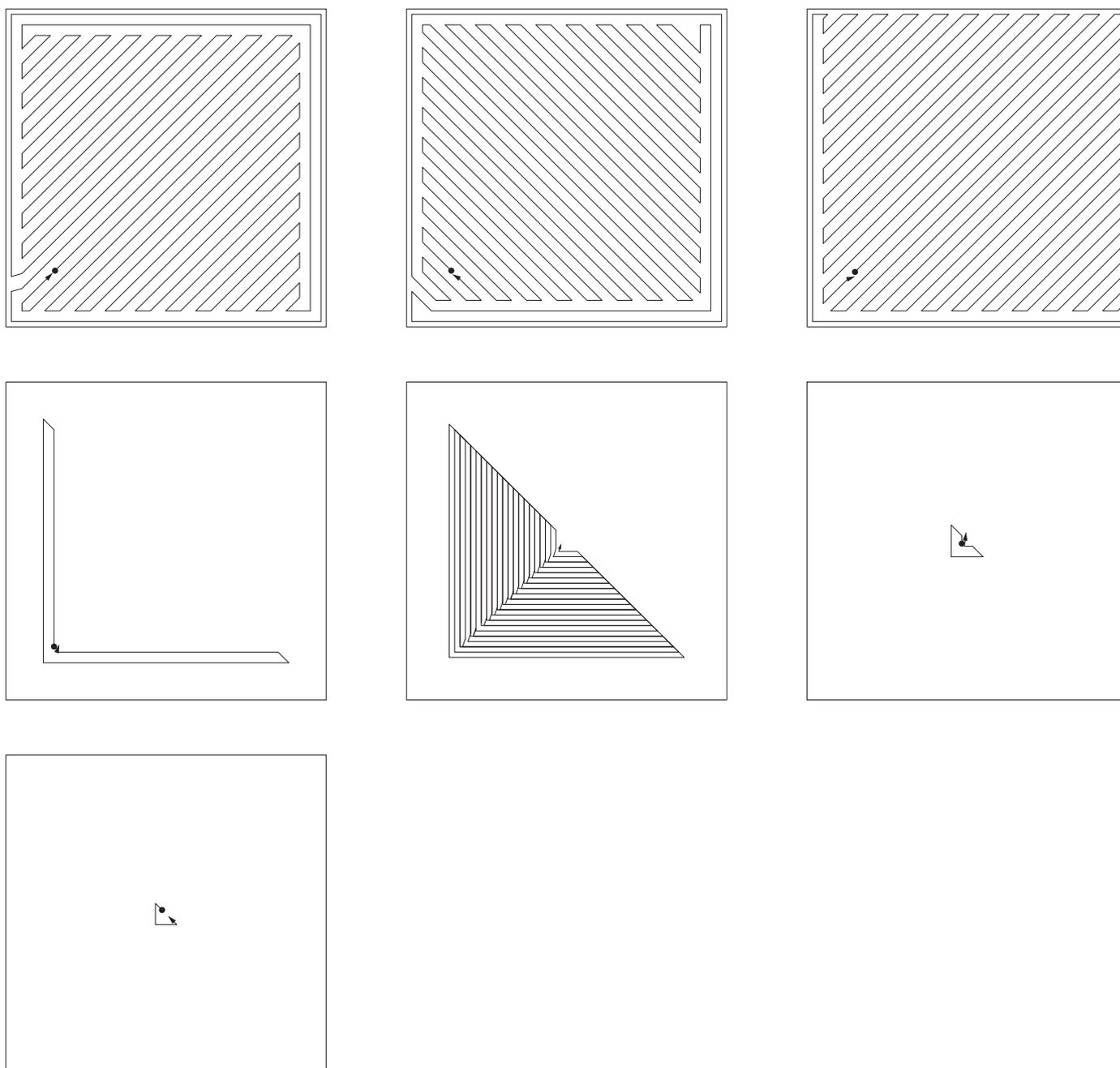


Bild 89. Auszug Printpfade Drucksample Freidruck



Druckdaten	/Teil	/m <sup>2</sup>	[ ]
Zeit:	4:02	17:30	min
Pfadlänge:	60,5	262,5	m
Volumen:	7,7	33,6	l
Gewicht:	17,8	77,3	kg

Da beim 3DCP die Werkstücke von unten nach oben Schichtweise aufgebaut werden, besteht die Möglichkeit Hinterschnidungen oder sogar geschlossene Hohlräume zu erzeugen.

Die Überhänge sind dabei Freidruckpfade und unterliegen somit deren maximalen Versatzwinkeln.

Der dreischichtig ausgekreuzten Platte des Prototyps, ist ein halber, zwei Stränge brei-

ter Pyramidenstumpf aufgesetzt. Dessen Pfade laufen jeweils pro Schicht einmal um die L-förmige Geometrie.

Der Wechsel auf den nächsten Layer erfolgt immer an der Innenseite des Schenkels. Um diesen zu erreichen, liegt der Startpunkt des Printpfades der gesamten Geometrie direkt unter der Ecke des Pyramidenstumpfes.

Bild 90. Druckseite des Samples Hinterschneidung

---



Bild 91. Schalungsseite des Samples Hinterschneidung



Bild 92. Eigenschaften Dreischichtige Ebene Platte

Drucksampl idealisiert

Ausrichtung des Druckkopfes auf Geometrie

Drucksampl auf Schalung

Ausrichtung der Druckpfade in den einzelnen Layern

## Gekrümte Platte

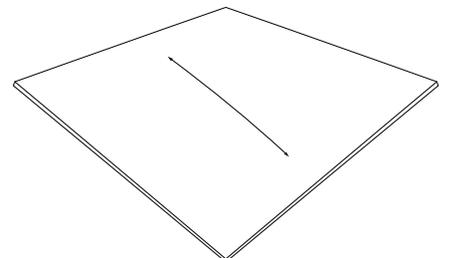
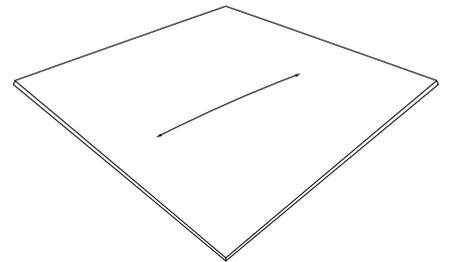
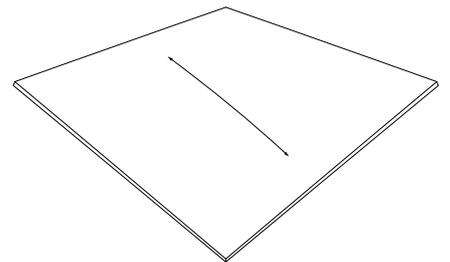
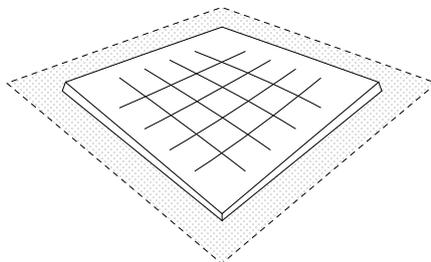
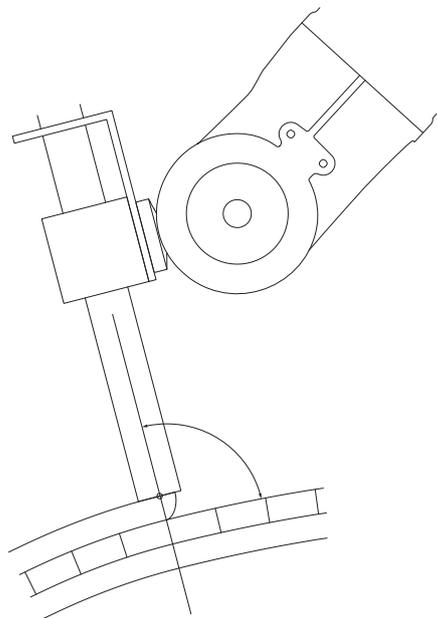
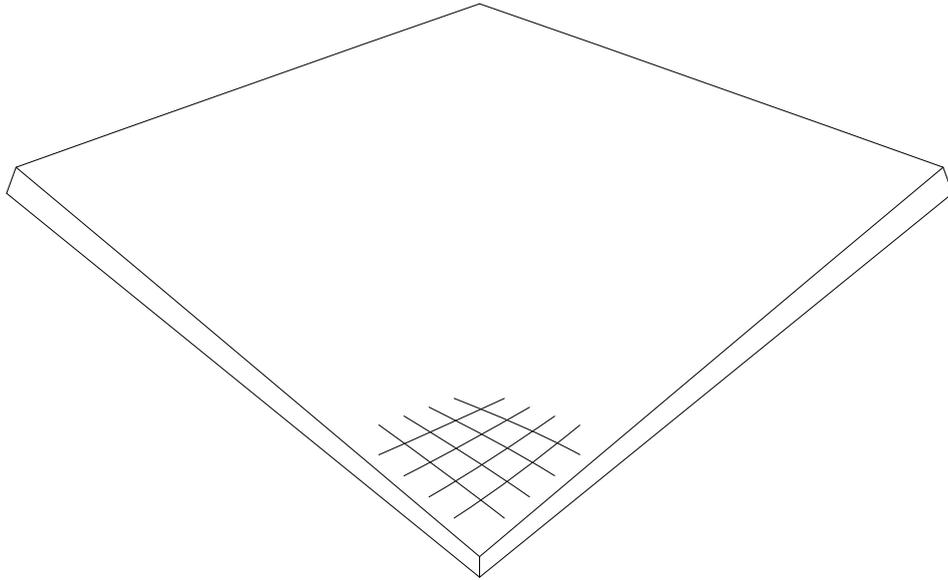
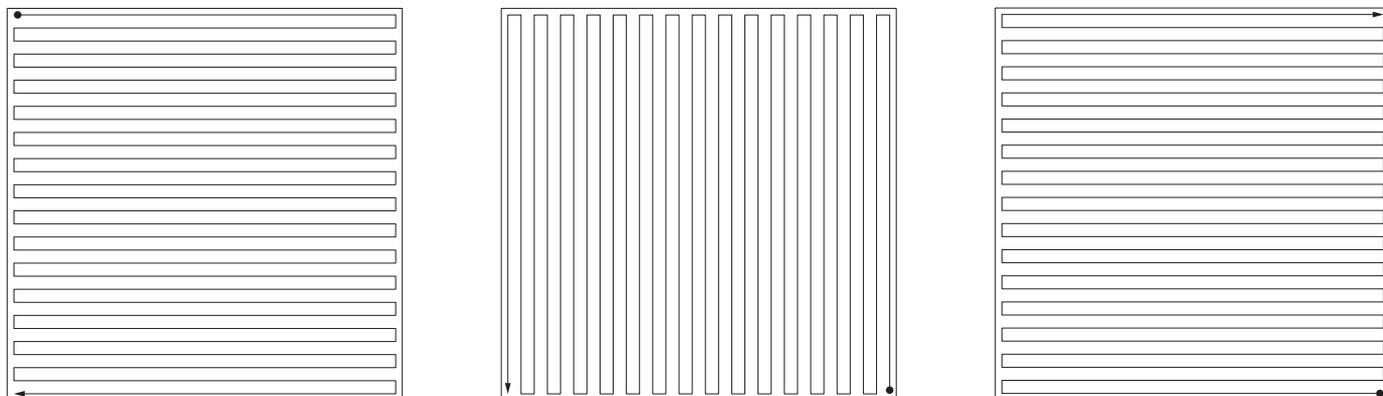


Bild 93. Printpfade Drucksample Gekrümmte Platte



Druckdaten	/Teil	/m <sup>2</sup>	[ ]
Zeit:	2:54	12:35	min
Pfadlänge:	43,5	188,8	m
Volumen:	5,6	24,2	m <sup>3</sup>
Gewicht:	12,8	55,6	kg

Um gekrümmte Teile ohne Freidruckmethode herzustellen, werden Schalungen in der gewünschten Form benötigt (Näheres siehe S34 - Schaltisch).

Im Falle des gefertigten Prototyps wurde diese aus XPS gefräst und anschließend, um die Oberfläche zu verbessern, dementsprechend nachbehandelt.

Die Anordnung der Printpfade erfolgt nach dem selben Prinzip der ebenen dreischich-

tig ausgekreuzten Platte.

Um zu gewährleisten, dass der Druckkopf immer orthogonal auf seinen Untergrund steht, wird dieser, im Gegensatz zu allen anderen Prototypen, im Fünffachverfahren positioniert (Näheres siehe S49 - Positionierung).

Bild 94. Druckseite des Samples Gekrümmte Platte

---



Bild 95. Schalungsseite des Samples Gekrümmte Platte

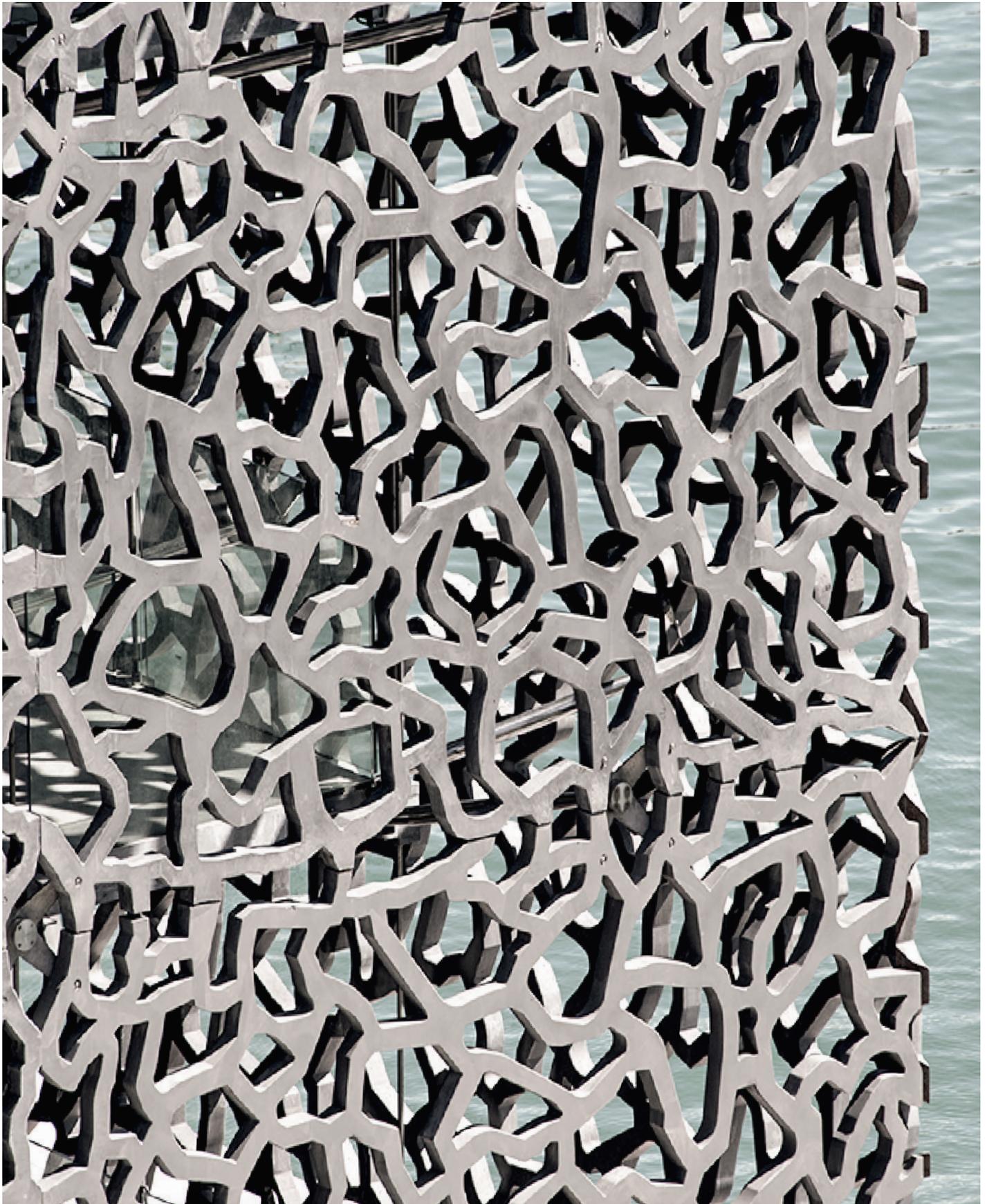




Anwendungen in der Fassade

Bild 93. Fassade des Mucem Marseille

Die aus UHPC gegossene Fassade benötigte aufwendig gefertigte Schalungen zur Herstellung ihrer verschieden geformten Elemente. Solche Geometrien könnten zukünftig mittels 3DCP hergestellt werden.



## Fassade - lat. „facies“ - Gesicht

Gebäude enthalten, gegensätzlich zu anderen Bauwerken, Räume, welche von einer schützenden Hülle umgeben sind. Die Notwendigkeit zur Herstellung dieser Hülle als Schutz vor der Außenwelt stellt den Ursprung des Bauens dar. Ihre beinhaltenen Räume sind integraler Teil der menschlichen Kultur und spiegeln diese wider.<sup>36</sup>

Ursprünglich suchte der Mensch Schutz in natürlichen Unterkünften wie Höhlen und anderen Hohlräumen. Mit der Zeit wurde er sesshaft und erstellte selbst diese Unterkünfte aus den ihm zur Verfügung stehenden Materialien. Hierbei verkleinerte sich der vorher aus Erd- oder Gesteinsmasse bestehende Schutz zu einer dünnen Schicht. Die Außenwand mit einer Innen- und Außenseite war entstanden. Sie trennte das Private vom Öffentlichen und gab Schutz vor Witterung und Feinden. Des Weiteren diente ihre Außenseite, wie schon die in Höhlen bestehende Innenseite, als Bildträger und definierte dadurch das Gebäude in seinem Erscheinen. Sie wurde zum Informationsträger. Technisch entstand sie aus den bestehenden klimatischen Bedingungen, sowie dem Vorkommen von Rohstoffen. Die Außenwände geben damit die Entwicklung einer Region und derer Kultur wider und sind gleichzeitig ein Teil davon.<sup>36</sup>

Allgemein werden Außenwände als „Fassaden“ bezeichnet, abgeleitet vom französischen Wort „la façade“ - die Außenseite, aus dem Lateinischen stammenden „facies“. Dabei treten die Schutz- und klimatische Regulierungsfunktion des Bauteils in den Hintergrund und es wird der Fokus auf das Erscheinen gelegt. Die Fassade

ist somit ein Gesicht, ein Informationsträger, welcher von außen betrachtet wird und selbst in seine Umgebung blickt. In diesem Kontext gesehen ist die Qualität der Erscheinung der Außenfläche eines Gebäudes nicht minder wichtiger, als die der Innenfläche. Denn über die Wirkung eines einzelnen Gebäudes hinweggesehen, formuliert die Summe der Fassaden einer Straße oder einer ganzen Stadt die Gestalt unseres öffentlichen Raumes.<sup>36</sup>

Daher sei bei der Gestaltung einer Fassade zum einen auf eine technische und wirtschaftliche Vorgehensweise zu achten, zum anderen auf eine nicht nur ökologische, sondern auch funktionale und im besten Fall, einer dadurch ergebenden und einhergehenden optischen Nachhaltigkeit, zu achten.

Die Verwendung von Beton zum Bau von Fassaden ist naheliegend, da dieser beständig gegen Umwelteinflüsse ist und hervorragende statische Eigenschaften besitzt. Bisweilen wurden Fassaden durch Gießen des Betons in im Vorfeld gefertigte Schalungen hergestellt. Dies ändert sich mit den von 3DCP gegebenen Werkzeugen.

Als Fassadenbauform eignet sich für 3DCP vor allem die elementierte Fassade. Durch die Herstellung der Fassadenteile in industrieller Umgebung kann dabei eine hohe und konstante Qualität der einzelnen Fassadenelemente gewährleistet werden.

Im Gegensatz zur konventionellen Fertigung dem Gießen, liegt der große Vorteil vom Drucken der Betonteile im Bereich der Schalung. In erster Linie wird keine Kon-

terschalung benötigt, da diese durch das gezielte Auftragen des Betons wegfällt. Es lassen sich statisch optimierte Bauteile einfach herstellen, indem Beton und Bewehrung dort platziert und verteilt werden, wo diese benötigt werden, was wiederum wertvolle Ressourcen einspart.

Sind speziell ausgeformte Geometrien herzustellen, für welche ebene Schalungen nicht ausreichen, werden diese meist gefräst, was eine große Menge Abfall entstehen lässt. Durch im Freidruck gefertigte Bauteile werden sie nicht benötigt. Öffnungen und Ränder lassen sich ebenfalls leicht herstellen, da diese keine zusätzliche Schalung benötigen.

Zu guter Letzt liegt die große Stärke des Verfahrens in der Losgröße der zu fertigen Bauteile. Da nicht für jede Form eine eigene Schalung hergestellt werden muss, rentiert sich das Verfahren schon bei einer Losgröße von nur einem Teil. Somit lassen sich auf kostengünstige Weise differenzierte Bauteile herstellen und ermöglichen die rentable Herstellung von Fassaden, welche keine wiederkehrenden Elementformen benötigen. Dadurch ist es auch nicht nötig, unbedingt an einem gleichmäßigen rechteckigen Fassadenraster festzuhalten. Dies ermöglicht eine Vielzahl neuer Gestaltungsmöglichkeiten.

Im Folgenden werden zwei entwickelte Druckmuster beschrieben, welche exemplarisch für großflächige Anwendungen, wie Fassaden, herangezogen werden können. Sie illustrieren das Potential des 3DCP bezüglich Formgebung und zeigen, welche Geometrien ein Entwerfen in Strängen entstehen lässt.

Bild 94. Druckpatern Welle während des Druckens

Bild 95. Druckpatern Hexagon während des Druckens

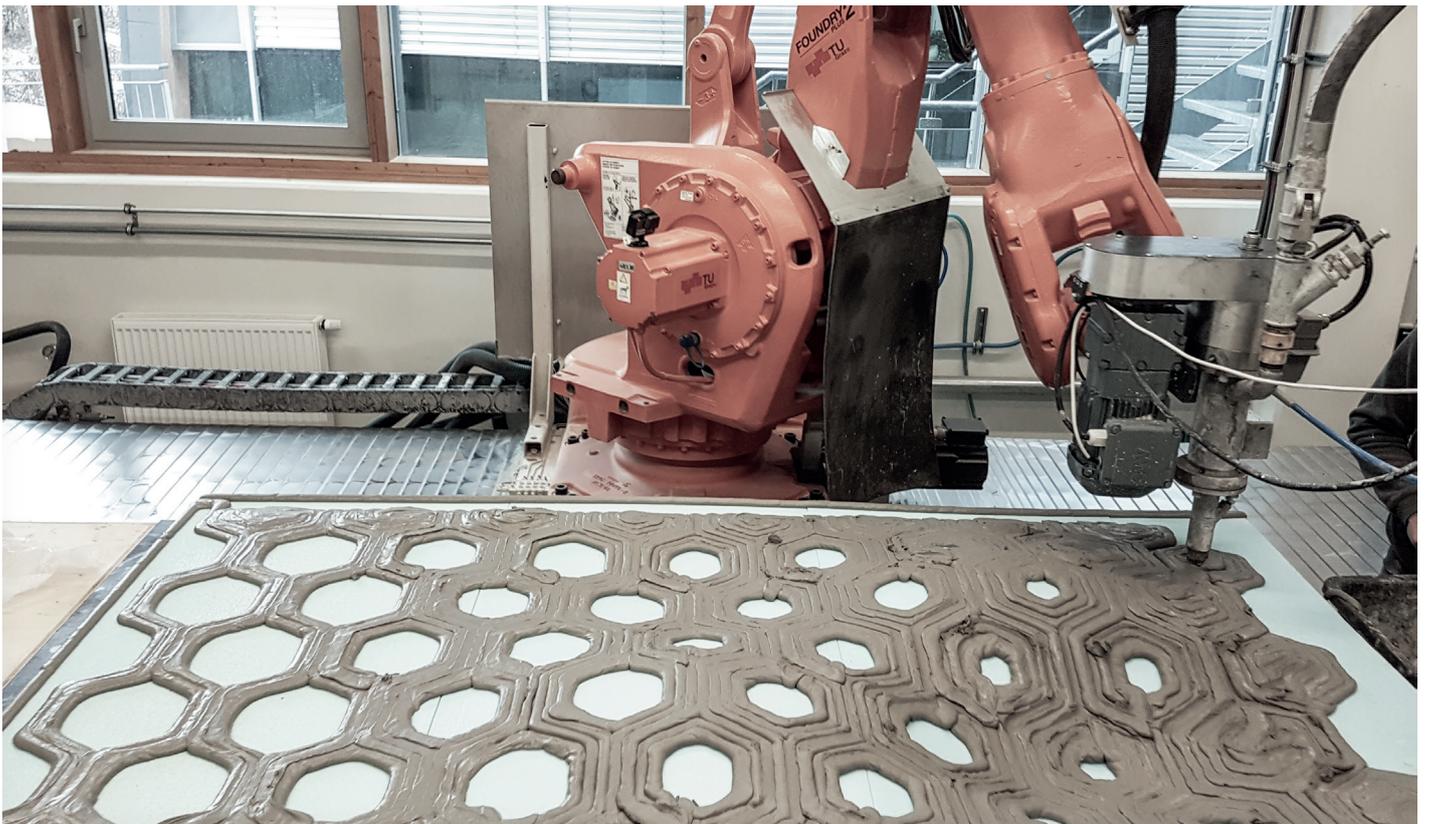
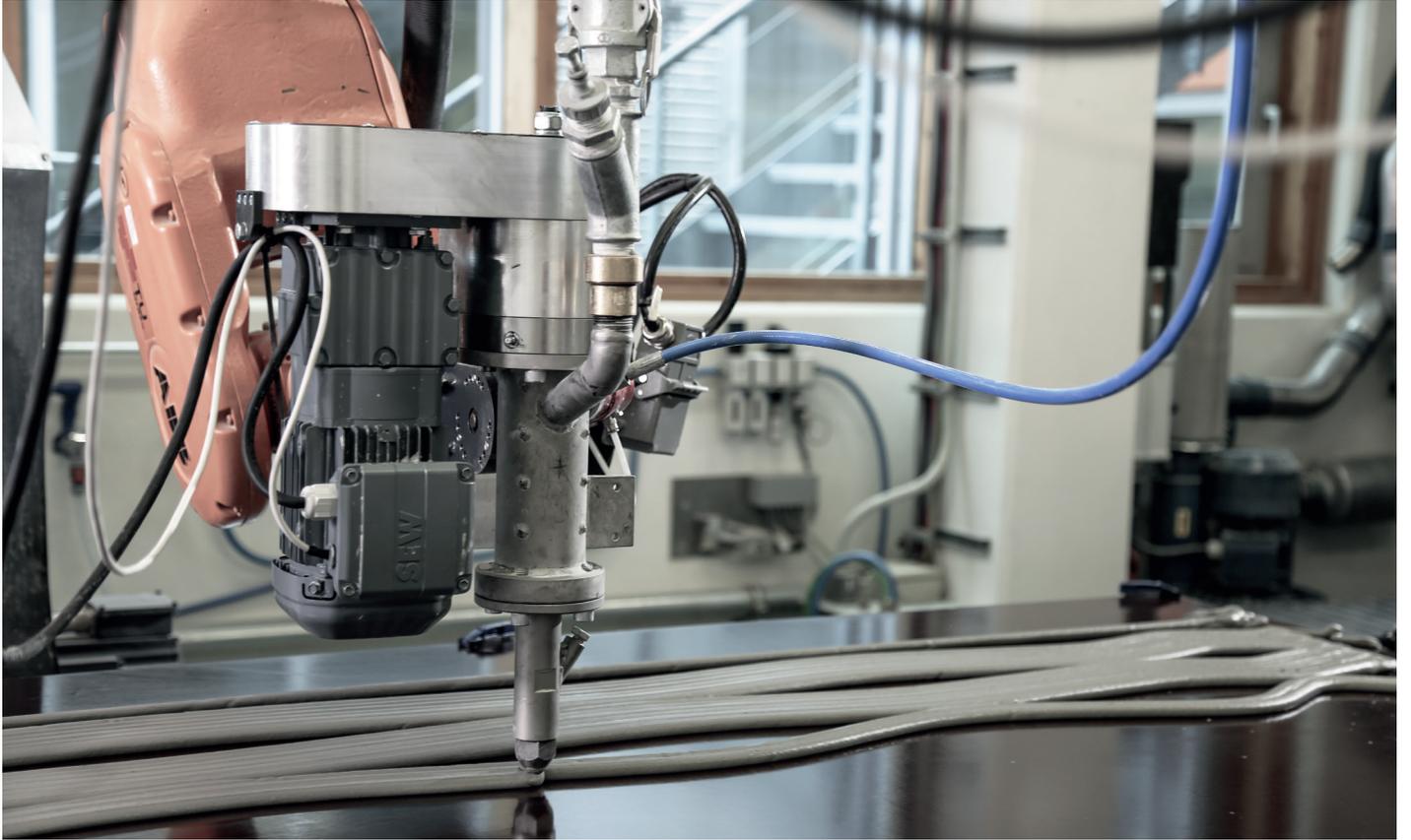


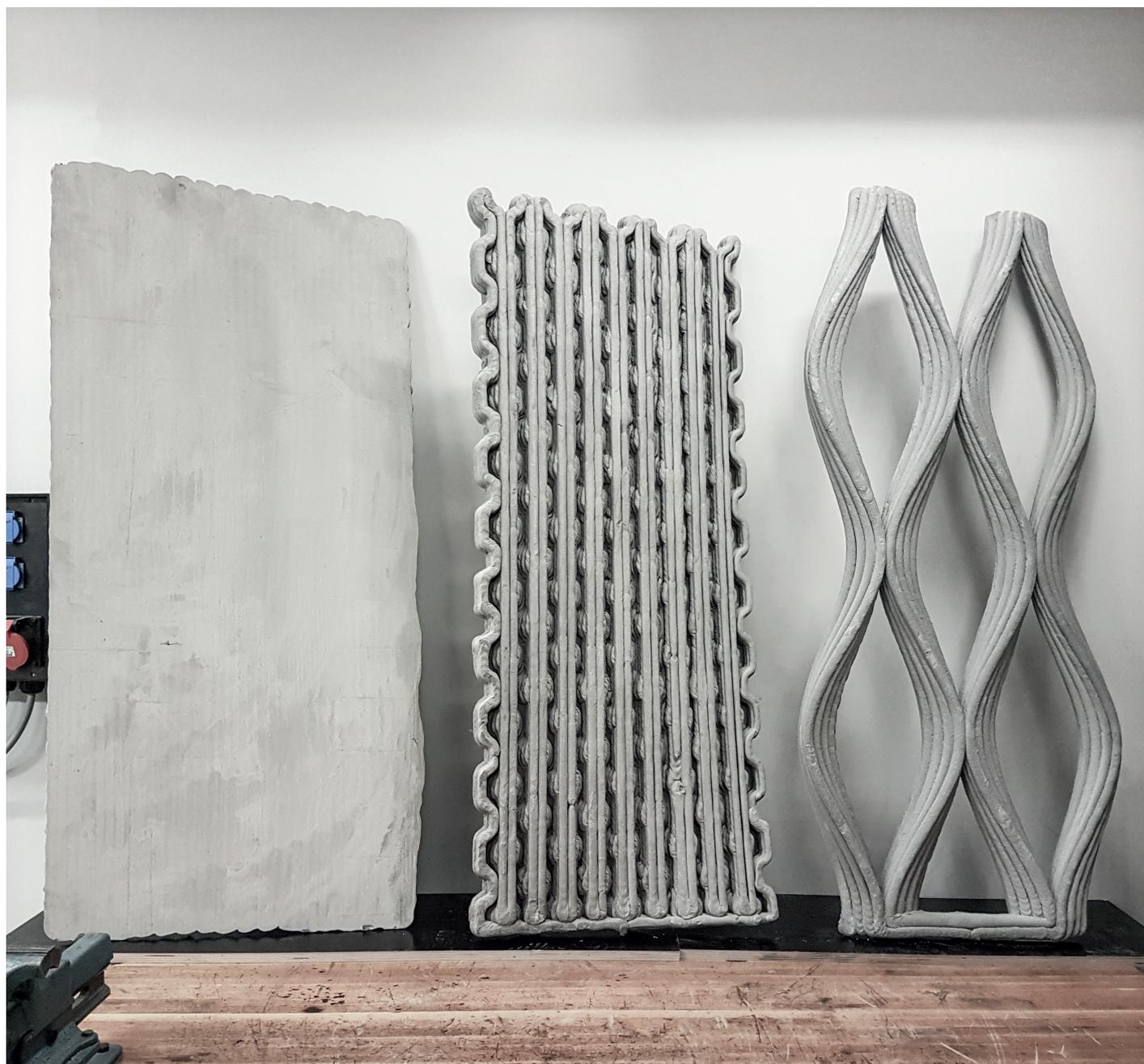
Bild 96. Erste Prototypen für großflächige Druckerwendungen

Alle Prototypen wurden ohne Zugabe von Beschleunigern gefertigt und auf eine doppelt gekrümmte Holzschalung gedruckt.

Schalungsseite einer geschlossenen dreischichtigen Platte

Druckseite der Geometrie Hexagon mit gleichmäßigen Domes

Druckseite der Geometrie Wellen mit ausschließlich unidirektionalen Pfaden



Beginnend mit einer Skizze und dem einfachen Verfolgen von Linien entstanden zwei Muster, welche sich beliebig vergrößern und erweitern lassen. Sie sind verformbar und flexibel anpassbar. Die größte Herausforderung dabei war die Vermeidung von Kollisionen dieser späteren Druckpfade und das Verfüllen von geschlossenen Flächen.

Ihr letztendliches Ziel ist die Anwendung auf eine großflächige Bauaufgabe, die

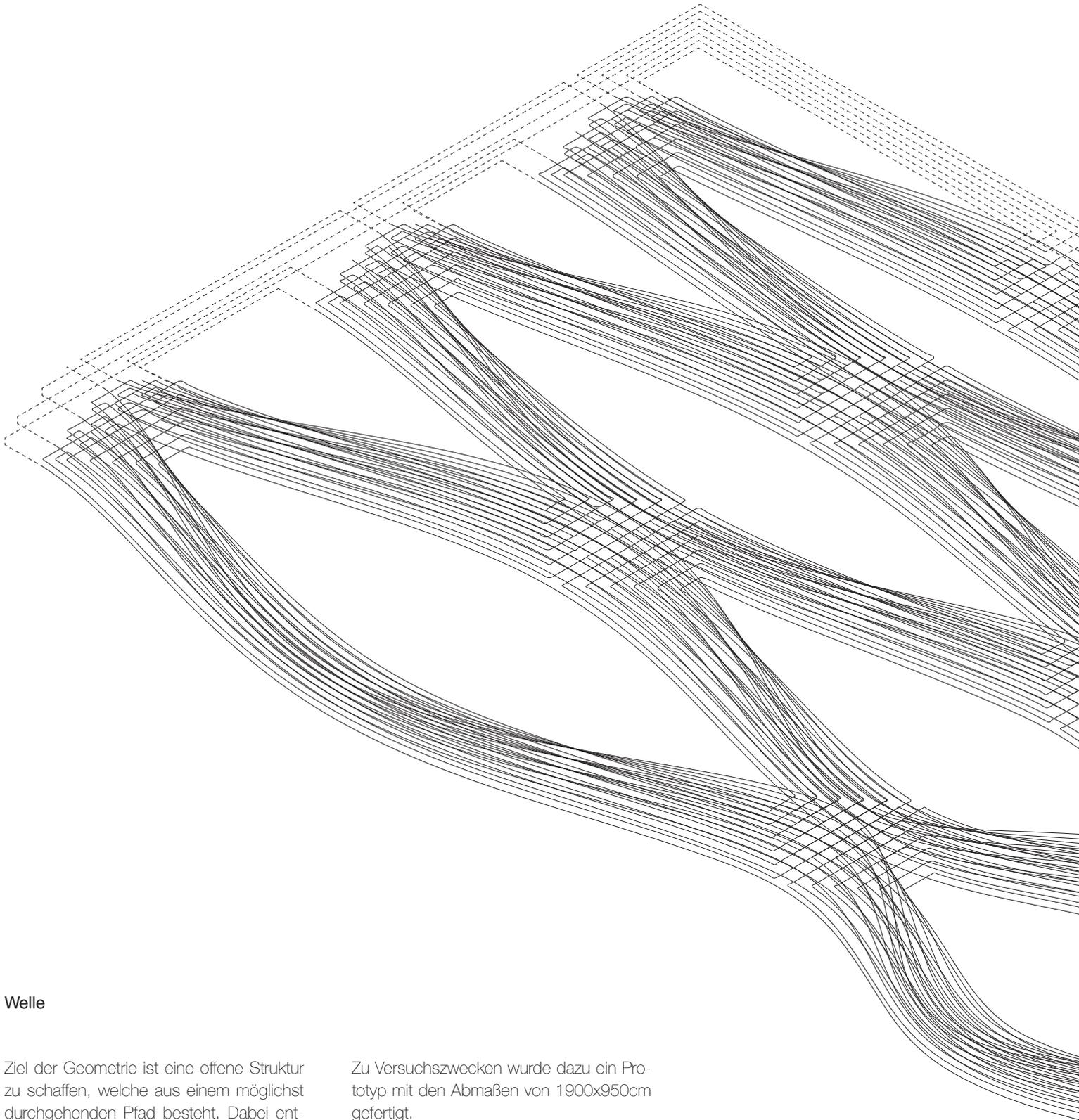
Fassade. Sie sollen durch parametrische CAD-Modelle auf deren jeweiligen Anforderungen maßgeschneidert werden können und somit Produkte liefern, welche individuell anpassbar sind.

Die Entwicklung der Druckpattern durchlief mehrere Stadien und es wurden Prototypen der Elemente in reduzierter Form gefertigt. Dabei wurden diese auf eine doppelt gekrümmte Holzschalung gedruckt. Die Druckpfade der Geometrie „Welle“

wurden anfangs unidirektional geführt. Somit kam es zu Schwachstellen an den Berührungspunkten der einzelnen Wellenquerschnitte. Beim Prototyp der Geometrie „Hexagon“ wurde versuchsweise eine Bewehrung mitgeführt. Aus den gesammelten Erfahrungen in der Fertigung der Prototypen basieren die letztendlich gedruckten Geometrien „Welle“ und „Hexagon“.

Bild 97. Isometrie Printpfade Prototyp Welle

---



## Welle

Ziel der Geometrie ist eine offene Struktur zu schaffen, welche aus einem möglichst durchgehenden Pfad besteht. Dabei entsteht ein planares Gitternetz, dessen Öffnungsform varierbar und die Ausdehnung beliebig erweiterbar ist.

Die Hauptsichtseite des fertigen Bauteils ist im Fertigungsprozess von der Schalung abgewandt und legt das dem Verfahren inwohnenden Prinzip der Addition von Strängen offen.

Zu Versuchszwecken wurde dazu ein Prototyp mit den Abmaßen von 1900x950cm gefertigt.

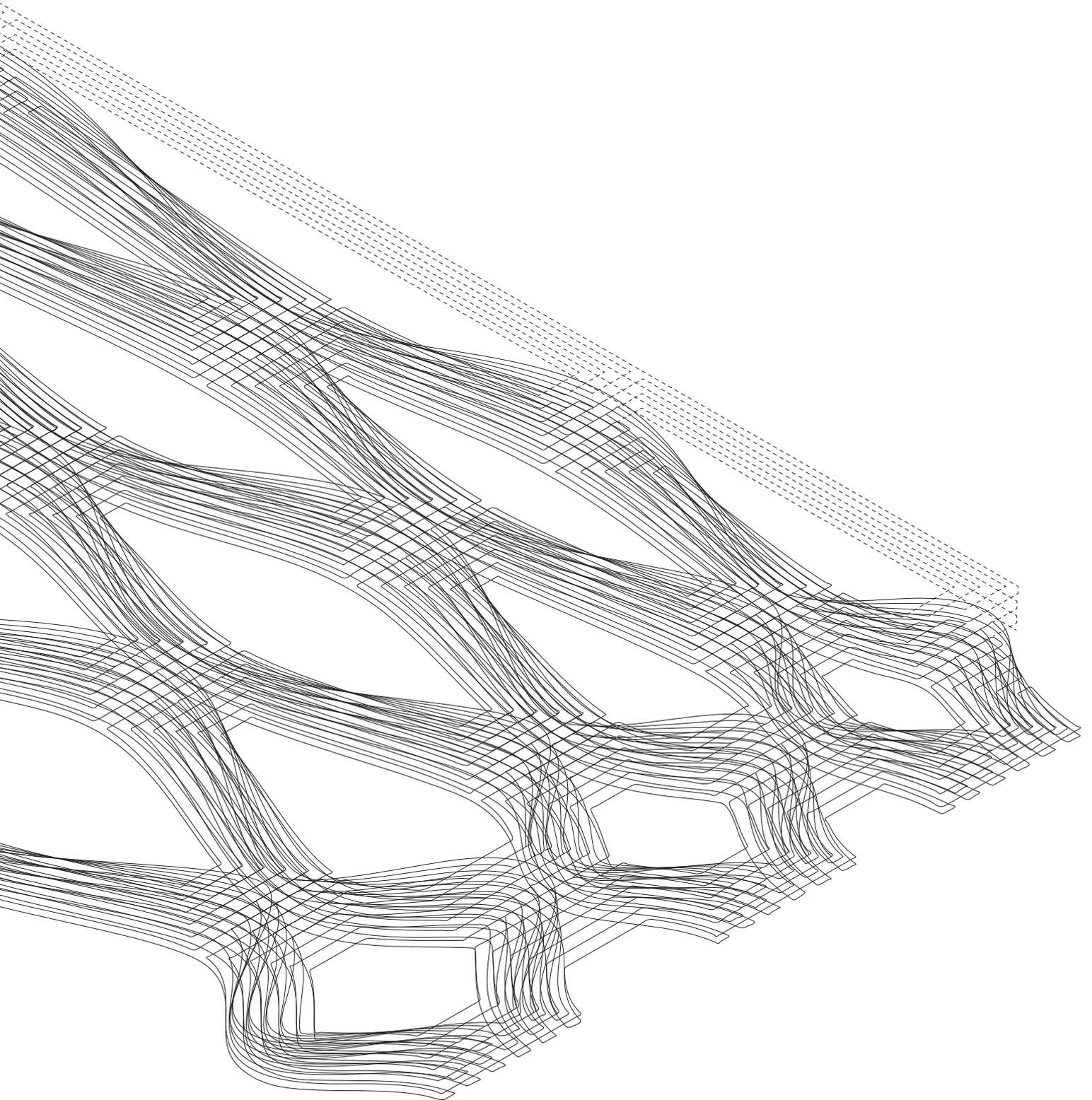
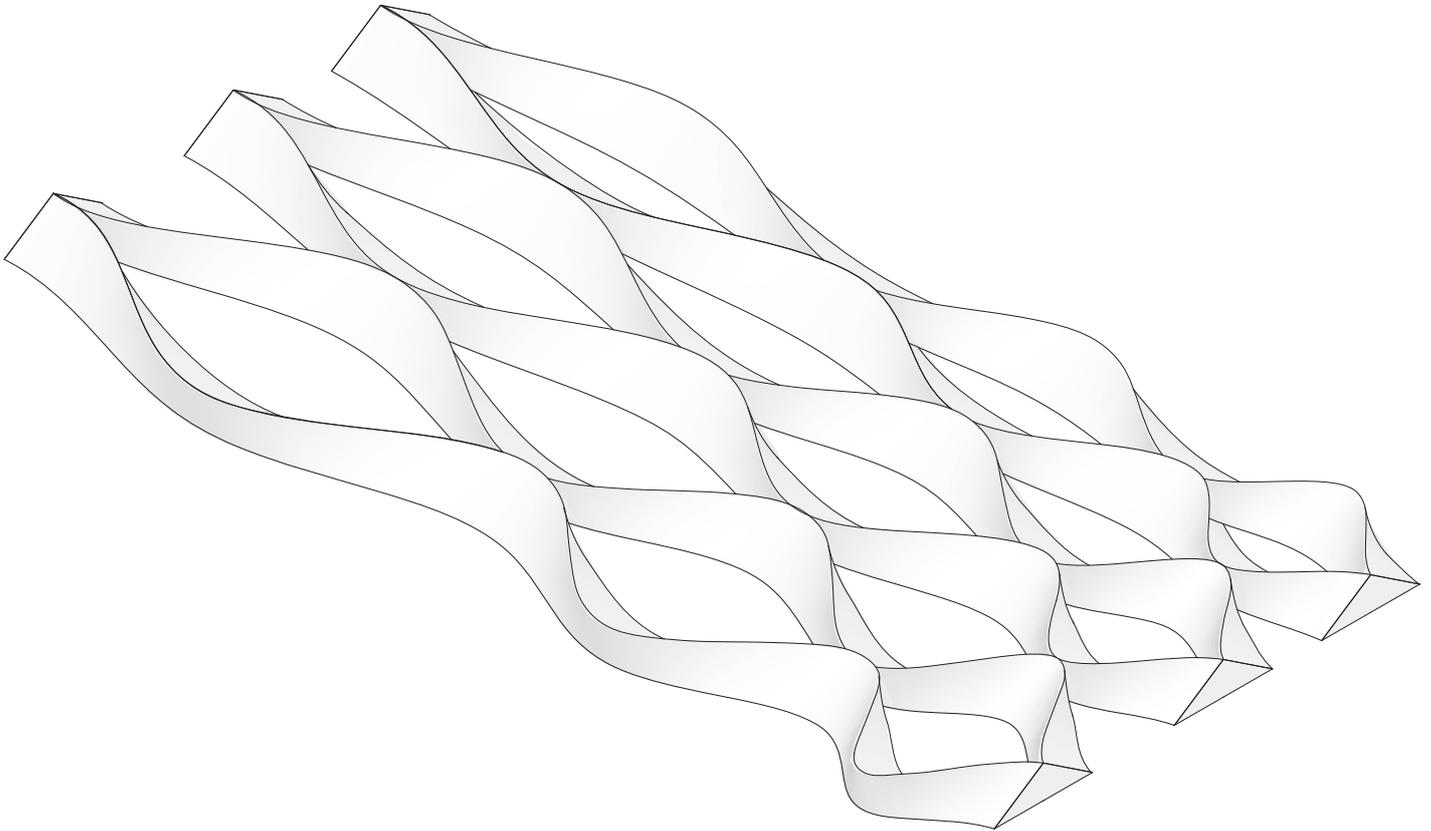


Bild 98. Idealisierte Darstellung Prototyp Wellen



Druckdaten	/Teil	/m <sup>2</sup>	[ ]
Zeit:	23:21	12:56	min
Pfadlänge:	350,3	194,0	m
Volumen:	44,8	24,8	l
Gewicht:	103,1	57,1	kg

Ausgangspunkt ist ein kontinuierlicher Pattern, bestehend aus Sinuswellen. Diese verlaufen durch einen Punktraster, welcher nach belieben verschoben und erweitert werden kann. Diesem folgen die Wellen und es entsteht dadurch ein eine Änderung der Öffnungs- und in weiterer Folge Wellenformen.

Der Querschnitt der Wellen entsteht durch eine layerweisen Reduktion der Pfadanzahl nach oben hin, ausgehend von einer be-

liebig festgelegten Basis. Die Strangpakete eines jeweiligen Layers berühren sich dabei mit ihren angrenzenden Wellen. Dadurch entsteht das Springen des oberen Grates der Wellen zwischen den einzelnen Berührungspunkten. Dies maximiert deren Fläche und gewährleistet hiermit einen guten Zusammenhalt des entstehenden Gitters.

Um an den Berührungspunkten ein durchlaufendes Bewehrungsgitter zu schaffen, wird die Druckrichtung des Patterns pro

Layer um 90° gedreht. Somit entstehen Knotenpunkte, welche in x und y Richtung auf Zug belastet werden können.

Beim Sprung von einem Layer auf den nächsten ist es nötig, dass zusätzliche Wege abgefahren werden, welche durch Nachbearbeitung entfernt werden müssen. Diese liegen jedoch an den Stirnseiten des Bauteils und sind, wenn dieses mit weiteren addiert wird, nicht sichtbar, da diese genau an den Berührungspunkten liegen.

Bild 99. Entstehung der Geometrie Welle

Variabler Raster

Schema eines Kreuzungspunktes aus sieben Layern

Abfahren der Geometrie in X-Richtung

Schema eines Kreuzungspunktes aus zwei Layern

Abfahren der Geometrie in Y-Richtung

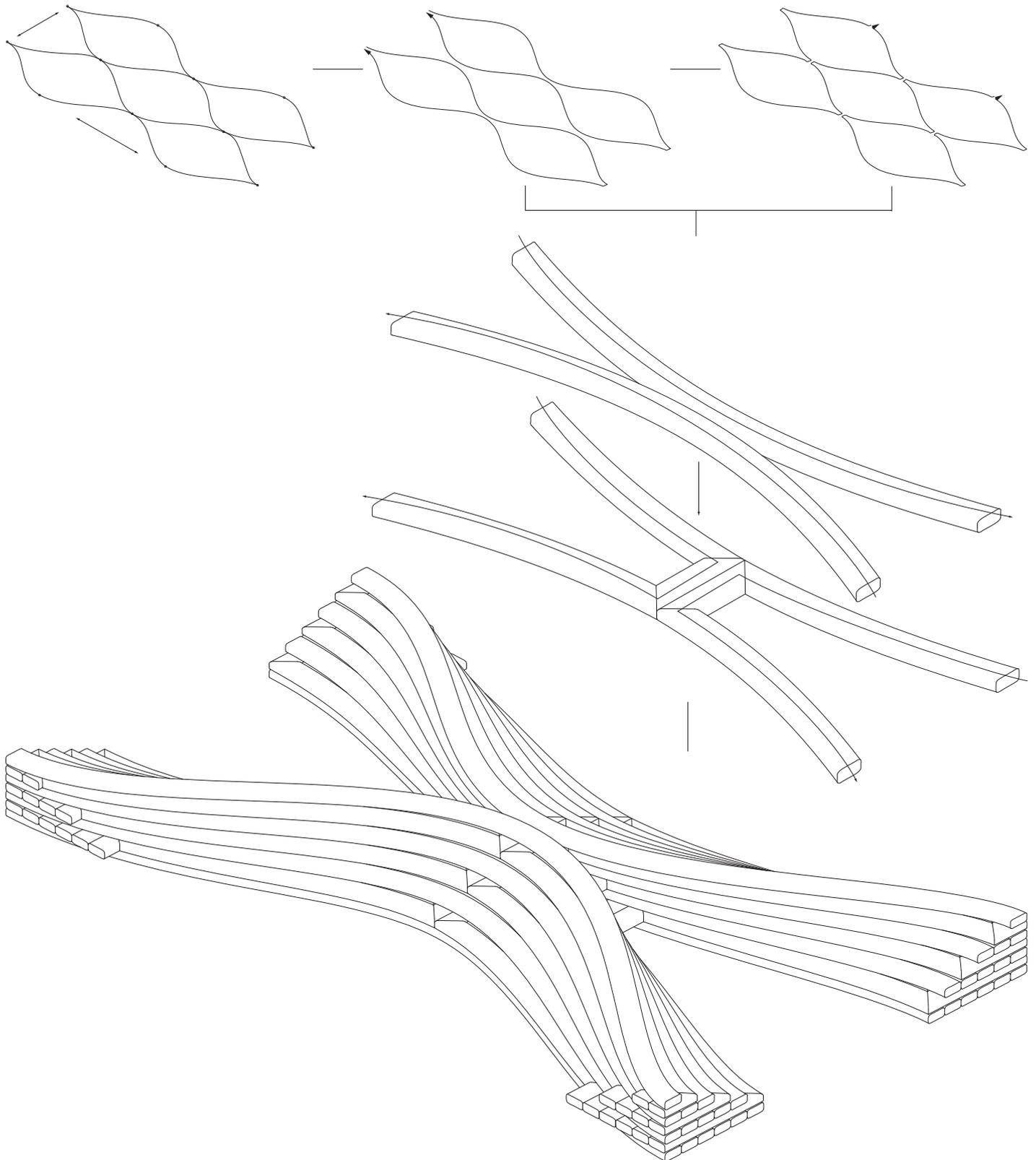


Bild 100. Auszug der Printpfade des gefertigten Prototypen  
Welle - Layer 1, 2, 3

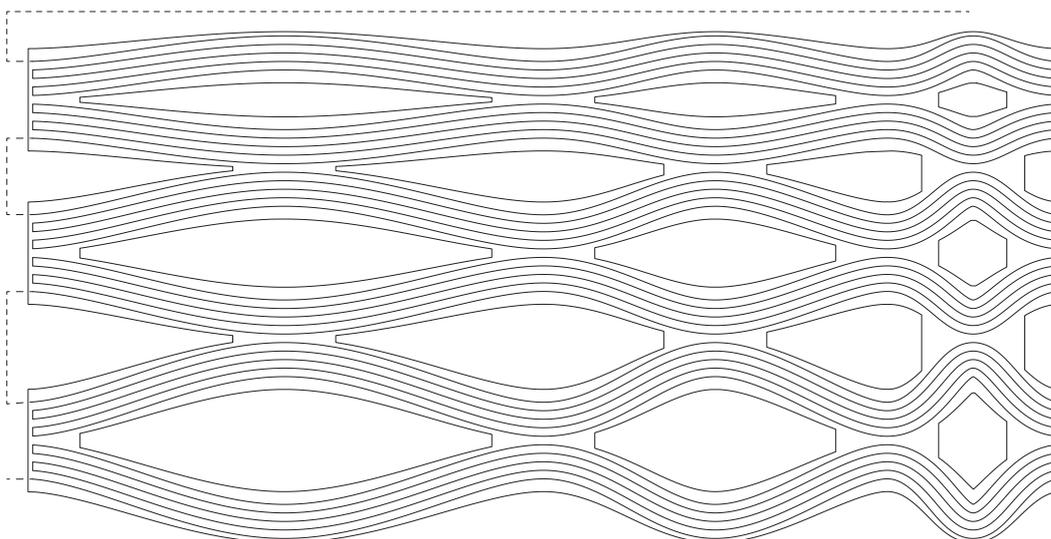
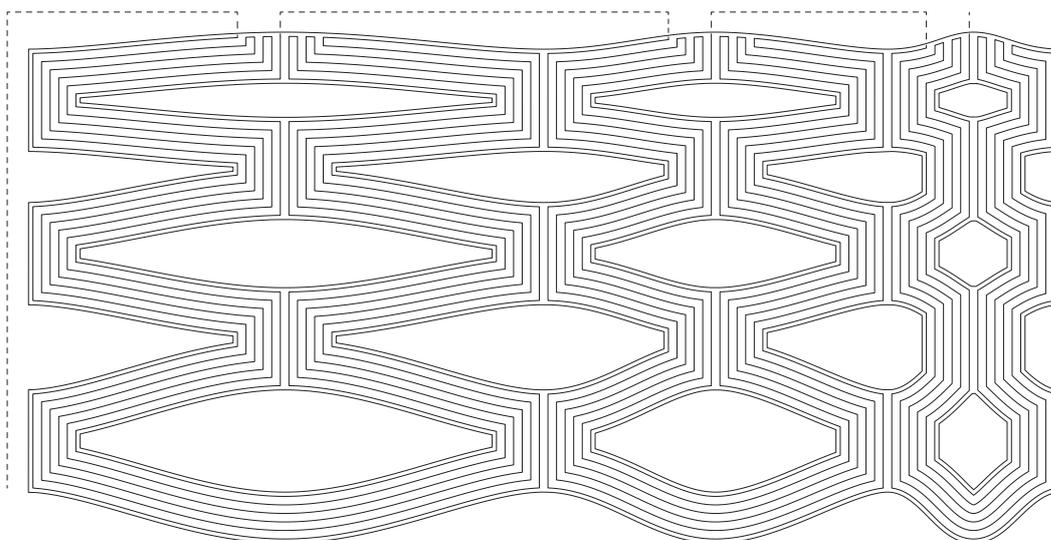
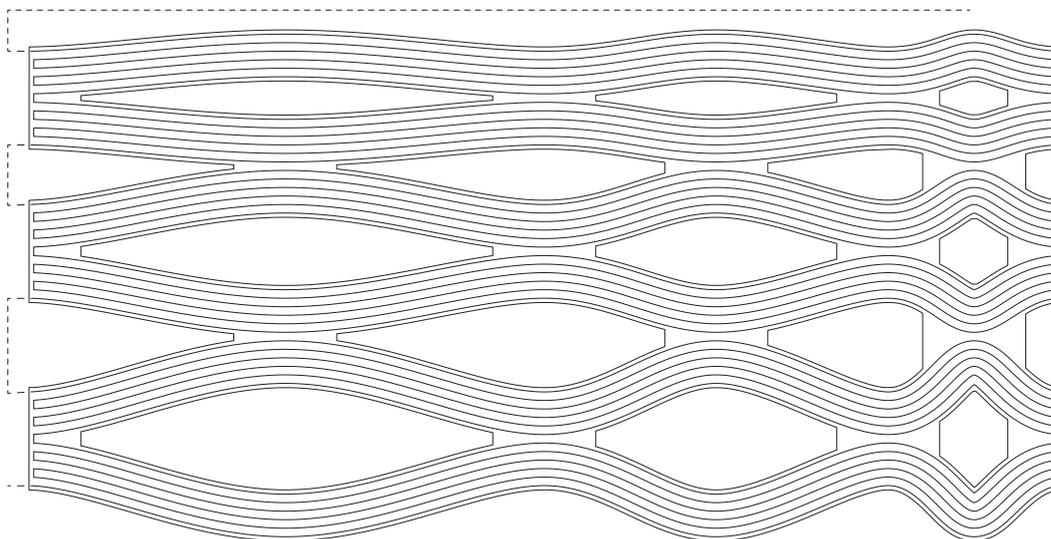


Bild 101. Auszug der Printfaden des gefertigten Prototypen  
Welle - Layer 5, 6, 7

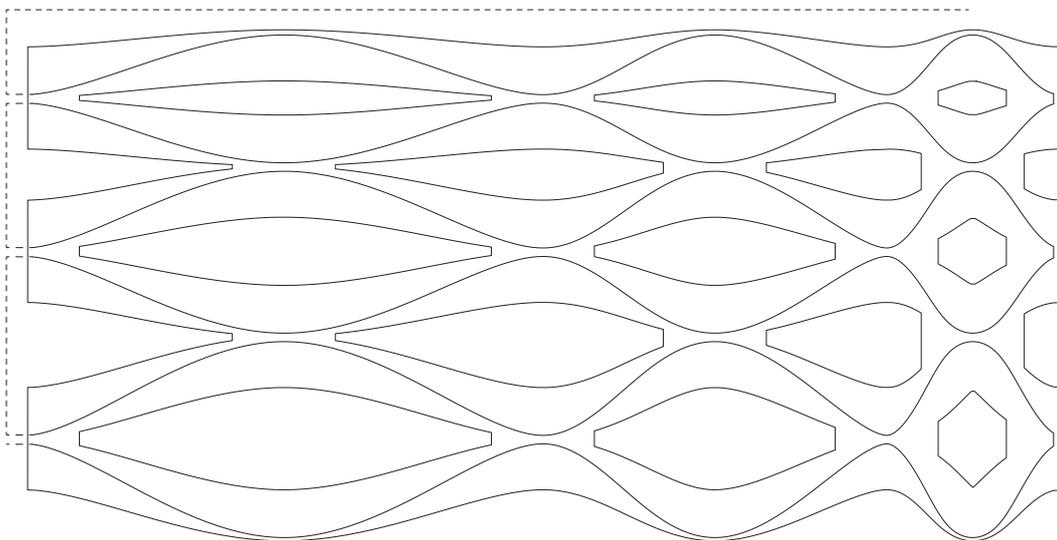
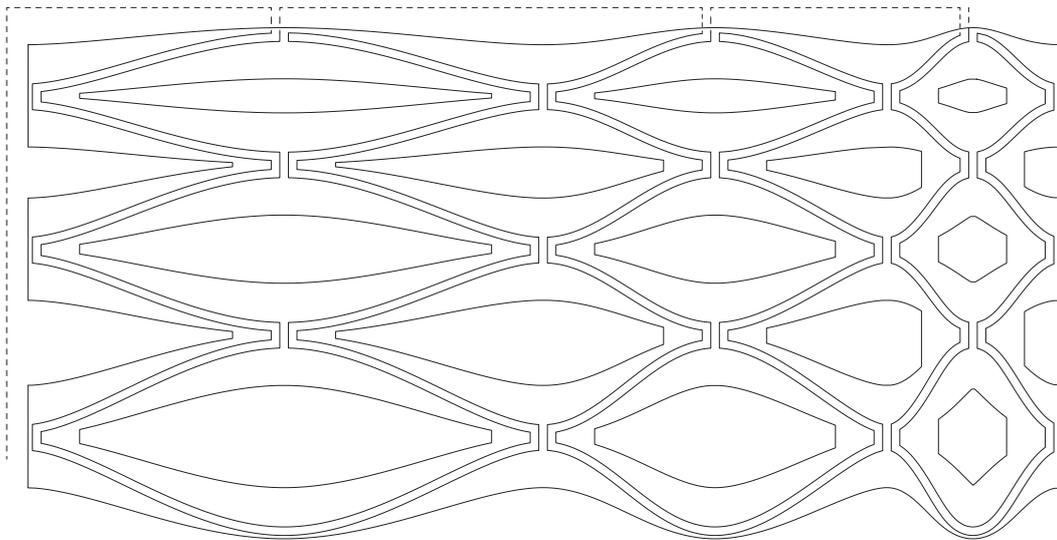
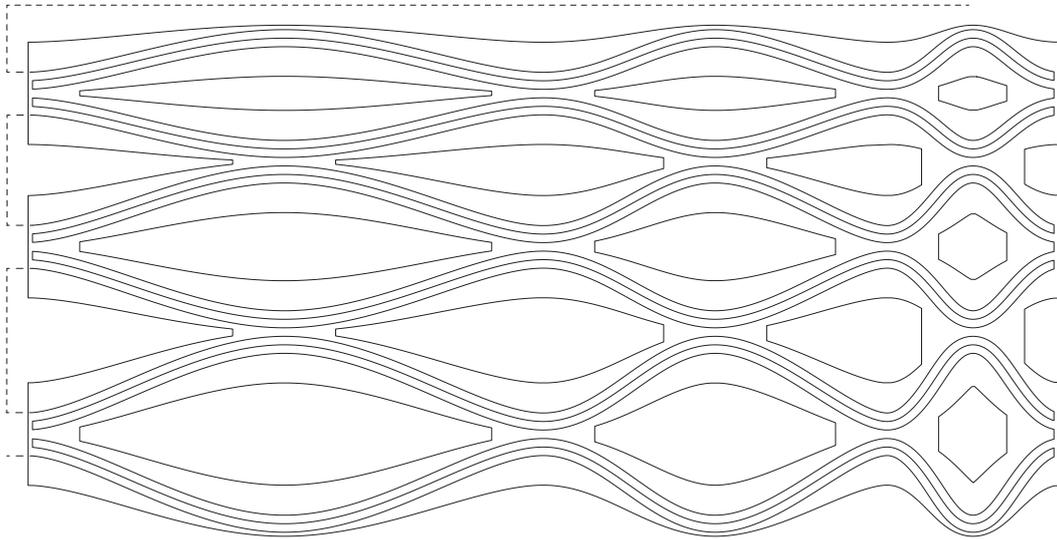


Bild 102. Druckseite des Druckteils Welle

---

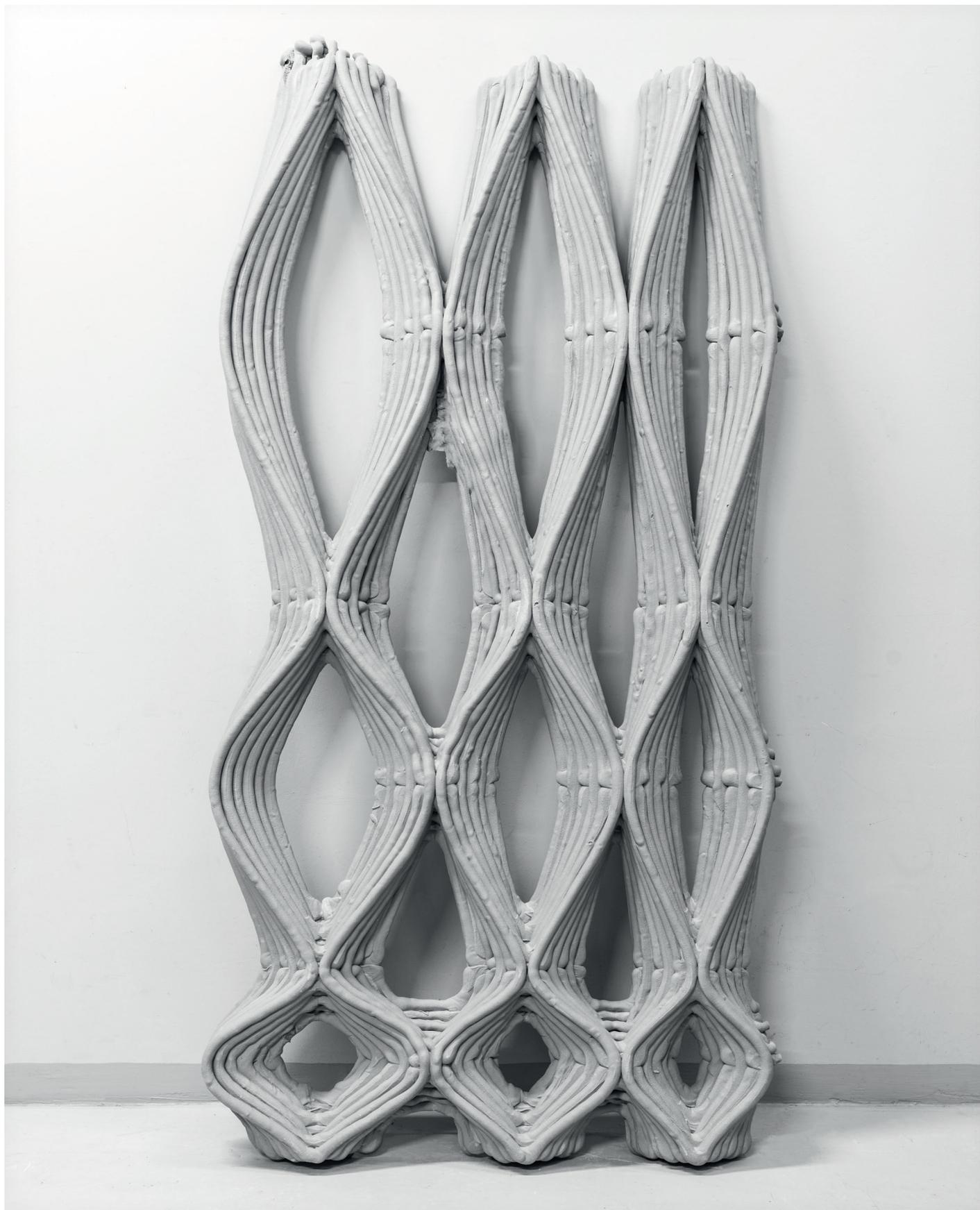


Bild 103. Schalungsseite des Druckteils Welle

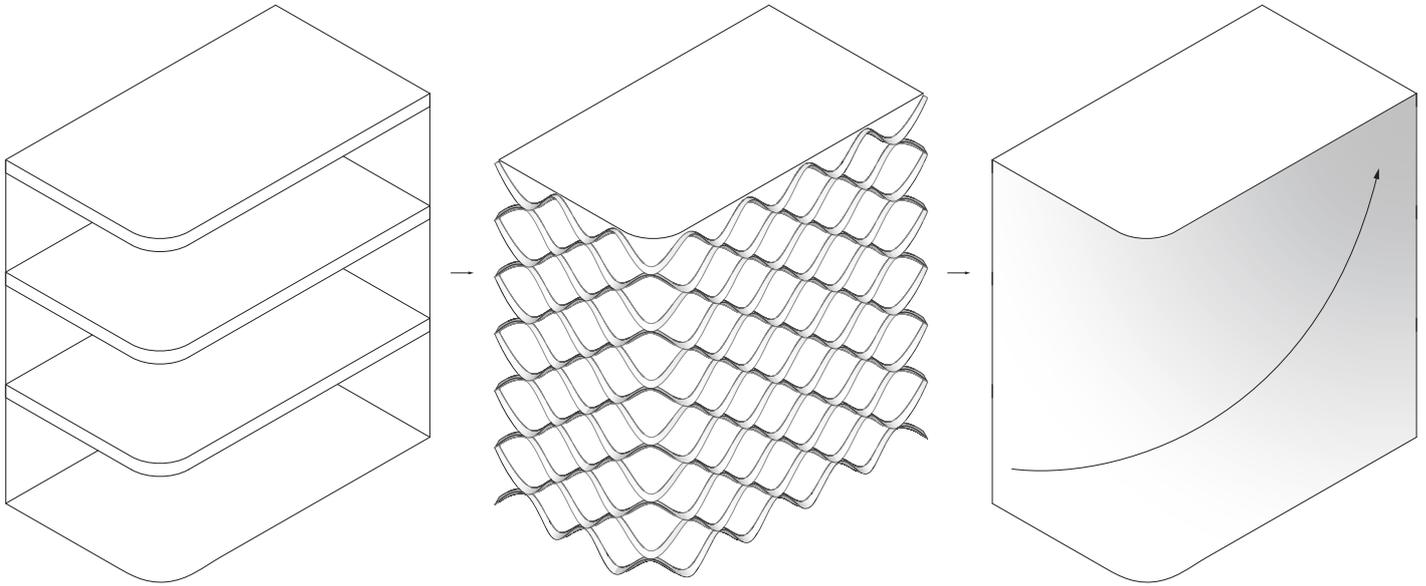


Bild 104. Parametrisierte Anwendung des Druckpatterns Welle auf einen Baukörper

Schematisierter zu bespielender Baukörper

Starre Ausformung der Wellengeometrie

Anpassung des parametrisierten Modells



Zum Verwendungszweck einer Fassade könnte der Druckpattern exemplarisch als Screen angewendet werden. Seine Funktion kann sich dabei von einem rein gestalterischen Element, bis hin zur Verschattung und Lenkung von Ein- und Ausblicken belaufen.

Dank parametrisierter Modelldaten lässt sich der Screen an seine jeweils gewünschten Eigenschaften anpassen. Dazu werden im ersten Schritt die Abmessungen

der zu erzeugenden Fassade festgelegt. Über diese wird anschließend die Wellengeometrie in regelmäßige Form gespannt.

Diese Geometrie wird im weiteren Schritt durch Regler an die jeweilige Anforderung und Wünsche angepasst. Dabei werden die Querschnitte der Wellen festgelegt, sowie die Dichte des entstehenden Gitters über die gesamte Fassade hin variiert.

Im angeführten Beispiel wurde die Enge

der Maschen zur oberen rechten Ecke hin der Fassade erhöht.

Würde man die entstandene Fassade nun auf transportable und fertigbare Elemente zerteilen, ergeben sich Fassadenelemente, bei welchen keines dem anderen gleicht. Dies wiederum befürwortet eine Fassade solcher Form mittels 3DCP zu fertigen, da der Schalungsaufwand mittels herkömmlicher Fertigungsmethoden enorm ausfallen würde.

Bild 105. Gestaltungsbeispiel Druckpattern Welle auf eine Fassade

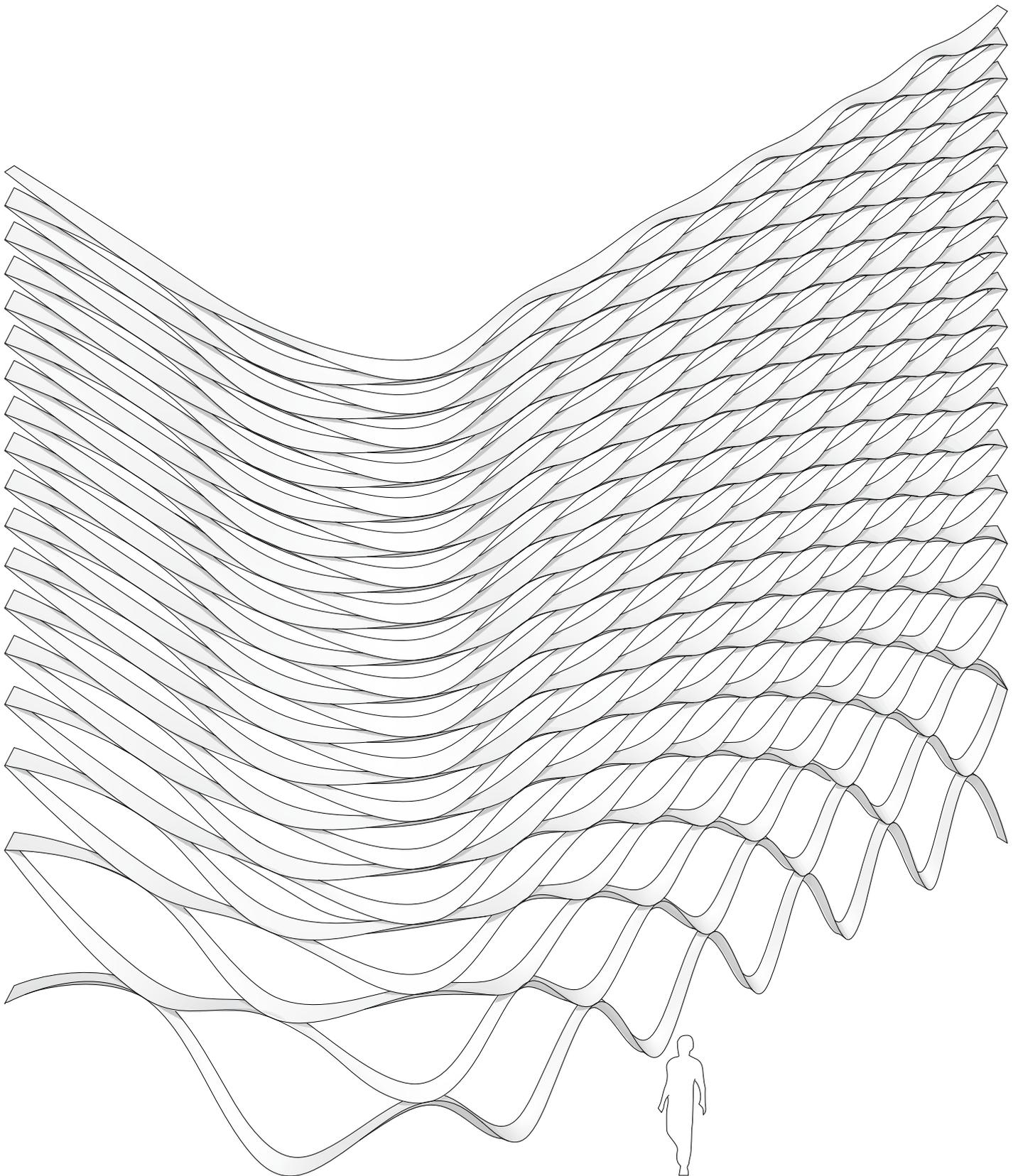
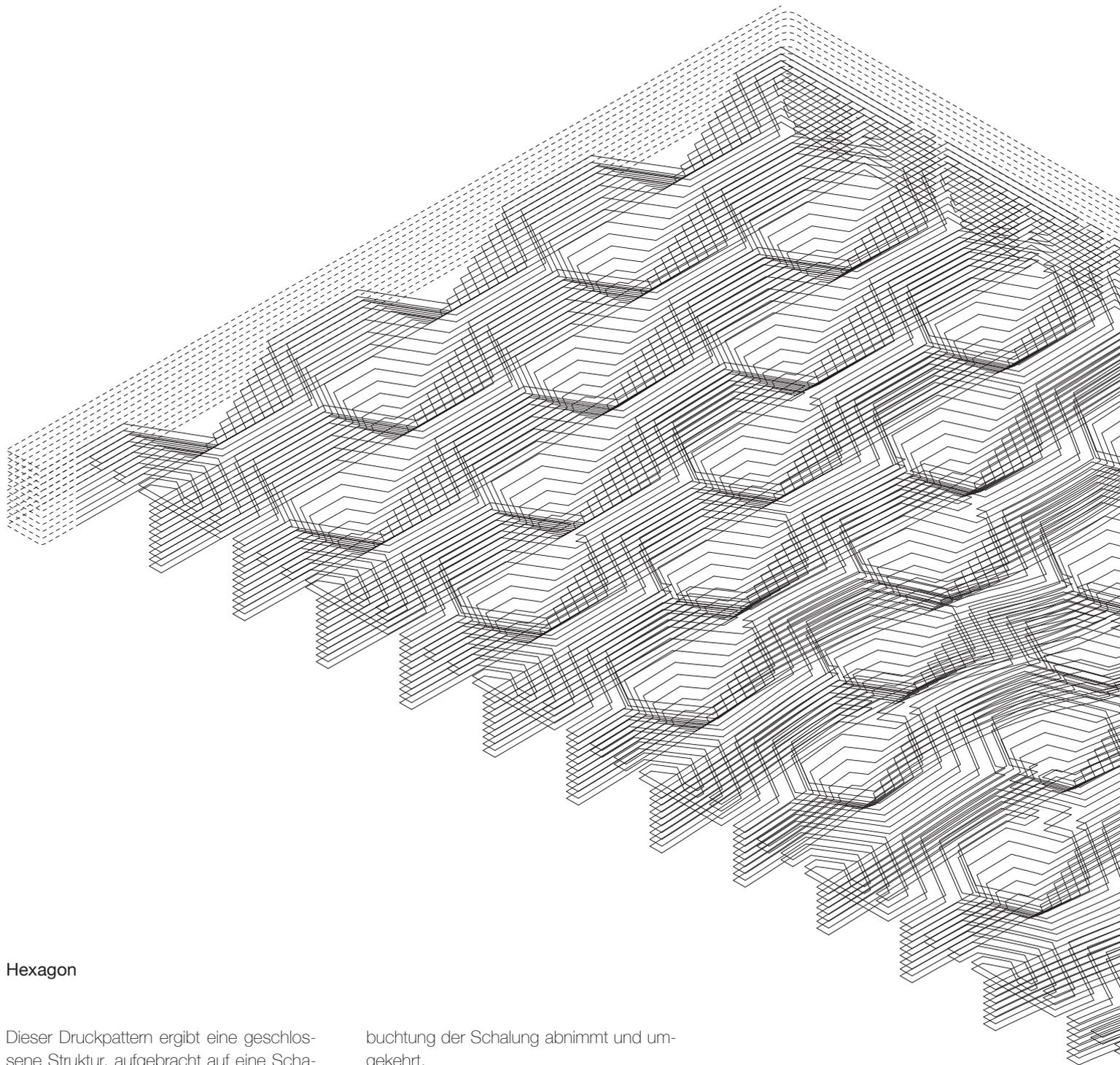


Bild 106. Isometrie Printpfade Prototyp Hexagon



## Hexagon

Dieser Druckpattern ergibt eine geschlossene Struktur, aufgebracht auf eine Schalung mit gewellter Oberfläche. Er basiert auf einem hexagonalen Grid, aus welchem freigedruckte Domes hervorgehen und im Bereich geschlossener Flächen ein Ornament entsteht. Dieser Pattern ist nach belieben erweiterbar.

Die entstehenden Domes stehen in Wechselwirkung mit den Bubbles der Schalung, wobei ihre Größe mit der Höhe der Aus-

buchtung der Schalung abnimmt und umgekehrt.

Die Sichtseite des entstehenden Bauteils liegt im Fertigungsprozess unten. Sie besitzt dadurch in nicht freigedruckten Bereichen eine glatte Oberfläche, welche die Struktur der aus XPS gefrästen Schalung wiedergibt.

Die Abmaße des dazu gefertigten Prototyps lauten 1900x950cm.

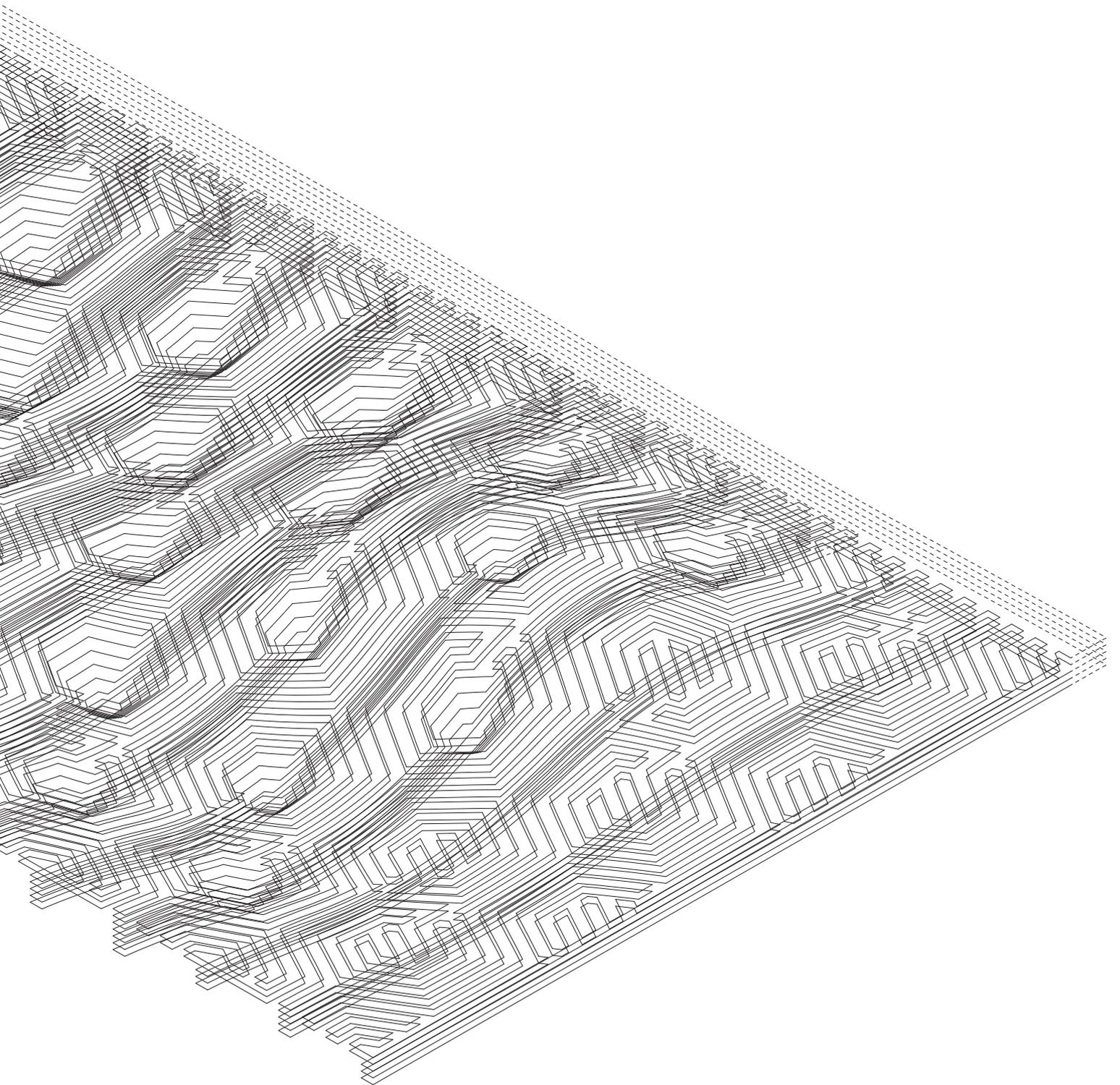
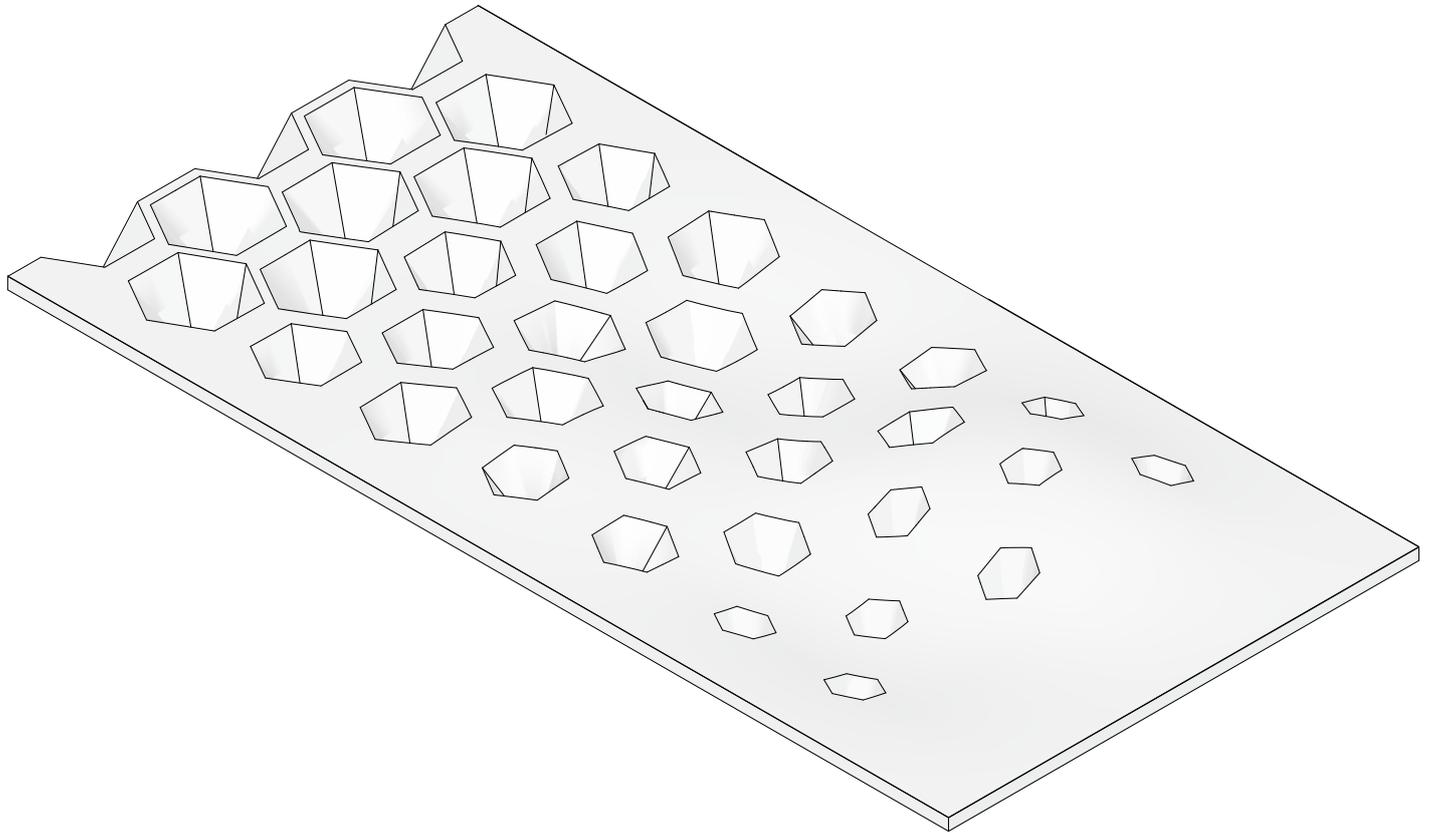


Bild 107. Idealisierte Darstellung Prototyp Hexagon



Druckdaten	/Teil	/m <sup>2</sup>	[ ]
Zeit:	31:06	17:14	min
Pfadlänge:	466,7	258,5	m
Volumen:	59,7	33,1	l
Gewicht:	137,4	76,1	kg

Die vor- und rückspringende Schalung basiert auf einer Fläche, welche durch einen in X und Y Richtung regelmäßigen Punktraster gespannt wird. Die Punkte alternieren dabei in ihrer Lage in Z Richtung und lassen die Bubbles in der Oberfläche entstehen. Deren Höhe ist willkürlich und über die Längsseite des Bauteils sortiert.

Als ausgehendes Element der Druckpfade dient ein zweigeteiltes Hexagon, dessen Seiten in entgegengesetzte Richtung ab-

gefahren werden. In Z Richtung wird der Radius jedes Hexagons pro Layer um eine halbe Strangbreite vermindert. Dadurch entstehen geschlossene Domes. Die Größe der Hexagons und in weiterer Folge die Höhe des Domes, kann durch konzentrische Bahnen im ersten Layer reduziert werden. Mit weiterer Reduktion der Basis wird ab einem gewissen Punkt erreicht, dass die Fläche völlig verfüllt wird und ein geschlossenes Ornament entsteht.

Die hexagonalen Domes werden in Reihe und versetzt zueinander addiert, sodass sie ineinander greifen. Zwischen den sich nach oben hin verjüngenden Hexagons entstehen parallele Rippen.

Die Domes sind der Höhe nach entgegen der Höhenentwicklung der Bubbles sortiert, sodass in gekrümmten Bereichen eine geschlossene Fläche und in ebenen Bereichen eine offenere Fläche entsteht.

Bild 108. Entstehung der Geometrie Hexagon

Ausgehender hexagonaler Druckpfad

Freigedruckter Grundkörper

Grundform auf welche die Druckpfade projiziert werden

Konzentrisch verkleinertes Hexagon

Entsprechend verkleinerter Freidruckkörper

Geschlossenes Hexagon

Geschlossener Druckkörper mit aufgesetzter Rippe

Kombination der Varianten mit fließendem Übergang

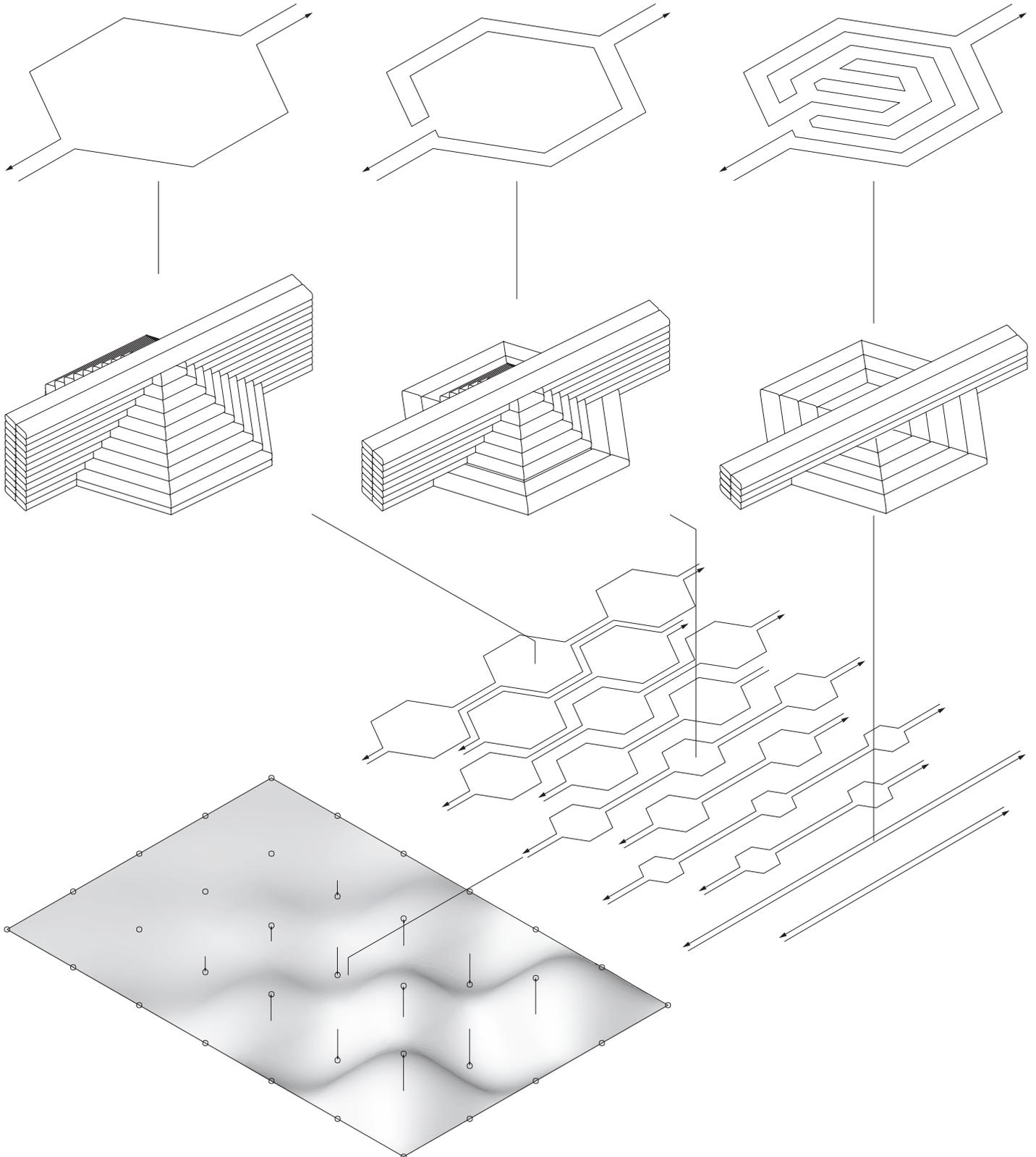


Bild 109. Auszug der Printpfade des gefertigten Prototypen  
Hexagon - Layer 1, 3, 4

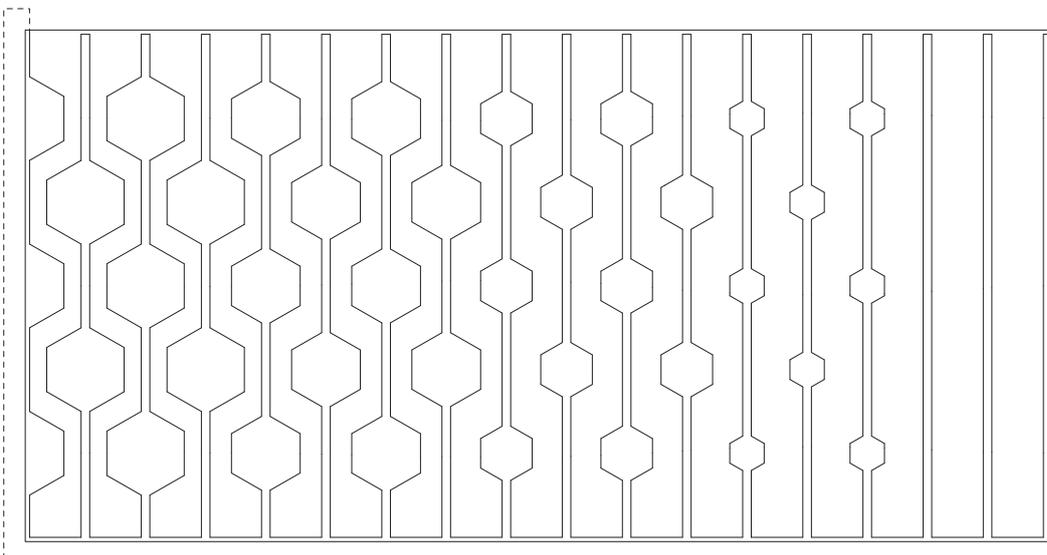
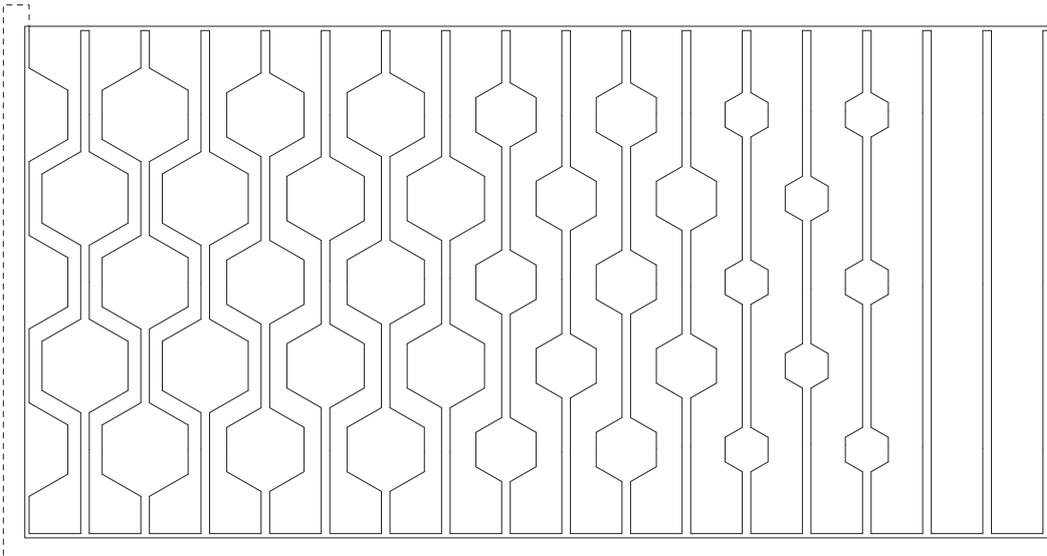
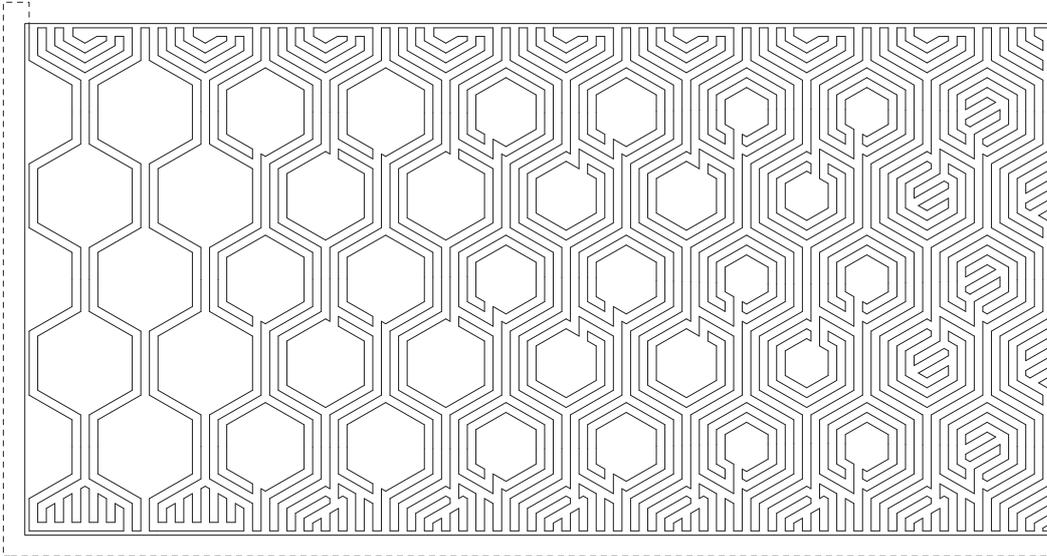


Bild 110. Auszug der Printfade des gefertigten Prototypen  
Hexagon - Layer 5, 6, 7

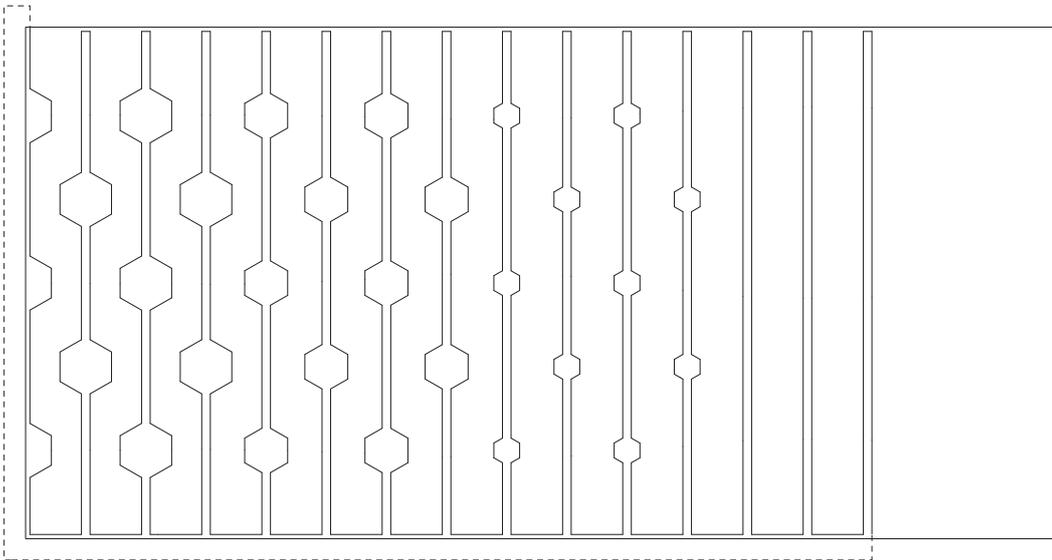
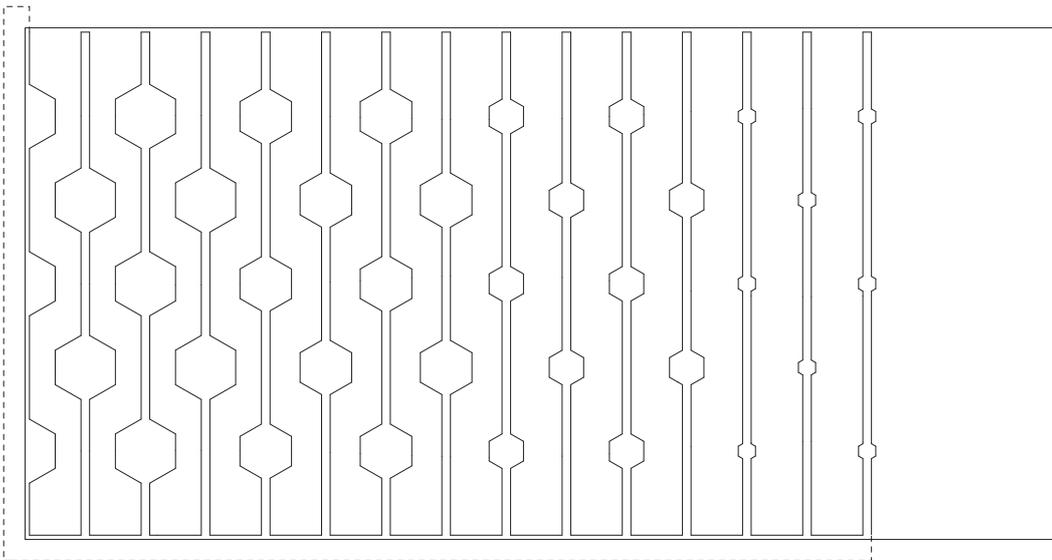
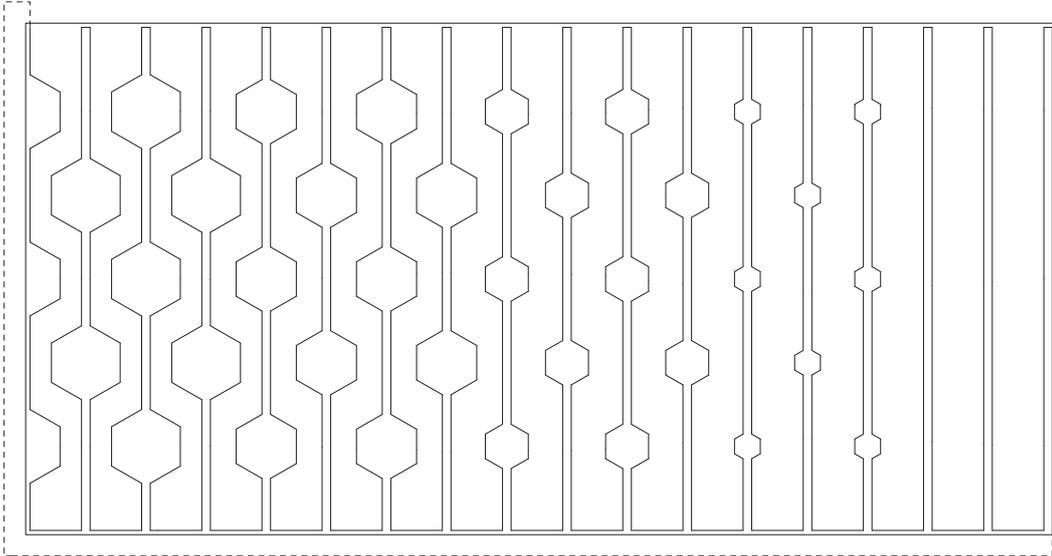


Bild 111. Schalungsseite des Druckteils Hexagon

---



Bild 112. Druckseite des Druckteils Hexagon



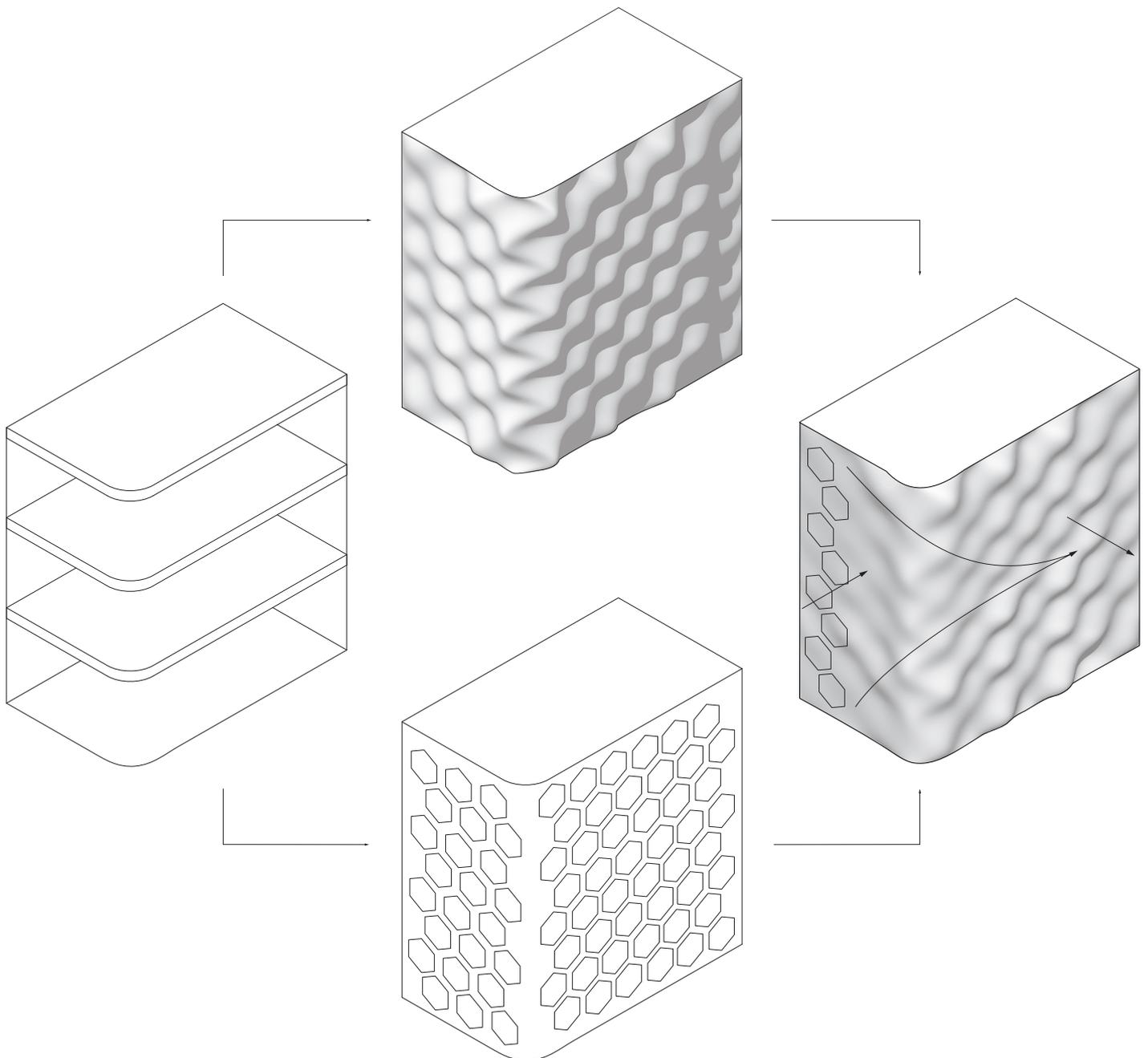
Bild 113. Parametrisierte Anwendung Druckpattern Hexagon auf einen Baukörper

Schematisierter zu bespielender Baukörper

Starre Ausformung der Fassadenoberfläche

Starre Ausformung der freigedruckten Hexagons

Zusammenführung und parametrisierte Anpassung der Oberfläche und Hexagons



Seine Anwendung kann der erstellte Druckpattern z.B. als vorgehängte Fassade finden. Er kann mit der richtigen Ausformung als Akustikfassade dienen, welche den Schall durch ihre Form und Struktur diffus reflektiert.

Die Geometrie wird dabei über den Baukörper gespannt und die Ausformung der Bubbles nach belieben festgelegt. Anhand eines parametrischen Reglers kann die Dichte der Struktur gewählt werden. Wei-

tere Regler definieren das Höhenspektrum in dem sich die Bubbles bewegen. Per Zufall werden dann deren Höhen in diesem Bereich festgelegt und über die Längsseite der Fassade sortiert.

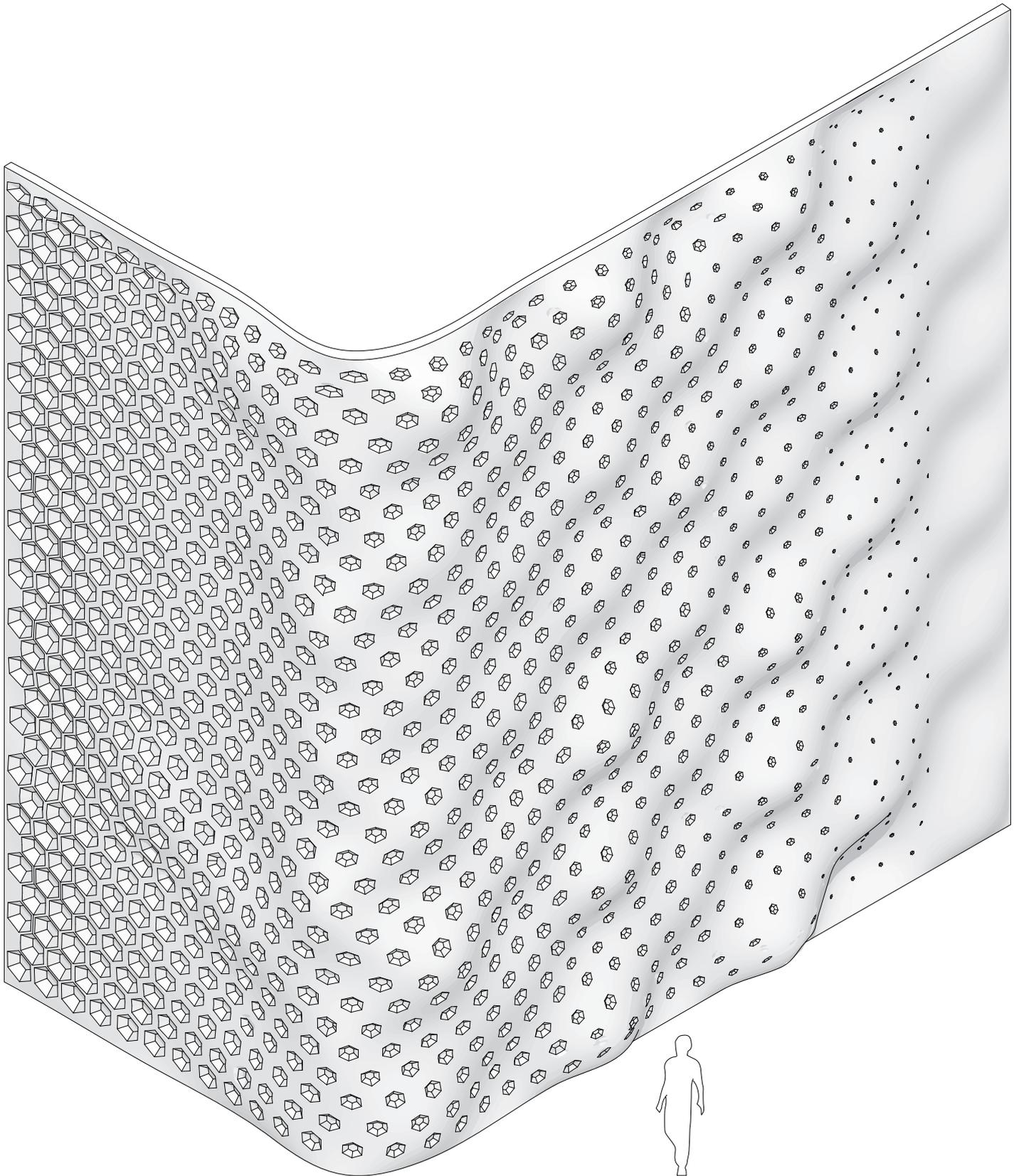
Die Größe der Basis der freigedruckten Domes ist ebenfalls wählbar, wobei diese in Abhängigkeit der beim Druck verwendeten Strangdicke steht. Abhängig von dieser Größe können dann die Domes in Abstufung der Strangdicke verkleinert werden.

Ein weiterer alternierbarer Faktor ist deren Steigung und somit deren Höhe.

Die Domes werden in entgegengesetzte Richtung zur Höhe der Bubbles verteilt und kombiniert, damit die größten Bubbles in ebenen Bereichen liegen und die Fassade in Bereichen mit der höchsten Wölbung keine Domes besitzt.

Möglich ist, dass in weiteren Schritten Öffnungen in der Fassade integriert werden.

Bild 114. Gestaltungsbeispiel Druckpattern Hexagon auf eine Fassade



Aussicht

Aus entwerferischer Sichtweise ist für eine Zukunft des 3DCP wichtig, erst eine ihm entsprechende Form des Entwerfens zu finden, welche das Potential des Verfahrens nutzt. Ein „Denken in Strängen“ müsste Voraussetzung sein, bei welchem nicht die erdachte Geometrie in Druckpfade umgewandelt wird, sondern viel eher die Idee von Druckpfaden die Geometrie entstehen lässt (siehe S93 - Anwendung in der Fassade).

Hierbei bestünde das Potential, eine neue Formensprache zu entwickeln, welche sich von bisherigen Fertigungsverfahren abhebt. Beispielsweise würde für Fassaden kein wie bisweilen meist üblicher orthogonaler Fassadenraster benötigt werden, sondern wäre ein viel größerer Freiraum in der Ausformung einzelner Elemente möglich. Damit könnten bis jetzt noch nicht dagewesene Fugenbilder entstehen.

Die momentan verwendeten Werkzeuge benötigen eine Spezialisierung auf das Verfahren, da diese teilweise noch von anderen Fertigungsverfahren ausgeliehen und improvisiert sind.

Dies betrifft z.B. die verwendete Betonpumpe, deren herkömmlicher Anwendungsbereich die Herstellung von Spritzbeton ist und somit ihre Förderleistung zu hoch für den 3DCP ist. Dies bringt einige Komplikationen mit sich, unter anderem Hitzeentwicklung und damit einhergehende Erwärmung des flüssigen Betons, welche seine Förderbarkeit negativ beeinflusst.

Bereits spezialisierte Elemente der Anlage könnten weiter ausgebaut und optimiert werden, beispielsweise Düsen mit variablen Durchmesser. Auch Anpassungen

in der Maschinensteuerung, welche ein präzises Unterbrechen des Betonstranges ermöglichen wären als nächster Schritt anzudenken. Dabei ist ein zu lösender Faktor das Unterbrechen des Bewehrungsstranges. Dies würde weiters ermöglichen, dass die Bewehrung gezielt in Bereichen eingebracht werden kann, wo diese benötigt wird.

Die Schaffung einer optimalen Arbeitsumgebung ist ein weiterer wichtiger Punkt, sei es nun in industriellem Rahmen, oder womöglich sogar für eine Fertigung der Bauteile direkt vor Ort mittels einer transportablen Druckanlage.

Im Bereich der Software und Erstellung der Druckdaten wäre es wichtig, dass Werkzeuge entwickelt werden, welche eine geeignete Schnittstelle zwischen den Entwurfswerkzeugen und Fertigung gewährleisten. Dies betrifft vor allem die Umwandlung von erstellten Geometrien zu Druckpfaden. Beim 3D-Druck mit Kunststoffen ist diese bereits weit hin ausgereift, doch sind sie durch den Maßstabsprung auf 3DCP, nicht direkt auf das Verfahren anwendbar und müssten stark angepasst werden.

Für Bauteile, welche exakte Randabmaße benötigen, wäre eine geeignete Methode zu finden, die diese gewährleistet. Sei es nun vor dem Prozess, in Form von auf die Schalung aufgebraachte Randabschalungen, Abschneiden des noch nicht ausgehärteten Materials mit geeigneten Abstreifen oder im Nachhinein mit zerspanenden Bearbeitungsmethoden.

Bei den letzten zwei Methoden entstehen Abfälle, daher wären diese auf ihren ökologischen Nutzen zu prüfen. Dieser ist auch

bei der Herstellung der Schalung für gekrümmte Flächen von Relevanz, falls diese gefräst oder vom Drucker selbst hergestellt wird.

Des Weiteren könnten Methoden entwickelt werden, welche es ermöglichen, direkt im Druckprozess Bauteile in den Druckkörper einzubringen und diese so zu „umdrucken“, dass sie fest in den Druckteil integriert werden. Dadurch könnten zum Beispiel Halteelemente für Fassadenplatten werkzeugfrei montiert werden. Bei einzelnen Fassadenelementen wäre auch die Herstellung von Abstandhaltern von Interesse, da diese direkt aufgedruckt werden können.

Ein großer Punkt um 3DCP als industrielle Fertigungsmethode zu etablieren ist die Gewährleistung der Prozesssicherheit, um Werkstücke mit konstanter Qualität zu fertigen und reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen.

Um entsprechende Anwendungsgebiete für das Fertigungsverfahren zu erschließen ist es von Nöten, Standards und Normen dafür zu entwickeln, welche die Qualität der hergestellten Produkte bewerten und gewährleisten. Existieren diese, so bestünde die Möglichkeit 3DCP über sein experimentelles Stadium hinaus auf industriell relevante Produkte anzuwenden und nicht wie bisher, nur für rein dekorative Objekte und Casestudies zu verwenden.

Als Anwendung könnte ein Fassadensystem entwickelt werden, welches sich vom Kunden nach seinen Wünschen individualisieren lässt und trotz seiner komplexen Form kostengünstig herstellen lässt.





## Literaturverzeichnis

3D PRINTED BRIDGE, World's first 3D-printed pedestrian bridge in Spain <<https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/3d-printed-bridge/>>, in <<https://iaac.net/research-projects/>>, 14.9.2018

Asprone, Domenico u. a.: Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete, Neapel 2018

Buswell, R.A. u.a.: 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, Loughborough 2018

Dini, Enrico: D-Shape, >[http://www.d-shape.com/d\\_shape\\_presentation.pdf](http://www.d-shape.com/d_shape_presentation.pdf)>, in: <<http://www.d-shape.com/>>, 25.9.2014

Fromm, Asko: 3-D-Printing zementgebundener Formteile Grundlagen, Entwicklung und Verwendung, Diss., Kassel 2014

Glynn/Sheil: Making Digital Architecture. FABRICATE: London 2011

Hack, Norman/Lauer, Willi Victor: Mesh Mould. Robotically Fabricated Spatial Meshes As Reinforced Concrete Formwork, <<http://www.gramaziokohler.com/data/publikationen/1069.pdf>>, in: <<http://www.gramaziokohler.com/>>, 13.9.2018

Hack, Norman u. a.: Mesh Mould: An On Site, Robotically Fabricated, Functional Formwork, <<http://www.gramaziokohler.com/data/publikationen/1262.pdf>>, in: <<http://www.gramaziokohler.com/>>, 13.9.2018

Hansemann, Georg: COEBRO. Grundlagen, Graz 2016

Herzog, Thomas/Krippner, Roland/Lang, Werner: Fassaden Atlas. München <sup>2</sup>2004

Holl, Jürgen: Coebro. Additive Fabrication of Concrete Elements by Robots, M.A., Graz 2014

Khoshnevis, Behrokh: Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies, Automation in Construction 13 (2004), 5-19

Khoshnevis, Behrokh/ Hwang, Dooil/ Yao, Ke-Thai/ Yeh, Zhenghao: Int. J. Industrial and Systems Engineering, Vol. 1, No. 3, Mega-scale fabrication by contour crafting, 2006

Le/Austin/Lim u.a.: Hardened properties of high-performance printing concrete, Department of Civil and Building Engineering Loughborough University 2011

Lindström, Petrus Aejmelaeus u. a.: Rock Print: An Architectural Installation of Granular Matter, <<http://www.gramaziokohler.com/data/publikationen/1412.pdf>>, in: <<http://www.gramaziokohler.com/>>, 14.9.2018

Parmann, Gernot: Modular Standard. modulare Fertigteile zur Realisierung von Non-Standard Gebäudehüllen, M.A., Graz 2012

Pauser, Alfred: Beton im Hochbau. Handbuch für den konstruktiven Vorentwurf, Düsseldorf 1998

philipp aduatz + incremental3d showcase experimental objects at milan design week 2018, <<https://www.designboom.com/design/philipp-aduatz-incremental3d-milan-design-week-04-04-2018/>>, in <<https://www.designboom.com/>>, 28.9.2018

Salet, Theo A.M. u. a.: 3D Concrete Printing – A Structural Engineering Perspective, Eindhoven o.J.

SMALL ROBOTS PRINTING LARGE SCALE STRUCTURES, <<https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/minibuilders/>>, in <<https://iaac.net/research-projects/>>, 14.9.2018

Strauß, Holger: AM Envelope. The potential of Additive Manufacturing for façade construction, Delft 2013

T.A.M., Salet u. a.: Design of a 3D printed concrete bridge by testing, Eindhoven 2018

TU Graz, Institut für Tragwerksentwurf: COEBRO Bridge Antrag, Graz o.J.

Wangler, Timothy (u. a.): Digital Concrete: Opportunities and Challenges, Zürich 2016



## Abbildungsverzeichnis

Bild 1. Georg Hansemann, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz

Bild 2. Birgit Baustädter, TU Graz

Bild 3. <http://www.vwork.com/wp-content/uploads/2006/05/pow15a.JPG>

Bild 4. <http://contourcrafting.com/wp-content/uploads/2017/07/Wall-3ft.jpg> Bild 5. [http://www.explorations-architecturales.com/data/new/fiche\\_89.htm](http://www.explorations-architecturales.com/data/new/fiche_89.htm)

Bild 5. [http://4.bp.blogspot.com/-oNpRufNntd8/T71Ve8BcbGI/AAAAAAAAAd4/oLbeguNfjR0/s1600/contour\\_03.jpg](http://4.bp.blogspot.com/-oNpRufNntd8/T71Ve8BcbGI/AAAAAAAAAd4/oLbeguNfjR0/s1600/contour_03.jpg)

Bild 6. <https://inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2014/01/3D-house-printer-Contour-Crafting-3.jpg>

Bild 7. [https://www.newcivilengineer.com/pictures/980x653fitpad\[31\]/7/7/6/1402776\\_Concrete-printed-by-Loughborough-University-optimised.jpg](https://www.newcivilengineer.com/pictures/980x653fitpad[31]/7/7/6/1402776_Concrete-printed-by-Loughborough-University-optimised.jpg)

Bild 8. <http://3.bp.blogspot.com/-qqMQzNJ7Q9s/MIm9JCDSg0I/AAAAAAAAAB9l/mJ8sEny-6Nl/s1600/Loughborough-University-Slates-to-Commercialize-3D-Concrete-Printing5-798x350.jpg>

Bild 9. <https://3druck.com/wp-content/uploads/2011/08/beton.jpg>

Bild 10. <https://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2016/12/d-shape.png>

Bild 11. [https://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2016/12/c37d1ea2-b529-11e6-a8ef-4657c68d1ed0\\_486x.jpg](https://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2016/12/c37d1ea2-b529-11e6-a8ef-4657c68d1ed0_486x.jpg)

Bild 12. <http://imprimalia3d.com/sites/default/files/news/mini-2%20imprimalia3D.jpg>

Bild 13. <http://robots.iaac.net/images/7.jpg>

Bild 14. <http://robots.iaac.net/images/p1.png>

Bild 15. Birgit Baustädter, TU Graz

Bild 16. Junghans, Kurt: Das Haus für alle. Zur Geschichte der Vorfertigung in Deutschland, Berlin 1994, 127

Bild 16. [http://gramazio-kohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=221&Copyright=18&lang=e&BilderGezuegelt=1&image\\_count=4&closeText=click%20to%20close](http://gramazio-kohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=221&Copyright=18&lang=e&BilderGezuegelt=1&image_count=4&closeText=click%20to%20close)

Bild 17. [http://gramazio-kohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=221&Copyright=18&lang=e&BilderGezuegelt=1&image\\_count=2&closeText=click%20to%20close](http://gramazio-kohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=221&Copyright=18&lang=e&BilderGezuegelt=1&image_count=2&closeText=click%20to%20close)

Bild 18. [http://gramazio-kohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=221&Copyright=18&lang=e&BilderGezuegelt=1&image\\_count=0&closeText=click%20to%20close](http://gramazio-kohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=221&Copyright=18&lang=e&BilderGezuegelt=1&image_count=0&closeText=click%20to%20close)

Bild 19. <http://constructionclimatechallenge.com/2017/07/25/robots-and-3d-printers-to-design-and-build-a-pioneering-house/>

Bild 20. <http://www.scienceandtechnologyresearchnews.com/building-robots-3d-printers/>

Bild 21. [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=316&Copyright=18&lang=e&BilderGezuegelt=1&image\\_count=4&closeText=click%20to%20close](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=316&Copyright=18&lang=e&BilderGezuegelt=1&image_count=4&closeText=click%20to%20close)

Bild 22. <https://archinect.imgix.net/uploads/30/30z4ilm3awjsauq0.jpg?auto=compress%2Cformat>

Bild 23. <http://www.gramaziokohler.com/data/publikationen/1412.pdf>, 4

Bild 24. <https://archinect.imgix.net/images/650x/wk/wkoc3o4st7c75f74.jpg?w=514&auto=compress%2Cformat&dpr=2>

Bild 25. <https://iaac.net/wp-content/uploads/2016/12/1-Puente-impreso-3D-1024x681.jpg>

Bild 26. <https://iaac.net/wp-content/uploads/2016/12/DESIGN-DEVELOPMENT-PROCESS-DIAGRAM-1024x837.jpg>

Bild 27. <https://www.tue.nl/en/university/departments/built-environment/news/17-10-2017-worlds-first-3d-printed-reinforced-concrete-bridge-opened/>

Bild 28. <http://www.3ders.org/articles/20170907-massive-3d-printed-bicycle-bridge-is-delivered-to-gemert-netherlands-by-truck.html>

Bild 29. <https://www.constructionjunkie.com/blog/2017/11/5/worlds-first-3d-printed-concrete-bicycle-bridge-installed-in-netherlands>

Bild 30. <https://pure.tue.nl/ws/files/98470739/17452759.2018.pdf>, 8

Bild 31-33. Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz

Bild 34. Robert Schmid, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz

Bild 35. Georg Hansemann, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz

Bild 44. Georg Hansemann, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz

Bild 45-46. Dominik Schraml

Bild 47. Georg Hansemann, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz: Geprinteter Tisch im Rahmen von Workshop II SS2018 - Beton 3D Print - Gruppe: Anagnostopoulos, Fattinger, Klammer, Kummer, Mayr

Bild 48-54. Dominik Schraml

Bild 55-57. Georg Hansemann, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz

Bild 58-61. Dominik Schraml

Bild 62. Georg Hansemann, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz

Bild 63. Birgit Baustädter, TU Graz

Bild 64.-65. Dominik Schraml

Bild 66.-67. Robert Schmid, Georg Hansemann, Dominik Schraml, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz

Bild 68.-69. Dominik Schraml

Bild 70.-71. Robert Schmid, Georg Hansemann, Dominik Schraml, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz

Bild 72.-73. Dominik Schraml

Bild 74.-75. Robert Schmid, Georg Hansemann, Dominik Schraml, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz

Bild 76.-77. Dominik Schraml

Bild 78.-79. Robert Schmid, Georg Hansemann, Dominik Schraml, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz

Bild 80.-81. Dominik Schraml

Bild 82.-83. Robert Schmid, Georg Hansemann, Dominik Schraml, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz

Bild 84.-89. Dominik Schraml

Bild 90.-91. Robert Schmid, Georg Hansemann, Dominik Schraml, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz

Bild 92.-93. Dominik Schraml

Bild 94.-95. Robert Schmid, Georg Hansemann, Dominik Schraml, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz

Bild 93. [https://www.ductal.com/sites/ductal/files/thumbnails/image/mucem-r\\_lisa\\_ricciotti\\_8368\\_2.jpg](https://www.ductal.com/sites/ductal/files/thumbnails/image/mucem-r_lisa_ricciotti_8368_2.jpg)

Bild 94. Bild 63. Birgit Baustädter, TU Graz

Bild 95.-96. Georg Hansemann, TU Graz

Bild 97-101. Dominik Schraml

Bild 102.-103. Bild 90.-91. Robert Schmid, Georg Hansemann, Dominik Schraml, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz

Bild 104.-110. Dominik Schraml

Bild 111.-112. Robert Schmid, Georg Hansemann, Dominik Schraml, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz

Bild 113.-114. Dominik Schraml



Neue Technologie schafft neue Herausforderung. Es ist nicht sicher, ob sie immer einen bleibenden Platz in unserer Gesellschaft findet. Doch um dies herauszufinden, muss sie erst den Weg von der Skizze zur Anwendung finden. Selbst wenn sie den Prüfungen der Zeit nicht standhält, so wird sie doch ihre Auswirkung auf die Zukunft haben und die gesammelten Erfahrungen Nährboden für andere Ideen liefern. Es gibt keinen Fehler, nur den, die gewonnen Erfahrungen nicht zu nutzen.