

COEBRO

Additive Fabrication of Concrete Elements by Robots
Additive Beton-Bauteil-Herstellung mittels Robotik

MASTERARBEIT

zu Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

Studienrichtung: Architektur

Jürgen Holl

Technische Universität Graz
Erzherzog-Johann-Universität
Fakultät für Architektur

Betreuer: Peters, Stefan, Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Trummer, Andreas, Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn

Institut: Tragwerksentwurf

10/2014

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

date

„Man revolutioniert nicht indem man Revolution macht.
Man revolutioniert indem man die Lösung bringt.“¹

Le Corbusier

¹ Corbusier, Le: Städtebau
1979 (Wiedergabe der
1. Auflage 1929), Stuttgart,
S. 253

Bild 0. *Gehasst-Gebaut-Geliebt, von der Utopie zur Realität. Hundertwasser Architektur*



VORWORT

Durch das aktive Teilnehmen, wie auch Mitwirken an Workshops der RobArch2012 in Wien, wurde mein Interesse an der digitalen Planung und Fertigung mittels Robotik geweckt. Bei diesem Symposium handelte es sich um die erste internationale Konferenz für digitale Roboterfabrikation in Architektur, Kunst und Design.² Die abgehaltenen Workshops und Vorträge waren keine Zusammenfassung von bereits existierenden Projekten, sondern neue Ideen, die für diese Konferenz entwickelt wurden.³ Faszinierend waren die Vorstellungen zu den ausgestellten Projekten, die den Fokus auf Design legten.

Für mich stand jedoch die reale Anwendung in der Architektur und im Bauwesen im Vordergrund. So entwickelte sich die Idee, den Roboter mittels 3D Druck in das komplexe Gebiet des Bauwesens einzubeziehen. Die Flexibilität der digitalen Fertigung ließ sich gut auf die variable Formgebung und die Eigenschaften des Betons übertragen. Die Technik des 3D Drucks ermöglichte ein schalungsfreies Aufbauen dieses Baustoffes in Schichten und gewährleistete eine große Bandbreite an Freiformen. Das 3D Drucken im herkömmlichen Sinn basierte auf einer computergesteuerten Maschine, die eine dreidimensionale Herstellung eines Prototyps mittels eines flüssigen Werkstoffes erlaubte.⁴

Die Maßstäblichkeit dieses Verfahrens spielte eine große Rolle. Aufgrund der Dimension der verschiedenen 3D Drucker waren die Objekte an eine gewisse Größe, Festigkeit und Materialität in der Herstellung gebunden. Dadurch verfestigte sich meine Idee, den Bereich des Modellbaus hinter mir zu lassen und in den Maßstab 1:1 überzugehen.

Dieser Sprung gelang mir durch das 3D Drucken mit dem vorher erwähnten Baustoff *Beton*.

² vgl. Bell-Cokcan, Sigrid/
Braumann, Johannes:
*Robotic Fabrication in
Architecture, Art and Design.*
ROB|ARCH, Wien 2012

³ vgl. Bell-Cokcan, Sigrid/
Braumann, Johannes:
*Robotic Fabrication in
Architecture, Art and Design.*
ROB|ARCH, Wien 2012, S.9

⁴ vgl. Fastermann,
Petra: *Eine Zukunftstechnologie-Kompakt erklärt.*
3D-Druck/Rapid Prototyping,
Berlin-Heidelberg
2012, S. 7

DANKSAGUNG

Im Laufe meiner Beschäftigung am Institut für Tragwerksentwurf konnte ich einige Eindrücke sammeln, die mich bei der Ausarbeitung dieses Themas, motivierten.

Im Speziellen möchte ich Stefan Peters und Andreas Trummer danken, die sich mit der Betreuung meiner Masterarbeit auseinandersetzten.

Durch gezieltes Fragen und leitende Unterstützung, lenkten sie die Thematik und den Ablauf in die richtige Richtung.

Besonderer Dank gilt auch Parmann Gernot für die aufklärenden Diskussionen, wie auch Ratschläge während des gesamten Prozesses.

Herzlichen Dank möchte ich auch gegenüber meinen Kollegen Christian Pichlkastner, Felix Amtsberg und Robert Schrempf aussprechen, die mich im Bereich der Robotersteuerung, der praktischen Versuche und der Dokumentation der Arbeitsschritte tatkräftig unterstützten.

Ein großes Dankeschön geht an die Sekretärinnen des Instituts für Tragwerksentwurf Sonja Senekowitsch und Sandra Lüking, ohne die ein reibungsloser Ablauf nicht funktioniert hätte.

Der Firma Sika AG Schweiz, möchte ich meinen besonderen Dank ausdrücken, im Speziellen Markus Jahn, Christian Stenger, Benedikt Lindlar und Friedrich Egger, die als Projektpartner an der Planung der Druckeinheit und Fertigung des Prototypen maßgeblich beteiligt waren.

Bei meinen Eltern, Johanna und Karl und meiner Freundin Michaela bedanke ich mich für die ständige Unterstützung und Ermutigung während des gesamten Studiums.

ABSTRACT

This thesis analyses the use of production automatization in 3D concrete printing with the aim to create a concrete prototype which can be applied in the construction industry. Research in the early phases of the project into digital planning, production, robotics and 3D printing resulted in collaboration with an external company, Sika AG, which specialises in both concrete technology and machine technology. An efficient cement printing system was developed, consisting of a printing unit which pumps the concrete to a nozzle mounted on a robot arm. This system uses layers to create a multitude of free forms, thereby making redundant the use of formwork systems. The process used in the original trials was optimised in relation to the concrete mixture, speed and calibration between the printing unit and the robot. The results of this process included a knot-shaped building form, the Sika logo and forms printed on uneven surfaces. This prototype shows that digital tools can be used as a basis for efficient mass production which can be individually customised.

KURZFASSUNG

In diesem Buch beschäftigte ich mich mit der Thematik der digitalen Planung und Fertigung von freigeformten Sonderbauteilen aus Beton mit Hilfe des 3D Drucks.

Das Ziel dieser Masterarbeit war die Realisierung eines Betonprototyps, für die direkte Anwendung im Bauwesen. Anhand einer ausführlichen Recherche im Bereich der digitalen Planung, Fertigung, Robotik und 3D Druck stellte sich heraus, dass die Umsetzung nur mit Hilfe einer externen Firma zu bewerkstelligen war, die das nötige Wissen für Beton- und Maschinentechologie zur Verfügung stellte. Eine Kooperation kam mit der Firma Sika AG Schweiz zustande.

Gemeinsam arbeiteten wir an einem effizienten Betondrucksystem, das durch Aufbauen von Schichten jegliche Freiformen ermöglichte und die Anwendung von Schalungssystemen überflüssig machte.

Nachdem diese Druckmaschine (MiniShot) nach Graz geliefert wurde, konnten die Versuche gestartet werden. Eine Düse wurde an dem Roboterarm montiert und durch einen Schlauch mit der Druckeinheit verbunden. Schritt für Schritt wurden die Prozesse durch die gewonnenen Erkenntnisse im Bereich der Betonmischung, der Geschwindigkeiten und der Kalibrierung zwischen Drucksystem und Roboter optimiert.

Zu den Resultaten zählten ein Betonknoten, der Schriftzug der Firma Sika und das Drucken auf gekrümmten Flächen.

Mit der Ausarbeitung dieser Prototypen möchte ich zeigen, dass durch den Einsatz digitaler Werkzeuge eine effiziente Massenproduktion, trotz individueller Maßanfertigung erreicht werden kann.

Durch die digitale Planung und additive Herstellungstechniken konnte das Spektrum des Entwurfs von Betonsonderbauteilen erweitert werden.

| | |
|--|-----------|
| VORWORT | 07 |
| DANKSAGUNG | 09 |
| ABSTRACT KURZFASSUNG | 10 |
| INHALTSVERZEICHNIS | 12 |
| 1. EINLEITUNG | 15 |
| 2. GRUNDLAGEN DER FORSCHUNG UND RECHERCHE | 20 |
| 2.1. DIGITALE PLANUNG, FERTIGUNG UND ROBOTIK | 21 |
| - MATERIAL ABTRAGENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN | 22 |
| - MATERIAL MINIMIERENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN | 25 |
| - MATERIAL ADDIERENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN | 27 |
| - MATERIAL FORMENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN | 32 |
| 2.2. 3D DRUCKEN / RAPID PROTOTYPING | 37 |
| - SINTER- UND PULVERDRUCKVERFAHREN | 39 |
| - DRUCKEN VON EXTRUDIERTEN WERKSTOFFEN | 40 |
| - STEREOLITHOGRAFIE | 41 |
| - LAMINATED OBJECT MODELING | 42 |
| 2.3. BETON 3D DRUCK | 45 |
| - CONCRETE PRINTING | 46 |
| - CONTOUR CRAFTING | 47 |
| - RADIOLARIA PAVILLON | 48 |
| - SHANGHAI WINSUN | 49 |
| - 3D PRINTING ON THE MOON | 50 |
| LUNAR CONTOUR CRAFTING | 50 |
| THE DESIGN OF A LUNAR OUTPOST | 51 |
| 3. PRAKTISCHE UMSETZUNG VON COEBRO BETON 3D DRUCKEN | 56 |
| 3.1. PLANUNG DER DRUCKTECHNOLOGIE | 57 |
| - ZIELESETZUNG UND UMFANG DER TECHNOLOGIE | 58 |
| - 3D DRUCK - MASSSTABS - QUALITÄTS - DIAGRAMM | 59 |
| - AUSEINANDERSETZUNG MIT SPRITZBETON | 60 |
| - BETONCHEMIE | 61 |
| - SPRITZBETONVERSUCHE IM VERSUCHSSTOLLEN HAGERBACH (CH) | 64 |
| - PROJEKTPARTNERSCHAFT MIT DER SIKA AG SCHWEIZ | 69 |
| - ZEITPLAN | 72 |
| - MINISHOT - DRUCKTECHNOLOGIE | 74 |

| | |
|---|------------|
| 3.2. PLANUNG DER AUTOMATISIERUNGSEINHEIT | 81 |
| DEFINITION | 83 |
| - 3.2.1 PLANUNG DER VERSUCHSABLÄUFE UND PROTOTYPEN | 83 |
| ENTWURF UND AUFBEREITUNG DER CAD-DATEN FÜR VERSUCHSBLOCK I IM ROBOTER DESIGN LABOR (ITE) | 83 |
| ENTWURF UND AUFBEREITUNG DER CAD-DATEN FÜR VERSUCHSBLOCK II IM ABB ROBOTER LABOR (ITE) | 87 |
| - 3.2.2. ROBOTERSTEUERUNG | 93 |
| MITTELS FRÄSBAHNEN | 96 |
| MITTELS PROGRAMMIERUNG IN ECHTZEIT | 109 |
| 3.3. VERSUCHSABLAUF_KONSTRUKTION DER PROZESSKETTE | 113 |
| ÜBERBLICK | 114 |
| - DIGITALE PROZESSKETTE GEOMETRIEAUFBEREITUNG | 116 |
| - ROBOTERSTEUERUNG | 117 |
| - BETONAUFBEREITUNG | 118 |
| - MATERIALFÖRDERUNG DÜSENTECHNOLOGIE | 122 |
| - ROBOTER | 130 |
| - DRUCKVERSUCHE | 131 |
| 3.4. BETON 3D DRUCKEN HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN | 133 |
| -3.4.1. VERSUCHSBLOCK I (ROBOTER DESIGN LABOR) | 134 |
| VERSUCHSREIHE I: ABFAHREN VON GERADEN UND RADIIEN | 137 |
| VERSUCHSREIHE II: SCHICHTEN VON BAHNEN | 139 |
| VERSUCHSREIHE III: ABFAHREN VON RADIIEN UND SCHICHTEN | 142 |
| VERSUCHSREIHE IV: DRUCKEN DES SIKA SCHRIFTZUGES | 145 |
| - 3.4.2. MATERIALVERSUCHE | 146 |
| - 3.4.3. VERSUCHSBLOCK II (ABB ROBOTER LABOR) | 148 |
| BETONKNOTEN | 148 |
| DRUCKEN AUF GEKRÜMMTEN FLÄCHEN | 166 |
| SIKA SCHRIFTZUG | 170 |
| 4. RÉSUMÉ UND AUSBLICK: | 175 |
| TECHNISCH | 176 |
| ARCHITEKTONISCH | 178 |
| QUELLENVERZEICHNIS | 180 |
| BILDERVERZEICHNIS | 182 |
| ANHANG | 184 |

1. EINLEITUNG

„Wir leben in einer Zeit der Revolution im Bauwesen, die durch gewaltige technische und volkswirtschaftliche Anstrengungen gekennzeichnet ist. Baustoffe, Konstruktionsprinzipien, Technologien und ihre über Jahrhunderte hinweg zu allgemein gültigen und unangetasteten Gesetzen gewordenen Regeln verlieren an Bedeutung und werden durch neue ersetzt oder erweitert. Es gilt mehr denn je, den Aufwand an Material, Arbeitskraft und Kosten zu senken und gleichzeitig unter allen Umständen die wichtigen und großen Aufgaben zu erfüllen, die an die Architektur gestellt werden.“⁵

⁵ Rühle, Herrmann : Räumliche Tragwerke, Konstruktion und Ausführung. Bd. 1. Berlin 1969, S. 7

Auf diesen Konventionen beruht der Ansatz dieser Arbeit und bekräftigt mich in meinem Vorhaben, ein Verfahren zu entwickeln, welches die Herstellung von Betonsonderbauteilen unterstützt und eventuell zur Senkung von Aufwand, Material und Kosten beitragen kann. Das Ziel ist, eine Methode zu kreieren, welche die mühsame Fertigung und den Einsatz von Schalungen überflüssig macht, um flexible Freiformen herstellen zu können.

Durch die speziellen Materialeigenschaften von Beton war man im Entwurf und in der Herstellung der gewünschten Bauteile oftmals eingeschränkt. Die Abbildungen (vgl. Bild 1 u. 2) spiegeln den hohen körperlichen und technischen Aufwand bei der Herstellung von gekrümmten Formen wider.

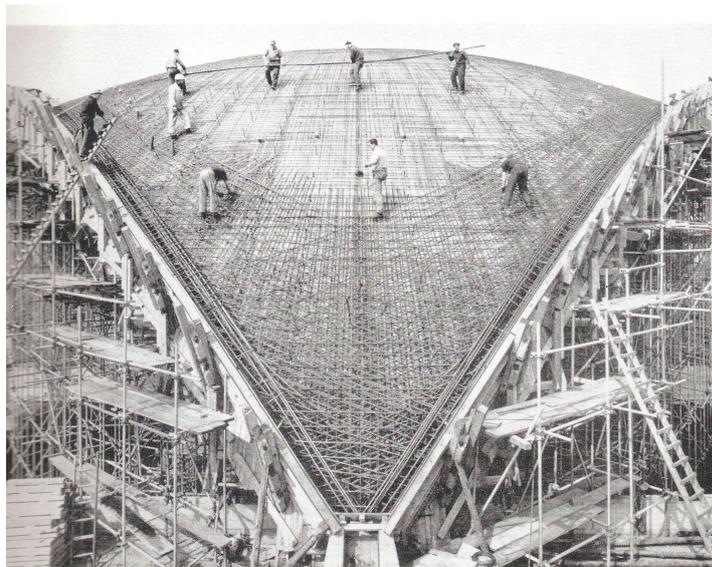


Bild 1. links, Manuelles Beotnieren von Schalen in Mexico City

Bild 2. rechts, Bewehrung eines dreiseitig geöffneten Ellipsoids auf drei Stützen.

Im ursprünglichen Verfahren sind Doppelschalungen erforderlich, um das Abgleiten des frisch gegossenen Betons zu verhindern und die Maßgenauigkeit einzuhalten.⁶

⁶vgl. Rühle, Herrmann: Räumliche Tragwerke, Konstruktion und Ausführung. Bd. 1. Berlin 1969, S. 239

Eine Weiterentwicklung hinsichtlich der Herstellung im Schalenbau bietet das Torkretverfahren, auch Spritzbetonverfahren genannt, welches lediglich eine einseitige Schalung benötigt. Bei dieser Methode wird mittels geschlossenen und überdruckfesten Rohr- oder Schlauchleitungen Spritzbeton oder Spritzbetonmörtel zur Betonierstelle gefördert. Danach kann das Material durch Spritzen in jegliche Richtung aufgetragen und gleichzeitig verdichtet werden.⁷

⁷vgl. *Hofler/Schlumpff/Jahn: Sika Spritzbeton Handbuch. Sika Schweiz AG, Zürich 2012*

Bild 3. links, Spritzapplikation nass



Bild 4. rechts, Spritzbetonversuche im Versuchsstollen Hagerbach (CH)

⁸vgl. *Rühle, Herrmann: Räumliche Tragwerke, Konstruktion und Ausführung. Bd. 1. Berlin 1969, S. 254*

Bild 5. links, Auftragen von Spritzbeton auf Maschengewebe.



Das Spritzbetonverfahren ist komplett ohne Schalung möglich. Das Nassspritzverfahren erlaubt, wie auf der Abbildung 5. und 6. gezeigt, ein mehrlagiges Auftragen auf ein Maschengewebe. Dabei wird von unten nach oben, Schicht um Schicht der Beton aufgespritzt.⁸

Bild 6. rechts

Die Tatsache einer Realisierung von Bauwerken in Schichten entfesselte die Idee der digitalen Planung und Fertigung von Betonteilen mittels Robotik und 3D Druck. Die Technik des herkömmlichen 3D Drucks ermöglichte ein schalungsfreies Aufbauen von Materialien in Schichten. Diese Methode gewährleistete eine Vielfalt von Freiformen und Anwendungsgebieten. Durch den 3D Druck hatte sich die Denkweise in der Herstellung von Prototypen grundlegend geändert.

Noch vor wenigen Jahren war die schnelle und preisgünstige Herstellung von dreidimensionalen Objekten aus Metall, Kunststoff oder Keramik für Privatpersonen noch ein Ding der Unmöglichkeit. Mittlerweile besteht kann man günstige 3D Drucker, mit hoher Qualität und einfacher Bedienung erwerben. Durch die Erstellung eines CAD-Volumenmodells, ist inzwischen jeder in der Lage freigeformte Prototypen, in den verschiedenen Maßstäben zu drucken. 3D Druck ist ein aufstrebendes Herstellungsverfahren, welches bereits in unterschiedlichen Bereichen, wie z.B. Mode, Architektur, Maschinenbau, Medizin und vor allem auch für den privaten Zweck eingesetzt wird.⁹



⁹ vgl. Fastermann, Petra: *Eine Zukunftstechnologie-Kompakt erklärt. 3D-Druck/Rapid Prototyping*, Berlin-Heidelberg 2012, S. 7

Bild 7. links, Anwendung von 3 D Druckern zum privaten Zweck.

Bild 8. mitte, Kollektionen im Modebereich von Iris van Herpen

Bild 9. rechts, 3D Druck für die Umsetzung von Architekturmodellen.

Um die Mannigfaltigkeit des Beton 3D Drucks zu erforschen, war eine praxisnahe Planung einer Druckeinrichtung und eines Prototyps unabdinglich. Eine durchdachte Erarbeitung von Prozessketten in Abhängigkeit von Betonchemie, Materialaufbereitung und -förderung, Drucktechnologie, Robotersteuerung und praktische Druckversuche, war für den Erfolg des Projektes erforderlich. So entwickelte sich eine enge Zusammenarbeit mit der Firma Sika Schweiz AG, die das nötige Know How bereitstellte.

Eine interessante Anekdote für den Vorteil der digitalen Fabrikation erläutert Mario Carpo im Interview mit Matthias Kohler (von Gramazio und Kohler), indem er ein Kleidungsstück als Metapher verwendet. So sagt er, dass man früher zwischen zwei Arten von Anzügen entscheiden musste. Entweder man brachte genug Geld für einen maßgeschneiderten Anzug auf, oder man musste sich einer massentauglichen Größe bedienen, die nicht der eigenen entsprach. Durch den Einsatz digitaler Werkzeuge kann das Beste aus beiden Disziplinen, der billigen Massenproduktion und der individuellen Maßanfertigung, selektiert werden.¹⁰

¹⁰ Interview mit Mario Carpo, geführt von Matthias Kohler, *Making Digital Architecture*. Fabricate, 2011

Somit brachte eine Steigerung der Individualität keinen Anstieg der Kosten mit sich. Diese Erkenntnis belegte ebenfalls das Unternehmen „Gehry Technologies“ 2002. Die Weiterentwicklung der Luft- und Raumfahrtssoftware CATIA (Computer Aided Three Dimensional Interactive Application) ermöglichte eine Anwendung im Bauwesen für spezifische Anforderungen von komplexen, architektonischen Bauvorhaben. Durch die Technologie war der Einfluss von Gehry Technologies im Bereich der Bauaufsicht und der Abwicklung von Prozessen im Baumanagement revolutionär. Auf Basis dieser Erfolge und Erfahrungen entstand die These, dass trotz der Unabhängigkeit von Schalungssystemen, die gleichen Preise wie bei der Massenproduktion erzielt werden können.¹¹

¹¹ vgl. Iwamoto, Lisa: *Architectural and Material Techniques. Digital Fabrications*, New York 2009, S. 6

2. GRUNDLAGEN DER FORSCHUNG UND RECHERCHE

2.1. DIGITALE PLANUNG, FERTIGUNG UND ROBOTIK

- MATERIAL ABTRAGENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN
- MATERIAL MINIMIERENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN
- MATERIAL ADDIERENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN
- MATERIAL FORMENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN

2.2. 3D DRUCKEN / RAPID PROTOTYPING

- SINTER- UND PULVERDRUCKVERFAHREN
- DRUCKEN VON EXTRUDIERTEN WERKSTOFFEN
- STEREO LITHOGRAPHIE
- LAMINATED OBJECT MODELING

2.3. BETON 3D DRUCK

- CONCRETE PRINTING
- CONTOUR CRAFTING
- RADIOLARIA PAVILLON
- SHANGHAI WINSUN
- 3D PRINTING ON THE MOON

LUNAR CONTOUR CRAFTING

THE DESIGN OF A LUNAR OUTPOST

2.1. DIGITALE PLANUNG, FERTIGUNG UND ROBOTIK

- MATERIAL ABTRAGENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN

FRÄSEN

- MATERIAL MINIMIERENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN

DRAHTSCHNEIDEN

- MATERIAL ADDIERENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN

EXTRUDIEREN

PICK AND PLACE

TEXTILE SYSTEME

- MATERIAL FORMENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN

UMFORMEN / ROBO FOLD

Im Laufe des Architektur Studiums wurde ich in sämtlichen Entwürfen auf die Problematik der Herstellung von organischen Bauteilen hingewiesen. Die Komplexität der Schalungssysteme und die dafür benötigten Herstellungsmöglichkeiten waren stets ein aktuelles Thema. Die steigenden Erfahrungen durch Forschungsergebnisse in der digitalen Planung und Fertigung boten ein breites Spektrum an automatisierten Fabrikationsideen

Im Zuge der internationalen Konferenz FABRICATE für digitale Herstellungsverfahren und -prozesse (organisiert von der *Bartlett School of Architecture London*, 2011), wurden die verschiedenen Forschungsergebnisse und Technologien im Bereich der Architektur, Konstruktion, Ingenieurwesen, Design, Fabrikation, Material- und Softwaredesign vorgestellt. Im Fokus der Vorträge stand die Verschmelzung der digitalen Planung mit der analogen Fertigung neuer und kreativer Fabrikationstechniken.¹²

Die Möglichkeiten der Umsetzung dieser neuen Ideen sind breit gefächert und werden in nachfolgenden Beispielen verdeutlicht. Sie lassen sich den Kategorien Material abtragende, Material addierende und Material formende Herstellungsverfahren zuordnen.

MATERIAL ABTRAGENDES HERSTELLUNGSVERFAHREN

Fräsen

Im Bereich des Betonbaus traf man häufig auf Spezialfälle, die anspruchsvolle Geometrien nur mit aufwendigen Schalungssystemen ermöglichen. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, bediente sich die Architektur der Robotik, welche das Know How der CNC-Frästechnik adaptierte.

Eine Spindel wurde für Fräsarbeiten am Roboterarm montiert, mit dessen Hilfe geometrisch aufwendige Formen gefräst wurden. Dieses Verfahren diente der Herstellung von Prototypen, Spezialschalungen und Sonderbauteilen. Bei der Realisierung von Modellen oder Schalungen kamen Werkstoffe wie Wärmedämmungen (XPS, EPS) oder Holz zum Einsatz, da diese geeignete Eigenschaften für den Vorgang aufwiesen. Diese Materialien konnten Druckkräfte aufnehmen und agierten bei der spanabtragenden Herstellung positiv, da sie das Werkzeug nicht beschädigten.¹³

Beispiele für das Herstellungsverfahren boten die Projekte *Unikabeton Prototype* von Asbjorn Sondergaard & Per Dombernowsky¹⁴, *The Bone Wall* von Joe MacDonald/Urban A&O Architecture LLC¹⁵ und *La Voute de Lefebvre* von Brandon Clifford & Wes McGee¹⁶.

¹² vgl. *Conference, April 2011*: <<http://www.fabricate2011.org/about-fabricate/>>, in: <<http://www.fabricate2011.org/>>, 19. September 2014

¹³ vgl. *Glynn/Sheil: Making Digital Architecture. FABRICATE: London 2011*, S. 56ff

¹⁴ *Ebda.*

¹⁵ vgl. *Iwamoto, Lisa: Architectural and Material Techniques. Digital Fabrications, New York 2009*, S. 94

¹⁶ vgl. *Glynn/Sheil: Making Digital Architecture. FABRICATE: London 2011*, S. 146ff

UNIKABETON PROTOTYPE war das Ergebnis einer interdisziplinären Forschungsarbeit, welche das architektonische Potential einer Verbindung zwischen computergesteuerten Optimierung und Roboterfabrikation für Gussformen aus Beton erläuterte. Beteiligt waren acht große Institutionen der dänischen Bauindustrie, darüber hinaus die *AARHUS School of Architecture*, die *University of Southern Denmark* und das *Danisch Institute of Technology*. Der Forschungsprozess war eine ökonomische Kalkulation von Strukturen, errechnet von dem dänischen Mathematiker Martin Bendsoe. Durch diese Berechnung wurde ein Volumen beziehungsweise eine Tragstruktur erarbeitet, die trotz maximaler Minimierung der Masse gleichzeitig die Tragfestigkeit und Steifigkeit nicht schwächen sollte. Die Negativform des Körpers wurde in *Rhino* modelliert und danach im Maßstab 1:1 aus den größtmöglichen Polysterolblöcken gefräst. Nach der Fertigung aller Einzelteile, wurden diese zu einem Objekt zusammengefügt. Dieses fertige Produkt diente als Schalung für den optimierten Prototypen aus Beton.¹⁷

¹⁷ vgl. Glynn/Sheil: *Making Digital Architecture. FABRICATE: London 2011, S. 56ff*

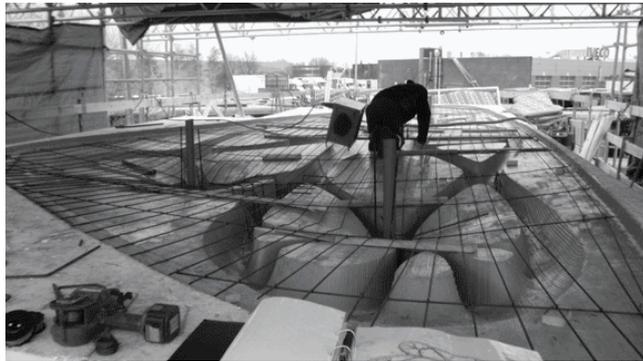


Bild 10. links, Herstellung der Schalungsform mittels Frästechnik

Bild 11. rechts oben, Setzen der Bewehrungsseisen



Bild 12. rechts unten, Ergebnis des UNIKABETON Prototypen.

Das Projekt *THE BONE WALL* von Urban A&O, wurde vom österreichischen Künstler Erwin Hauer stark beeinflusst. Das Experiment untersuchte die Auflösung eines Wandsystems hinsichtlich ihrer Lichtdurchlässigkeit und Modularität. Das Design der *BONE WALL* basiert auf der parametrischen Modellierung einer nicht linearen Basis -oder Halbzelle, welche durch Variation oder Rotation zu einem Ganzen zusammengefügt wurde. Mittels einer fünf-Achs CNC-Fräse wurden die Einzelemente gefertigt, manuell verklebt und daraufhin grau bemalt. Die Rauigkeit der Oberfläche, welche aufgrund des Fräsens unumgänglich war, hinterließ eine durchgehende Struktur.¹⁸

¹⁸vgl. Iwamoto, Lisa: *Architectural and Material Techniques. Digital Fabrications*, New York 2009, S. 94ff

Bild 13. links, Betrachtung des abgeschlossenen Projekts im „Storefront of Art and Architecture“.

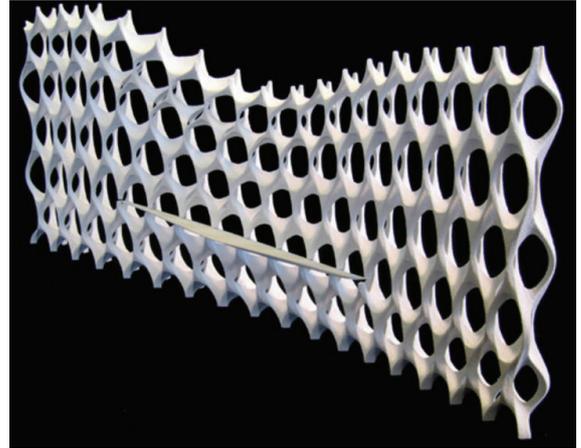
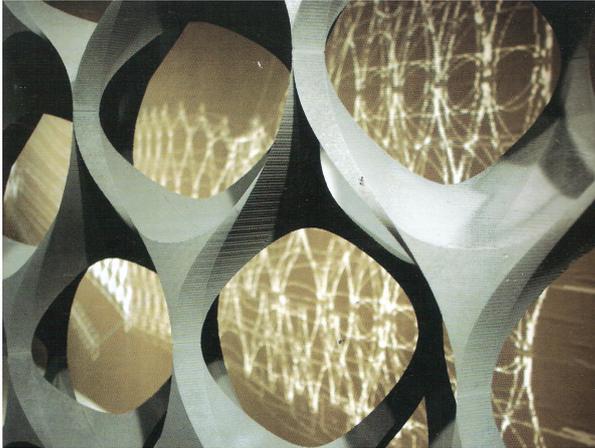


Bild 14. rechts oben, CAD Design von *THE BONE WALL*



Bild 15. rechts unten, Die Herstellung mittels CNC-Frästechnik ist an der Oberfläche ersichtlich.

LA VOTE DE LEFEVRE war ein Versuch, einen ansehnlichen Übergang von Stützen zu einem Gewölbe mittels Hängemodellen zu generieren. Das Endprodukt wurde in der *Banvard Gallery* in Columbus, Ohio 2012 ausgestellt. Bei dem ausgewählten Material handelte es sich um Sperrholz von der Birke. Jeder Bauteil wurde digital zerlegt, hinsichtlich der Tragstruktur optimiert und anschließend mittels einer fünf-Achs CNC-Fräse in bestimmte Stärken zerschnitten. Die Elemente wurden aus Platten gefertigt und daraufhin durch eine Vakuumpresse manuell zur finalen Geometrie verklebt. Durch den Vorgang, die einzelnen Fragmente aus Schichten zu modellieren, konnte der Materialaufwand minimiert und somit Gewicht eingespart werden.¹⁹

¹⁹ vgl. Glynn/Sheil: *Making Digital Architecture. FABRICATE: London 2011, S. 146ff*

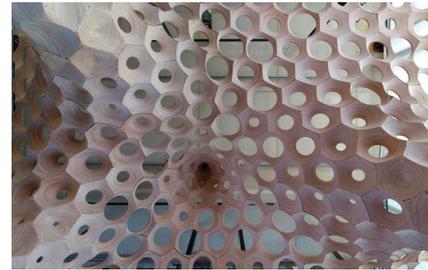


Bild 16. links, Ansicht des finalen Prototypen



Bild 17. rechts oben, Übergang von Stützen zu einem Gewölbe

Bild 18. rechts unten, Herstellung der Einzelteile

MATERIAL MINIMIERENDES HERSTELLUNGSVERFAHREN

DRAHTSCHNEIDEN

Beim Drahtschneiden unterscheidet man zwischen zwei Herstellungsverfahren. Eine Variante bedient sich dem Heißdraht und die andere funktioniert nach dem Prinzip einer Drahtsäge.

Das Heißdrahtverfahren arbeitet mittels eines gespannten Widerstandsdrahtes, an den eine Spannung gelegt wird. Durch den entstehenden Stromfluss erhitzt sich der Draht auf rund 200°C und beginnt zu glühen. Dadurch besitzt er die Fähigkeit, durch Dämmmaterialien zu gleiten. Bei der Führung des Heißdrahtes stehen zwei Möglichkeiten zur Auswahl. Die Verwendung eines Drahtes, gehalten durch einen U-Bügel,²⁰ der an einem Roboterarm montiert wird und sich frei durch den Raum bewegen kann. Oder eine Maschine aus zwei Portalen, zwischen denen der Draht in zwei hitzebeständigen Führungsblöcken gespannt wird, welche unabhängig voneinander bewegt werden können.²¹

²⁰ vgl. Glynn/Sheil: *Making Digital Architecture. FABRICATE: London 2011, S. 77ff*

²¹ vgl. FABLAB LUZERN: <http://luzern.fablab.ch/heissdraht-schneidegerät-cnc-gesteuert/>, in: <http://luzern.fablab.ch/>, 21. September 2014

Das System der Drahtsäge beruht auf ständiger Bewegung und kann mit einer Bandsäge verglichen werden, die sich den Weg durch das Material schneidet. Ein Schmiermittel wird für die Kühlung des Schneidedrahtes und gleichzeitig zum Abtransport des Verschnittes eingesetzt. Die bearbeiteten Bauteile lassen sich durch additives Fügen zu flexiblen geometrischen Strukturen zusammensetzen.²²

²² vgl. Glynn/Sheil: *Making Digital Architecture. FABRICATE: London 2011*, S. 77ff

Beispiele für die oben erwähnten Herstellungsverfahren sind der *PERISCOPE TOWER* von Tierson Boutte, unterstützt vom *FabLab* des *Taubman College of Architecture* von der *University of Michigan*.

Dabei handelte es sich um 100 Prozent recycelte EPS-Blöcke, die mit Hilfe eines robotergesteuerten Heißdrahtes zugeschnitten und anschließend durch Stapeln zu einem hohlen, circa 15 Meter hohen Turm zusammengefügt wurden. Damit wollte man die Möglichkeiten eines low budget Projektes zeigen, welches durch extreme Leichtigkeit und geringen Einsatz von Arbeitskräften bestach.²³

²³ vgl. Bell-Cokcan, Sigrid/ Braumann, Johannes: *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design. ROB|ARCH, Wien 2012*, S.66

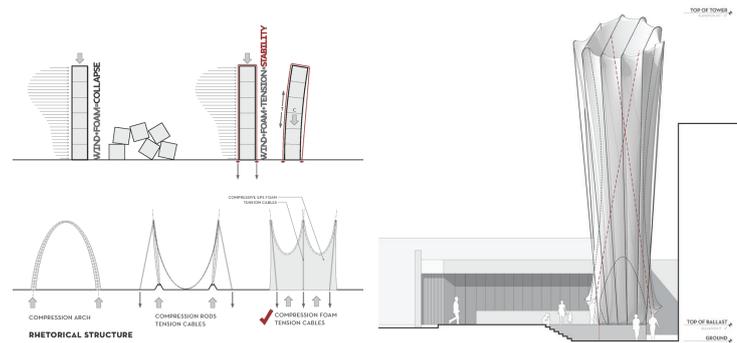


Bild 19. links, Konzeption des Periscope Tower

Bild 20. rechts, Entwurf

Bild 21 links, Realisierung



Bild 22. mitte, Zuschnittarbeiten mit robotergesteuertem Heißdraht.



Bild 23. rechts oben

Bild 24. rechts oben

Bild 25. rechts unten, Zusammensetzung der einzelnen Bauteile.

Weitere Realisierungen wurden beim Workshop *Processes for an Architecture of Volume* der Rob|Arch 2012 präsentiert. Zwei Experimente, geleitet von Jelle Feringa und Asbjorn Sondergaard, fanden gleichzeitig statt. Das eine erzeugte mittels Heißdraht aus EPS Blöcken eine Schalung für Betonstrukturen, während das andere Projekt versuchte, Bausteine aus Beton mit Hilfe eines maßgefertigten Diamantdrahtes zu schneiden, welcher auf einem Roboterarm befestigt wurde. Dieses Experiment verlief sehr langsam und chaotisch.²⁴

²⁴ vgl. Bell-Cokcan, Sigrid/
 Braumann, Johannes:
Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design.
 ROB|ARCH,
 Wien 2012, S.68ff



Bild 26. rechts, Automatisierte Betonschneidarbeiten mittels Diamantdraht.

Bild 27. links, Visualisierung des Prototypen aus Betonbausteinen.

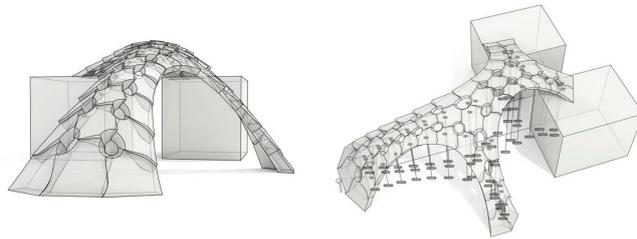


Bild 28. links, Entwurf des Prototypen

Bild 29. rechts, MSc2 Studio at Hyperbody TU Delft

MATERIAL ADDIERENDES HERSTELLUNGSVERFAHREN

Die additive Fertigung bezeichnet einen Vorgang, bei dem mittels digitalen 3D-Modellierdaten durch das Auftragen von Material schichtweise ein Bauteil gebildet wird. Als Materialien sind unterschiedliche Metalle, Kunststoffe und Verbundwerkstoffe verfügbar.

Die additive Fertigung stellt sich dort unter Beweis, wo die konventionelle Herstellung an ihre Grenzen stößt. Die Technologie behandelt jene Gebiete, wo Konstruktion, Design und Fertigung neu entwickelt werden müssen, um Lösungsansätze zu finden. Die Konstruktion bestimmt somit die Realisierung und nicht umgekehrt. Die additive Fertigung ermöglicht komplexe Strukturen, die gleichzeitig leicht, stabil und individuell sein können.²⁵

²⁵ vgl. EOS: Für Technologie-Interessierte: <http://www.eos.info/additive_fertigung/fuer_technologie_interessierte>, in: <<http://www.eos.info/>>, 21. September 2014

Man unterscheidet zwischen folgenden Disziplinen:

EXTRUDIEREN

Das Projekt *BUILDING BYTES 3D PRINTED BRICKS* von Architekt Brian Peters, wurde im Zuge eines sechswöchigen Aufenthaltes in den Niederlanden verwirklicht. Dieser bot die Möglichkeit mit Druckkeramik - eine Rezeptur aus flüssigem Steingut - an einer geplanten Form zu experimentieren. Der selbst generierte 3D Drucker des Architekten sollte für die Fertigung von keramischen Ziegeln für den Bau im größeren Maßstab entwickelt werden.

Das resultierende Ergebnis belegt, dass mittels 3D Druck tragfähige und kostengünstige Ziegelkomplexe erzeugt werden können. Durch die Verwendung von größeren Maschinen könnten höhere Stückzahlen oder größere Ziegel in Form von Bandsystemen modelliert werden. Dabei müsste es sich nicht um Keramik handeln, sondern man könnte auch Beton, Zement oder andere beliebige Mischungen von Baustoffen benutzen.²⁶

²⁶ vgl. Glynn/Sheil: *Making Digital Architecture. FABRICATE: London 2011*, S. 112ff

Bild 30. links

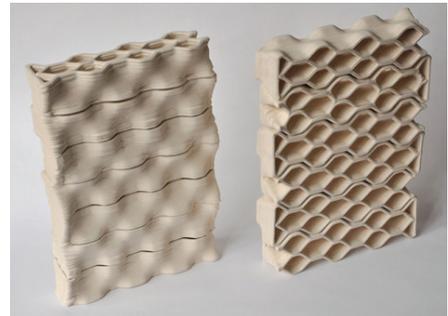


Bild 31. rechts

Bild 32. links

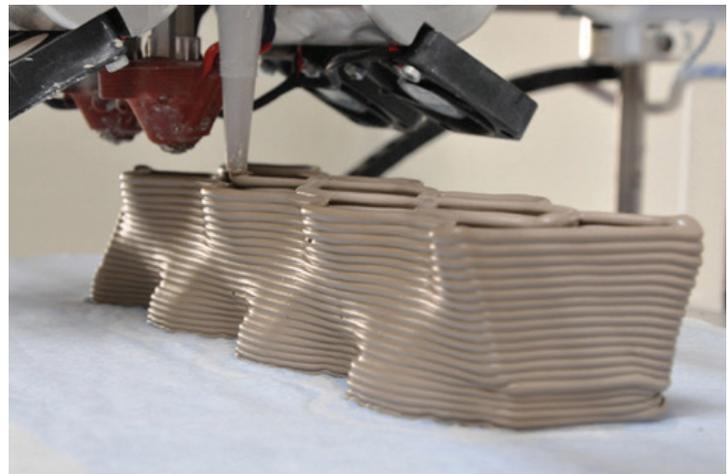


Bild 33. rechts, Herstellungsprozess durch Schichten von Druckkeramik

Die Forschungsarbeit *MESH MOULD* von Gramazio und Kohler in Kooperation mit der Firma Sika Technology AG, basierte auf einer robotergesteuerten Fertigung von Tragstrukturen, die einerseits eine Art Schalung bilden und andererseits die Bewehrung für Betonteile übernehmen. Die Festigkeitseigenschaften von Beton weisen eine hohe Aufnahme von Druckkräften, jedoch eine niedrige von Zugkräften auf. Die Schalungsarbeit und das Einbringen von Bewehrung ist ein kostspieliger Faktor, welcher mehr als 50 Prozent der Gesamtkosten der Betonkonstruktion trägt.

In Abhängigkeit dieser zwei Kriterien wurde versucht, durch computergesteuerte Roboterherstellung beide Prozesse miteinander zu verbinden und zu vereinfachen. Es wurde eine Methode entwickelt, ein synthetisches Polymer zu weben, um ein zugfestes Material für die Bewehrung und gleichzeitig die Form des gewünschten Betonteils herzustellen. Durch die Innovation des *Mesh Mould* konnten komplexe Baugemetrien erzeugt, Kosten gesenkt und Material gezielt eingesetzt werden.²⁷

²⁷ vgl. Glynn/Sheil: *Making Digital Architecture. FABRICATE: London 2011, S. 124ff*

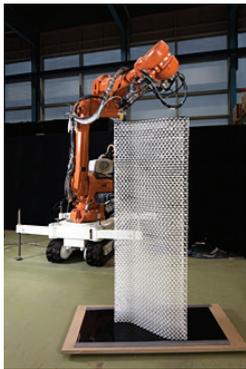


Bild 34. links, Frei beweglicher Industrieroboter webt Polymernetz

Bild 35. rechts

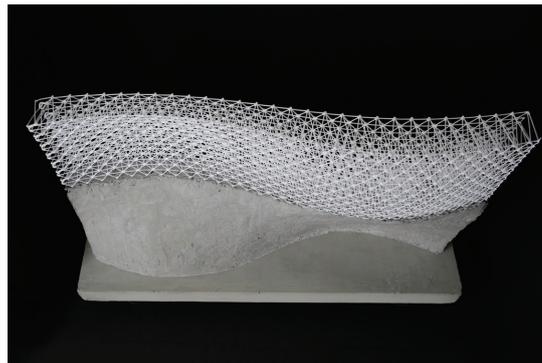
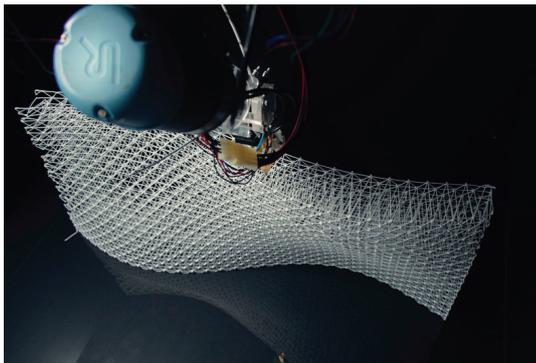


Bild 36. links

Bild 37. rechts, Polymernetz dient als Bewehrung für Betonstruktur

Das Projekt *MORPHFAUX* basierte auf einer der berühmtesten Äußerungen von Louis Sullivan: „*form follows function*“ und wurde von den Mitgliedern des *Archiolab*, ein *Institut der University of Michigan*, in Frage gestellt. Für Joshua Bard, Steven Mankouche und Matthew Schulte war diese Aussage nicht ganz zutreffend. Denn ihrer Meinung nach sollte es heißen: „*form follows industry specification*“. Diese These sollte nahelegen, dass sich die Form den Vorkommen von günstigen Materialien und dem Optimieren von Herstellungsverfahren bediente. Die Entwickler versuchten sich mit Ornamentik zu beschäftigen, indem sie Stück händisch auftrugen und mittels einer individuellen Spachtel, die am Roboterarm befestigt wurde, abzogen. *Morphfaux* benutzte die synthetischen Eigenschaften des Verputzens, weshalb Unebenheiten der vorfabrizierten Bauweisen ausgeglichen werden konnten. *Archiolab* benötigte ein Trägermaterial, welches einen guten Verbund mit dem Putz oder dem Gips bildete. Dafür wurde Holz als formbildendes Material eingesetzt, da es einerseits ökologisch nachhaltig war und andererseits gewisse Anwendungsgrenzen aufzeigte. Es musste ein Weg gefunden werden, um den Unterschied zwischen dem digitalen Modell und der realen, dreidimensionalen Holzkonstruktion ausgleichen zu können.²⁸

²⁸ vgl. Bell-Cokcan, Sigrid/ Braumann, Johannes: *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design. ROB|ARCH, Wien 2012, S.139ff*

Bild 38. links, Dreidimensionale Holzkonstruktion dient als Anwendungsbereich für Morphfaux



Bild 39. rechts

Bild 40. links, Stuck wird durch eine robotergesteuerte Spachtel in Form gebracht.



Bild 41. rechts

PICK AND PLACE

Durch die methodische Anwendung des Computers und des Roboters im Bereich der digitalen Planung und Fertigung, können spezifische Systeme gestaltet werden. Es existiert die Möglichkeit, Materialien oder Elemente in geordnete Formen zu bringen, die auf traditionelle Weise nie umsetzbar wären. Das Pick and Place-Verfahren bietet eine Vielfalt von Anwendungsbereichen, bei gleichbleibend hoher Präzision und Produktqualität. Es ist nicht notwendig, vordefinierte Fabrikationsprozesse und Baustoffe festzulegen.

Bei den Projekten *Adding On*, *Structural Oscillation* und *Flight Assembled Architecture* des Architekturbüros Gramazio und Kohler wurden Normalformatziegel, Betonbausteine, Schalungselemente oder Holzlatten mit festgelegten Abmessungen, mittels eines Roboters oder einer Roboterdrohne in eine gewünschte Anordnung gebracht. Dies ermöglichte flexible Geometrien, wie zum Beispiel Wandsysteme, die bei händischer Fertigung nur mit hohem Aufwand möglich gewesen wären.²⁹

²⁹ vgl. Müller, Lars: *Digital Materiality in Architecture*. Gramazio & Kohler, 2008, S. 57ff

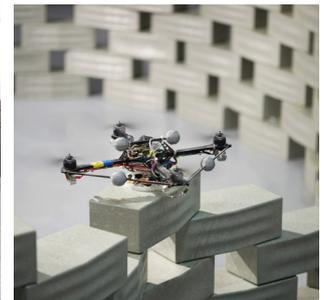
Bild 42. links, Voll automatisierter Aufbau von Ziegelwänden an der ETH Zürich.



Bild 43. mitte



Bild 44. rechts, Flugdrohnen setzen Ziegelsteine an die gewünschte Position.



TEXTILE SYSTEME

Bei textilen Systemen handelt es sich um eine automatisierte Fertigungsmethode von unterschiedlichen Leitlinien mittels Carbon -und Glasfasern. Dieses Verfahren bringt eine aufgespulte Faser durch Abwickeln mit Hilfe eines Roboterarms in eine gewünschte Lage.

Im November 2012 realisierten das *Institut für Computerbasiertes Entwerfen* (ICD) und das *Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen* (ITKE) der Universität Stuttgart einen Forschungspavillon aus faserbasiertem Verbundmaterial, der zusammen mit Studierenden im Rahmen einer einjährigen Forschungs- und Umsetzungszeit entworfen und ausgeführt wurde. Sie beschäftigten sich mit dem integrativen Ansatz zur architektonischen Gestaltung und Technik von biologischen Prozessen und Strukturen, denen die Übersetzung biologischer Formprinzipien der Außenskelette von Gliederfüßen, als Ausgangspunkt für neue Konstruktionsformen in der Architektur zugrunde lag. Der Pavillon besaß eine Spannweite von 8m bei einer Schalendicke von lediglich 4mm und wurde vollständig aus insgesamt 30km Carbon -und Glasfasern mit einem Gewicht von weniger als 320kg realisiert. Um das Aufspinnen garantieren zu können, wurde ein Stahlgerüst entwickelt, welches auf einem drehbaren Apparat situiert war. Zusätzlich stand der Roboter, der die Geometrie Schicht für Schicht erstellte, in Bewegung.^{30,31}

³⁰ vgl. *acrch2o: ICD/ITKE Research Pavilion 2012*, <<http://arch2o.com/icditke-research-pavilion-2012/>>, in: <<http://www.arch2o.com/>>, 22. September 2014

³¹ vgl. *itke: Forschungspavillon ICD/ITKE 2012*, <<http://www.itke.uni-stuttgart.de/entwicklung.php?id=30>>, in: <<http://www.itke.uni-stuttgart.de/index.php?lang=de>>, 22. September 2014



Bild 45. rechts, Abbildung des fertiggestellten Research Pavilions.

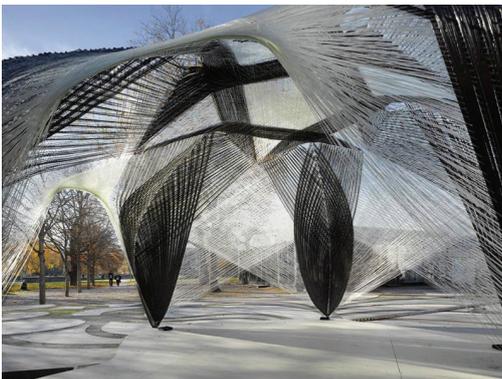


Bild 46. links

Bild 47. rechts, Roboterarm spinn eine Netz aus Carbonfasern.

Bild 48. links

³² vgl. Westphal, Chris: Drogen werden zu Spinnen der Luft, <<http://www.drohnen.de/707/forschung-und-video-drohnen-werden-zu-spinnen-der-luft/>>, in: <<http://www.drohnen.de/>>, 22. September 2014

Ganz nach dem Prinzip der oft gefürchteten Spinnen, die ihr Netz unter anderem zum Beutefang bauen, kann auch eine Drohne ein solch diffiziles Gebilde weben. Das *Institut für dynamische Systeme und Regelungstechnik* (IDSC) erforschte in Zusammenarbeit mit dem *Lehrstuhl für Architektur und digitale Fabrikation* an der Hochschule Zürich diesen Vorgang. Die Wissenschaftler entwickelten Systeme und Herstellungsverfahren für das robotergesteuerte Weben, welche mit reißfesten Kunststoffen arbeiteten. Die Umsetzung erfolgte mit unbemannten Flugfahrzeugen, die aufgrund ihrer Handhabung und Wendigkeit einfache Geometrien aus Fäden spinnen konnten. Durch eigens konzipierte Algorithmen und besondere Flugmanöver konnten bis zu zwei Drohnen simultan an einem Netz weben.^{32,33}

³³ vgl. Gotzner, Peter: Drogen spinnen selbstständig Netze, <<http://www.spiegel.de/netzwelt/gadgets/robotik-fliegende-spinnen-drohnen-spannen-seile-a-932890.html>>, in: <<http://www.spiegel.de/>>, 22. September 2014

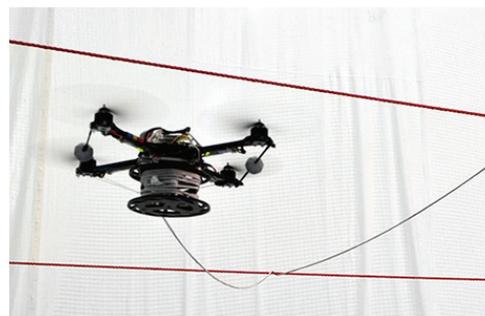


Bild 49. Flugdrohne flechtet eine Tragstruktur aus Kunststoffen.

Bild 50. links



Bild 51. rechts



³⁴ vgl. ROBOFOLD: Process, <<http://www.robofold.com/make/process>>, in: <<http://www.robofold.com/>>, 22. September 2014

MATERIAL FORMENDES HERSTELLUNGSVERFAHREN

UMFORMEN / ROBO FOLD

³⁵ vgl. dezeen magazine: Venice Biennale Theme 'Common Ground' Zaha Hadid Architects, <<http://www.dezeen.com/2012/08/18/arum-by-zaha-hadid-architects-at-venice-architecture-biennale-2012-2/>>, in: <<http://www.dezeen.com/>>, 22. September 2014

Bei dieser Variante dient der Roboterarm als Druck -oder Zugeinrichtung, welche ein Ausgangsmaterial in eine gewünschte Form presst beziehungsweise zieht. Eine Bandbreite von Werkstoffen, wie zum Beispiel Metalle, Kunststoffe oder Sand können eingesetzt werden und bieten einen hohen Grad an Flexibilität.³⁴

Das Projekt ARUM von *Zaha Hadid Architects* wurde auf der Biennale 2012 in Venedig ausgestellt. In Anlehnung an die Gitterschalen von dem Architekten und Tragwerksplaner Otto Frei wurden schlanke und organische Formen mit dem Know How der Gegenwart verknüpft.³⁵ Mit Hilfe von algorithmischen Formen wurde ein Herstellungsprozess entwickelt, um leichte und gefaltete Metallplatten zu modellieren, die aufgrund ihrer Faltung statische Tragfähigkeit gewinnen.

Bei der Fertigung wurden vorgeschchnittene Bleche von zwei Roboterarmen mit Saugknöpfen positioniert und durch eine dritte Saugereinheit durch eine Verdrehung an der gewünschten Stelle gekrümmt. Der Prozess des Falten wiederholte sich mehrmals und die einzelnen Bleche wurden daraufhin miteinander vernietet.³⁶ Das entstandene Design ließ die Form eines Aronstabgewächses (Arum Shell) errahnen.³⁷

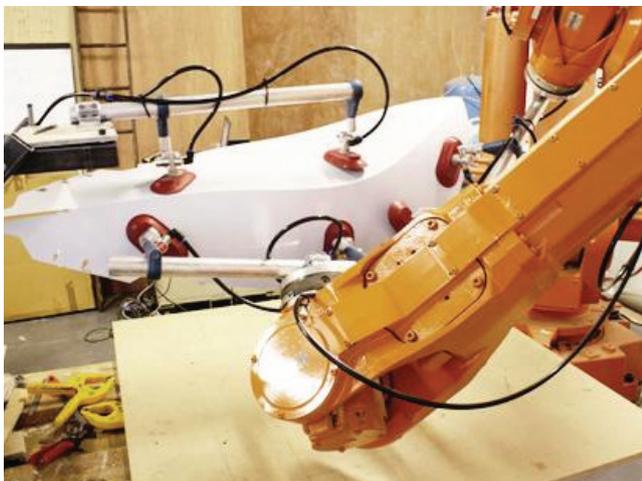


Bild 52. rechts

³⁶ vgl. ROBOFOLD: Process, <<http://www.robifold.com/make/process>>, in: <<http://www.robifold.com/>>, 22. September 2014

³⁷ vgl. Zara, Janelle: Eine blühende Hommage an Frei Otto: Zaha Hadids Installation für die Architekturbiennale Venedig - See more at, <[http://de.blouinartinfo.com/news/story/820389/eine-bluhende-hommage-an-frei-otto-zaha-hadids-installation](http://de.blouinartinfo.com/news/story/820389/eine-bluhende-hommage-an-frei-otto-zaha-hadids-installation#sthash.ZFcXvq7W.dpuf)>, in: <<http://de.blouinartinfo.com/>>, 22. September 2014

Bild 53. links, Robofold entwickelte ein rotorgesteuertes Verfahren um Bleche definiert falten zu können.

Bild 54. rechts, Vorstellung von Arum auf der Architektur Biennale in Venedig, 2012.

Bild 55a, links, Saugereinheiten dienen als Befestigungspunkte.

Bild 55b. rechts

ERKENNTNIS:

Die digitale Planung und Fertigung ermöglichte die Realisierung von verschiedenen Formen und Materialien für den Architektur- und Designbereich. Es herrschte ein breites Spektrum an neuen Ideen und Herstellungsverfahren, die bereits getestet und in Projekten angewendet wurden. Die automatisierte Fabrikation vermittelte einen sehr starken Drang nach Optimierung, der laut meiner Recherche noch nicht zur Gänze ausgereizt wurde. Das steigende Interesse an diesem Forschungsgebiet war nach meinen Einschätzungen an gewisse Ziele gebunden:

- Eine Steigerung der Qualität und Vereinfachung der Realisierung von Freiformen
- Die Minimierung des ökologischen und ökonomischen Aufwandes.

Ein sehr prägendes Beispiel im Bereich der innovativen Herstellungsverfahren lieferte der Inhaber der Bau & Technologie GmbH (B&T) Kruno Stephan Thaleck. Während eines Interviews in Wien im Jänner 2012 schilderte er mir, dass sich sein Unternehmen mit dem Bau von extravaganter Architektur auseinandersetzte. B&T bekam den Auftrag zur Fertigung der Sichtbetonoberflächen und der dreidimensionalen Gipswände für das prestigeträchtige Projekt Roca London Gallery. Die Anforderungen an die Betonbauteilqualität waren sehr hoch, da sich die Planer des Architekturbüros Zaha Hadid für das Designthema Wasser entschlossen hatten. Fließende, ineinander übergehende Räume ohne scharfe oder rechtwinkelige Kanten führten zu mehrfach gekrümmten Geometrien. Darüber hinaus mussten fehlerfreie Sichtbetonoberflächen und sehr leichte Wandsysteme hergestellt werden. Allein die Forschung der Technologie für die Realisierung benötigte zweieinhalb Jahre.^{38.1}

Thaleck entwickelte die sogenannten CEton-Elemente, welche aus textilbewehrten Faserverbundbauteilen auf Betonbasis, mit einem eingelegten Aluminium-Waben-Kern konstruiert wurden. Durch diese Technologie konnten freigeformte Betonteile mit lediglich 60mm Wandstärke und einem Gewicht von 50kg/m² gefertigt werden. Für die Herstellung dieser Sonderbauteile verwendete B&T CEton in Kombination mit aufwendig produzierten Sonderschalungen, welche mit einem bestimmten Trennmittel versehen waren.^{38.2}



^{38.1} Interview mit Kruno Stephan Thaleck, geführt von Jürgen Holl, C³ Atelier Wien, Jänner 2012

^{38.2} vgl. El Ahwany, Claudia: Vom Wasser inspiriert, mit Beton realisiert. BauPortal. Horb a.N., 10/2012, S. 28-29

Bild 56a. links, dünnwandige Betonsonderbauteile von B&T

Bild 56b. rechts, Sonderschalungen von B&T

Die rund 900 Einzelteile wurden mit 72 Sattelzügen von Raubling (D), nach London transportiert. Die Lieferung war sehr mühsam, da jedes Stück ein Unikat war und mit besonderer Sorgfalt behandelt werden musste. Der Bruch oder die Beschädigung eines Elementes hätte eine erneute Fertigung in Raubling verlangt und somit den Bauprozess verzögert.^{38.3}

^{38.3} vgl. El Ahwany, Claudia: Vom Wasser inspiriert, mit Beton realisiert. BauPortal. Horb a.N., 10/2012, S. 28-29

Um Plagiate dieser Strukturen zu unterbinden, geschah nach der Fertigstellung der Sonderbauteile, die umgehende Vernichtung der gesamten Sonderschalungen vom Architekturbüro.^{38.4}

^{38.4} Interview mit Kruno Stephan Thaleck, geführt von Jürgen Holl, C³ Atelier Wien, Jänner 2012

Dieses mühsame Projekt spiegelte für mich die Problematik bei der Herstellung von futuristischen Formen wieder. Durch die steigenden Möglichkeiten in der digitalen Planung, war die Aufbereitung von den extravaganten Formen im Modellbereich nahezu kein Problem mehr. Die Realisierung brachte jedoch einige Schwierigkeiten mit sich, die nicht einfach zu lösen waren. Die Anforderungen an die Qualität und die Eigenschaften der Betonsonderbauteile waren bei der Umsetzung der Roca London Gallery enorm. Die Herstellung und die Entsorgung der Spezialschalungen waren ökologisch und ökonomisch nicht nachhaltig. Darüber hinaus waren die großen Transportwege und der damit verbundene logistische Aufwand beträchtlich.

Aus diesem Grund versuchte ich, an einer innovativen Technologie zu forschen, welche die tatsächliche Umsetzung von Betonsonderbauteilen erleichtern und auf längere Sicht beeinflussen sollte.



Bild 56c. Roca London Gallery von Zaha Hadid

Im folgenden Kapitel beschäftigte ich mich mit der Recherche und der Forschung im Bereich des 3D Drucks, da die additive Fabrikation von Bauteilen eine mögliche Lösung dieser Problematik sein könnte.

2. GRUNDLAGEN DER FORSCHUNG UND RECHERCHE

2.1. DIGITALE PLANUNG, FERTIGUNG UND ROBOTIK

- MATERIAL ABTRAGENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN
- MATERIAL MINIMIERENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN
- MATERIAL ADDIERENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN
- MATERIAL FORMENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN

2.2. 3D DRUCKEN / RAPID PROTOTYPING

- SINTER- UND PULVERDRUCKVERFAHREN
- DRUCKEN VON EXTRUDIERTEN WERKSTOFFEN
- STEREOLITHOGRAFIE
- LAMINATED OBJECT MODELING

2.3. BETON 3D DRUCK

- CONCRETE PRINTING
- CONTOUR CRAFTING
- RADIOLARIA PAVILLON
- SHANGHAI WINSUN
- 3D PRINTING ON THE MOON
 - LUNAR CONTOUR CRAFTING
 - THE DESIGN OF A LUNAR OUTPOST

2.2. 3D DRUCKEN Rapid Prototyping

- SINTER- UND PULVERDRUCKVERFAHREN
- DRUCKEN VON EXTRUDIERTEN WERKSTOFFEN
- STEREOGRAPHIE
- LAMINATED OBJECT MODELING

3D DRUCKEN / RAPID PROTOTYPING

Das Rapid Prototyping ist ein aktuelles Verfahren in der digitalen Herstellung von Prototypen. Durch die Auseinandersetzung mit den unten geschilderten 3D Druck Technologien wurde ich inspiriert, ein System zu entwickeln, welches die Realisierung flexibler Betonteile unterstützt.

Beim Rapid Prototyping handelt es sich um ein Fertigungsverfahren zur raschen und ökonomischen Realisierung von Modellen, Mustern, Geometrien, Prototypen und Werkzeugen auf der Basis von dreidimensionalen CAD Volumenmodellen. Es ist ein generativer Herstellungsprozess, der auf der Grundlage der computerinternen Datenmodelle erfolgt. Das Rapid Prototyping Verfahren arbeitet ohne Gussformen oder spezielle Werkzeuge, weshalb auch von einer werkzeuglosen Herstellung gesprochen wird. Durch den schichtweisen Aufbau von Bauteilen wird das Gebilde mit Hilfe von einzelnen Layern generativ erzeugt. Schicht für Schicht wird ein formloser Werkstoff durch Zugabe von Energie, wie zum Beispiel durch einen Laserstrahl, verfestigt.^{39.1}

Das 3D Drucken beinhaltet viele unterschiedliche Technologien, die sich in vier übergeordnete Gruppen einteilen lassen: das Sinter -oder Pulverdruckverfahren, das Drucken mit extrudierten Werkstoffen, die Stereolithographie und das Laminated Object Modeling.^{39.2}

^{39.1} vgl. *Fastermann, Petra: Eine Zukunftstechnologie-Kompakt erklärt. 3D-Druck/Rapid Prototyping, Berlin-Heidelberg 2012, S. 5*

^{39.2} vgl. *Fastermann, Petra: Eine Zukunftstechnologie-Kompakt erklärt. 3D-Druck/Rapid Prototyping, Berlin-Heidelberg 2012, S. 117*

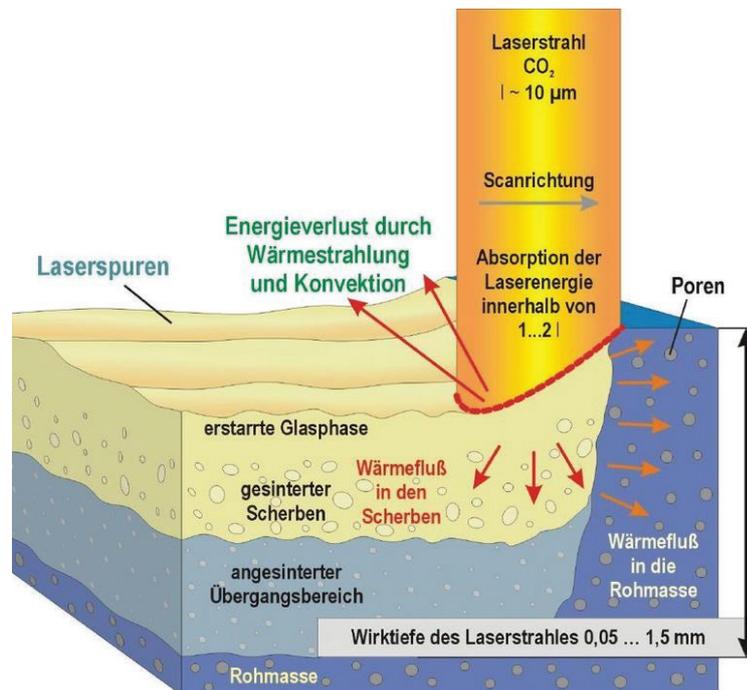
SINTER - ODER PULVERDRUCKVERFAHREN

Beim 3D Drucken mit Pulver wird ein flüssiges, pulverförmiges Material (z.B. Gips), Schicht für Schicht in einer Maschine aufgetragen und in Verbindung mit einem Bindemittel verklebt und ausgehärtet. Druckknöpfe, aus denen das Bindemittel in Form von kleinen Tröpfchen austritt, werden über das Pulver geführt. Das Austrittsmaterial wird punktuell aufgetragen und lässt die Pulverkörner kristallisieren und verkleben. Der mobile Träger des Pulvers bewegt sich während des Druckprozesses immer wieder um eine Schicht nach unten, damit der Prototyp schichtweise in die Höhe errichtet werden kann. Das flüssige Bindemittel, welches auf das Pulver aufgetragen wird, ermöglicht durch verschieden farbige Tinten mehrfarbige 3D Modelle. Sobald die Objekte fertiggestellt sind, säubert man sie vom umgebenden Pulver und imprägniert sie mit einer Art Sekundenkleber (Infiltration). Das Pulver, welches nicht zum Drucken verwendet wurde, wird erneut benutzt. Die Bandbreite an geeigneten Werkstoffen ist groß: Kunststoffe, Kalkpulver mit Epoxid-Hülle, Gips und weitere pulverförmige Materialien verschiedener Art.⁴⁰

Das selektive Lasersintern (SLS) unterscheidet sich vom Pulverdruckverfahren durch das Ausgangsmaterial und das Verfestigen der Schichten. Das Modell wird schichtweise erstellt und eine Laserquelle lässt die Partikel an der Oberfläche durch Sintern zu einem dreidimensionalen Prototyp miteinander verschmelzen. Durch die hohen Temperaturunterschiede schrumpft das Bauteil, was in weiterer Folge zu Maßabweichungen und Spannungen im Objekt führt. Folgende Baumaterialien können eingesetzt werden: Thermoplaste (wie zum Beispiel Polycarbonate, Polyamide, Polyvinylchlorid), Metalle, Keramiken und Sande.⁴¹

Anders als beim Selektiven Lasersintern wird beim Selektiven Laserschmelzen das Pulver nicht gesintert, sondern durch den Laser lokal vollständig umgeschmolzen. Verwendete Werkstoffe: Metalle, Kunststoffe und Keramiken.⁴²

Der Prozess des Elektronenstrahlschmelzens, auch Elektronenstrahlsintern, ermöglicht die Realisierung von metallischen Bauteilen. Mit Hilfe eines Elektronenstrahls, der durch eine elektromagnetische Feder manövriert wird, werden schichtweise Metallpulver aufgeschmolzen.⁴³



⁴⁰ vgl. Faßermann, Petra: Eine Zukunftstechnologie-Kompakt erklärt. 3D-Druck/Rapid Prototyping, Berlin-Heidelberg 2012, S. 117ff

⁴¹ vgl. Faßermann, Petra: Eine Zukunftstechnologie-Kompakt erklärt. 3D-Druck/Rapid Prototyping, Berlin-Heidelberg 2012, S. 118ff

Bild 58. Lasersintern

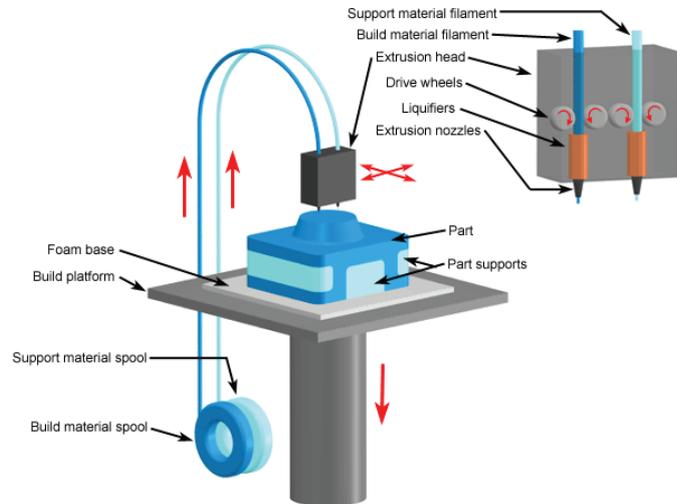
⁴² vgl. Faßermann, Petra: Eine Zukunftstechnologie-Kompakt erklärt. 3D-Druck/Rapid Prototyping, Berlin-Heidelberg 2012, S. 119

⁴³ vgl. Faßermann, Petra: Eine Zukunftstechnologie-Kompakt erklärt. 3D-Druck/Rapid Prototyping, Berlin-Heidelberg 2012, S. 119ff

DRUCKEN MIT EXTRUDIERTEN WERKSTOFFEN

Bild 59. Fused Deposition Modeling.

Beim Fused Deposition Modeling (FDM), ein Extrusionsverfahren der Firma Stratasys, handelt es sich um eine preisgünstige Variante im 3D Druck. Bei dieser Technologie wird ein schmelzfähiger und drahtförmiger Kunststoff oder auch ein Wachsmaterial mittels eines Extruders in einen zähen Zustand knapp über dem Schmelzpunkt versetzt und durch eine bewegliche Düse schichtweise und additiv aufgetragen. Da das Ausgangsmaterial, welches über eine Spule in den Extruder (Schmelzkammer) gelangt, nur minimal über dem



Verflüssigungspunkt erhitzt wird, entsteht der Erstarrungsprozess bereits kurz nach dem Austritt aus der Düse auf der Bauplattform. Bei auskragenden Bauteilen ist eine Stützkonstruktion nötig, die bei der Nachbearbeitung entfernt werden muss. Die Qualität der Oberfläche ist oft nicht besonders hoch, da die einzelnen Schichten deutlich zu sehen sind. Als Werkstoffe können ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol), Polycarbonate und Wachse verwendet werden.⁴⁴

⁴⁴ vgl. Fastermann, Petra: Eine Zukunftstechnologie-Kompakt erklärt. 3D-Druck/Rapid Prototyping, Berlin-Heidelberg 2012, S. 120

Das Multi Jet Modeling (MJM) unterscheidet sich vom Fused Deposition Modeling in Hinsicht der Nachbehandlung des Materials nach dem Auftragen. Und zwar wird der flüssige Werkstoff, meist wachsartige Thermoplaste und UV-empfindliche Photopolymere, sofort nach dem Drucken mit Hilfe von UV-Licht polymerisiert und verfestigt.⁴⁵

⁴⁵ vgl. Fastermann, Petra: Eine Zukunftstechnologie-Kompakt erklärt. 3D-Druck/Rapid Prototyping, Berlin-Heidelberg 2012, S. 121

Bild 60.

Das PolyJet Verfahren, der Firma Objet, ähnelt dem Multi Jet Modeling. Es gibt jedoch die Möglichkeit eines Mehrkomponenten 3D Druckens. Bei diesem Prozess können synchron unterschiedliche Werkstoffe mit verschiedenen Eigenschaften (Farbe und Shore-Härte) gedruckt werden. Die Maschinen enthalten drei Druckköpfe, einen für die Erstellung des Support Materials und die zwei anderen für das Aufbringen des Baumaterials. Die Kombination der unterschiedlichen Eigenschaften ermöglicht die Erstellung von Hybriden und die damit verbundenen Vorteile, in Hinsicht auf die präzisen Strukturen und die detaillierte Oberfläche.⁴⁶



⁴⁶ vgl. Fastermann, Petra: Eine Zukunftstechnologie-Kompakt erklärt. 3D-Druck/Rapid Prototyping, Berlin-Heidelberg 2012, S. 123ff

STEREOLITHOGRAFIE (STL ODER SLA)

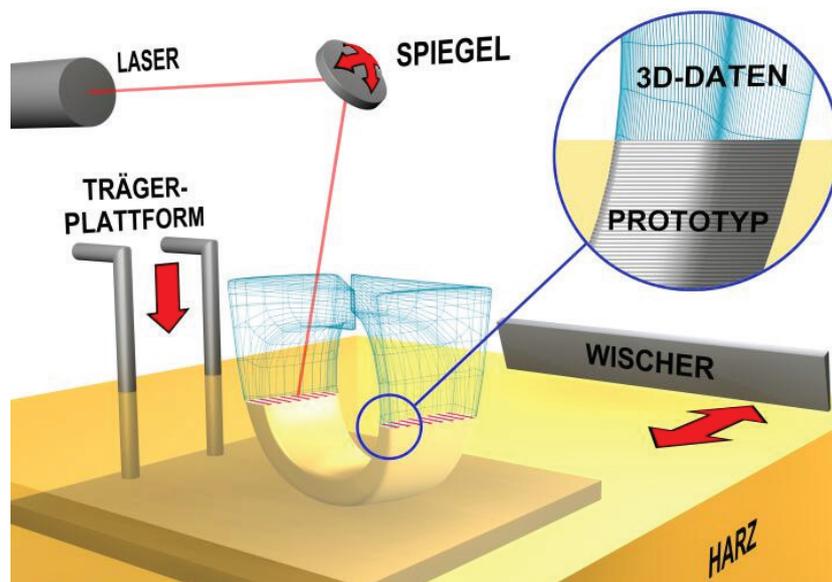
Bei diesem eher teureren Verfahren werden lichtaushärtende, flüssige Kunststoffe, beispielsweise Kunst- oder Epoxidharz, von einem Laser in Schichten ausgehärtet. Nach jedem Vorgang wird die fertige Schicht einige Millimeter in eine Flüssigkeit getaucht und in die Lage zurückgebracht, die einer Schichtstärke entspricht. Der flüssige Werkstoff wird über der vorherigen Schicht verwischt und gleichmäßig verteilt. Danach härtet ein Laser, der über bewegliche Spiegel gelenkt wird, die neue Schicht an den gewünschten Stellen aus. Nach dem Vorgang des Aushärtens wird die Bauplattform erneut in das Bad abgesenkt und der nächste Layer kann aufgetragen werden. Durch das Wiederholen dieses Prozesses wird ein dreidimensionales Objekt modelliert. Dank einer Stützkonstruktion, bestehend aus kleinen Säulen aus dem gleichen Material (z.B. Duromere oder Elastomere), wird das Bauteil vor dem Wegschwimmen in der Flüssigkeit geschützt. Das Entfernen des Stützwerkstoffes ist nachträglich erforderlich. Bei der Stereolithographie handelt es sich um das bisher am längsten eingesetzte Rapid Prototyping Verfahren, weshalb viele Erfahrungsberichte existieren, auf die aufgebaut werden kann.⁴⁷

⁴⁷ vgl. Fastermann, Petra: Eine Zukunftstechnologie-Kompakt erklärt. 3D-Druck/Rapid Prototyping, Berlin-Heidelberg 2012, S. 121ff

Das Film Transfer Imaging (FTI) Verfahren, der Firma 3D Systems, ist der Stereolithografie ähnlich. Der Unterschied besteht darin, dass der Werkstoff (Photopolymere) bei diesem Prozess nicht mit einem Laser, sondern mit einem Beamer ausgehärtet wird. Der Vorgang wird außerdem nicht in einem Bad durchgeführt, sondern mittels einer Transportfolie, die das noch nicht zur Gänze ausgehärtete Material auf die Plattform drückt. Die Transportfolie enthält einen Materialfilm in der größtmöglichen Breite, der durch eine Beschichtungsvorrichtung generiert wird. Der Baustoff wird durch die Folie hindurch belichtet und dadurch erhärtet. Unbelichtetes Material bleibt an der Folie kleben, wird nach dem Druckprozess abgezogen und zurück in die Druckerkartusche transportiert, welche bei Bedarf ausgetauscht wird. Dieses Verfahren bietet eine exakte Auflösung und eine ansehnliche Oberflächenqualität.⁴⁸

⁴⁸ vgl. Fastermann, Petra: Eine Zukunftstechnologie-Kompakt erklärt. 3D-Druck/Rapid Prototyping, Berlin-Heidelberg 2012, S. 122ff

Digital Light Processing (DLP) ist eine amerikanische Projektionstechnik, die sich kaum von dem oben genannten Verfahren unterscheidet. Die Objekte werden jedoch bei diesem Prozess in einem Bad von dem gebräuchlichen 3D Drucker Modell ZBuilder Ultra gebaut.⁴⁹

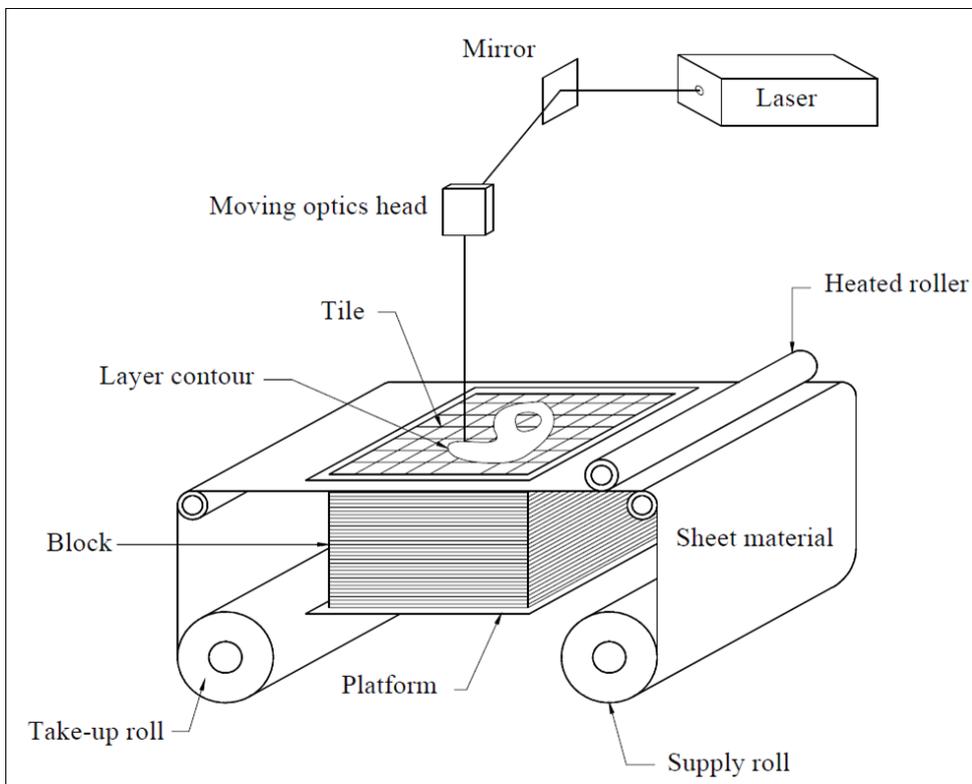


⁴⁹ vgl. Fastermann, Petra: Eine Zukunftstechnologie-Kompakt erklärt. 3D-Druck/Rapid Prototyping, Berlin-Heidelberg 2012, S. 123

Bild 61. Stereolithographie

LAMINATED OBJECT MODELING (LOM)

Bei dieser eher günstigen Technologie handelt es sich um eine ursprüngliche Variante des Rapid Prototypings. Der Werkstoff wird schichtweise aus Papier, Keramik, Kunststoff oder Aluminium laminiert und miteinander verklebt. Danach schneidet ein Messer, ein heißer Draht oder ein Laser die gewünschte Form aus, woraufhin wieder ein Layer aufgebracht werden kann. Hohle Baukörper können nur mittels einer Teilung generiert und anschließend wieder zusammengeklebt werden. Das Verfahren kommt ohne spezielle Stützkonstruktionen aus, weil die Objekte als ein Block modelliert werden.⁵⁰



⁵⁰ vgl. Fastermann, Petra: Eine Zukunftstechnologie-Kompakt erklärt. 3D-Druck/Rapid Prototyping, Berlin-Heidelberg 2012, S. 123

Bild 62. Schematische Darstellung von Laminted Object Modeling



2. GRUNDLAGEN DER FORSCHUNG UND RECHERCHE

2.1. DIGITALE PLANUNG, FERTIGUNG UND ROBOTIK

- MATERIAL ABTRAGENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN
- MATERIAL MINIMIERENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN
- MATERIAL ADDIERENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN
- MATERIAL FORMENDE HERSTELLUNGSVERFAHREN

2.2. 3D DRUCKEN / RAPID PROTOTYPING

- SINTER- UND PULVERDRUCKVERFAHREN
- DRUCKEN VON EXTRUDIERTEN WERKSTOFFEN
- STEREO LITHOGRAFIE
- LAMINATED OBJECT MODELING

2.3. BETON 3D DRUCK

- CONCRETE PRINTING
- CONTOUR CRAFTING
- RAIDOLARIA PAVILLON
- SHANGHAI WINSUN
- 3D PRINTING ON THE MOON

LUNAR CONTOUR CRAFTING

THE DESIGN OF A LUNAR OUTPOST

2.1. BETON 3D DRUCK

- CONCRETE PRINTING:

UNIVERSITY OF LOUGHBOROUGH UND XAVIER DE KESTELIER
(FOSTER&PARTNERS)

- CONTOUR CRAFTING:

BEHROKH KHOSHNEVISK

- RADIOLARIA PAVILLON:

D-SHAPE UND SHIRO STUDIO

- SHANGHAI WINSUN:

DECORATION DESIGN ENGINEERING CO

- 3D PRINTED CONCRETE CASTLE _ 3D HOUSE CONCRETE PRINTER: *ANDREY RUDENKO*

- 3D PRINTING ON THE MOON

*LUNAR CONTOUR CRAFTING: UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA,
NASA/MARSHALL SPACE FLIGHT CENTER, NASA/JET PROPULSION
LABORATORY, UNIVERSITY OF ALABAMA AND MORGAN RESEARCH
CORPRATION*

*THE DESIGN OF A LUNAR OUTPUT 3D PRINTING REGOLITH AS A
CONSTRUCTION TECHNIQUE FOR ENVIRONMENTAL SHILDING ON THE MOON*

CONCRETE PRINTING

Während meiner Recherche stellte sich heraus, dass es bereits Institutionen gab, die sich mit dem Thema des Beton 3D Drucks auseinandergesetzt hatten. Das breite Spektrum dieses Forschungsgebietes möchte ich anhand einiger Beispiele erläutern.

Die frühen Rapid Prototyping Maschinen konnten nur aus spröden Harzen oder gesinterten Nylon Modelle generieren. In den letzten Jahrzehnten entwickelte man Herstellungsverfahren mit Carbon verstärkten Polyamiden, Polycarbonaten und sogar Metallen wie Titan oder rostfreiem Stahl. Dadurch wurde die materielle Beschaffenheit der 3D gedruckten Prototypen in so hoher Qualität ausgeführt, dass diese auch als Endprodukte eingesetzt werden konnten. Die Forscher entfernten sich von dem kleinen Maßstab des Industriedesigns, indem sie anstelle von Metallen, Beton einsetzten, um architektonische Konzepte im großen Maßstab umzusetzen.⁵¹

⁵¹ vgl. Glynn/Sheil: *Making Digital Architecture*. FABRICATE: London 2011, S. 246ff

Bei der Entwicklung des Beton Modells erkannte das *Institut für Zivil –und Bauingenieur* der *Universität of Loughborough*, dass sich die Forscher keiner herkömmlichen CAD Anwendungen bedienen konnten. Somit wurde das *free form construction* Verfahren konzipiert, bei dem der gemischte, vorgefertigte Beton durch eine neun Millimeter große Düse extrudiert und durch Auftragen in Bahnen in die gewünschte Form gebracht wurde.⁵² Die Eigenschaften des Betons wurden durch die Zugabe von Flugasche, Silicatstaub, Mikro-Polypropylen-Fasern und durch ein spezielles Wasser-Binder-Gemisch verbessert. Diese spezielle Mischung ermöglichte eine maximale Offenzeit von 100 Minuten, um den Transport zur Düse zu ermöglichen. Die gedruckten Betonstränge waren annähernd 100 Mal so groß, wie beim konventionellen 3D Druck. Durch ein 3-Achs-Portal wurde der extrudierte Beton ohne Schalungssystem an der gewünschten Position mittels einer Düse aufgebracht. Die Forscher generierten eine Wand, an der die aufgetragenen Schichten sichtbar waren, um die Vorteile und die Fähigkeiten einer additiven Fertigung darzustellen. Das Exponat enthielt Öffnungen, um das nachträgliche Einbauen von Leitungen zu vereinfachen.⁵³

⁵² vgl. Glynn/Sheil: *Making Digital Architecture*. FABRICATE: London 2011, S. 246ff

⁵³ vgl. Le/Austin/Lim/Buswell u.a.: *Hardened properties of high-performance printing concrete*, Department of Civil and Building Engineering Loughborough University 2011

Bild 63. Aufbauen von Schichten an der Loughborough Universität



Bild 64. links, Öffnungen für Leitungsführung wurden berücksichtigt.



Bild 65. rechts, Loughborough Universität



CONTOUR CRAFTING

Das Verfahren des Beton 3D Drucks wurde bereits 2004 an der *University of Southern California* von *Professor Behrokh Khoshnevisk* ins Leben gerufen. Mit der Entwicklung des Prozesses *Contour Crafting* entstand die Idee einer additiven Herstellung von Häusern aus Beton. Die Basis dieses Projektes bildete eine in den USA entstandene Studie zum Risiko-, Gefahr -und Verletzungspotential im Bauwesen. Laut dieser Studie starben jährlich 10 000 Menschen im Bauwesen und 400 000 wurden verletzt. Im Zuge dessen versuchte Khoshnevisk ein Herstellungsverfahren zu entwickeln, welches das Gefahrenpotential in Kulturen mit niedrigem technologischem Hintergrund mindert und darüber hinaus den Bauprozess optimiert. Das Ziel dieser Forschung lag in der Fertigung von Wohnvierteln in minder entwickelten Ländern mit ökonomischen und kalkulierbaren Kosten, die in kürzester Zeit, mit hohen sicherheitstechnischen Vorteilen und flexibler Präzision, umgesetzt werden sollten.⁵⁴ Bei der *Contour Crafting* Technologie handelt es sich um eine hybride Herstellungsmethode, welche den Schalungs- und Betonierprozess miteinander vereint. Ein Roboter vermengt den Beton mit speziellen Zugaben zu einer rasch erhärtenden Mischung, die computergesteuert mit Hilfe einer Düse schichtweise aufgetragen wird. Diese Masse formt einen Rahmen, der als Schalung für den nächsten Arbeitsschritt dient. Dabei wird die Ummantelung mit Beton aufgefüllt, der den Kern bildet.⁵⁵

Diese Technik ermöglicht individuelle Geometrien, wie zum Beispiel Gewölbe oder zylindrische Wände, die kaum teurer wären, als herkömmliche Formen. So könnten Häuser in Serie modelliert werden, die auch spezielle Einzelanfertigungen erlauben würden.⁵⁶

⁵⁴ vgl. Behrokh Khoshnevisk: *3D printer can build a house in 20 hours*, (August 2012), <<http://www.youtube.com/watch?v=ehnzfGP6sq4>>, TEDxOjai, 24. September 2014

⁵⁵ vgl. Behrokh Khoshnevisk: *Houses of the future*, University of Southern California, 2004

⁵⁶ vgl. Marco Evers: *Häuser aus dem Drucker*, Der Spiegel, August 2004

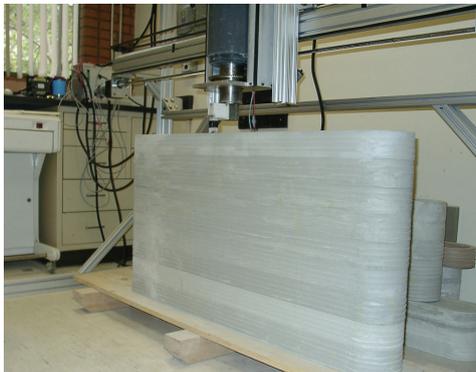


Bild 66. links, Beton 3D Drucken an der University of Southern California

Bild 67. mitte, Beton 3D Drucken mit geglätteter Oberfläche.

Bild 68. rechts, Auftragen und glätten der Druckbahnen.

Bild 69. links, Schematische Darstellung der unterschiedlichen Druckvarianten.

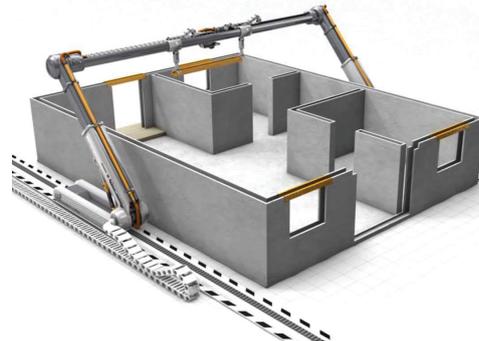
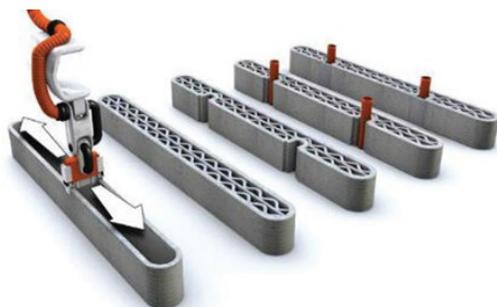


Bild 70. rechts, Beton 3D Druck von Häusern

RADIOLARIA PAVILLON

Das Projekt *Radiolaria Pavillon* beruhte auf der Zusammenarbeit von den zwei Institutionen *D-Shape*, vertreten von Enrico Dini, und *Shiro Studio*, geleitet von Andrea Morgante. Enrico Dini bediente sich der Technologie des 3D Druckers *Z-Corp*, der von der Firma 3D System entwickelt wurde, um seinen *D-Shape* Drucker umzusetzen.⁵⁷ Er adaptierte den Prozess, um die Herstellung von großen Bauteilen aus ausgehärtetem Sand zu ermöglichen. Bei der Fertigung wurde das Ausgangsmaterial (Sand oder Mineralstaub) aufgebracht und mittels eines Abziehers in einer gewissen Höhe (5-10mm) definiert. Der Erhärtungsprozess wurde durch einen punktuell eingesetzten, chemischen Katalysator, beziehungsweise einen Binder, gewährleistet. Mit Hilfe eines Portals, auf dem der Druckkopf automatisiert gelenkt wurde, überspannte man den Fertigungsbereich. Auf diesem Portal wurden in fünf Millimeter Abständen unterschiedlich gesteuerte Düsen befestigt, um das variable Auftragen des Bindemittels zu ermöglichen. Durch die geringen Öffnungen der einzelnen Bindemitteldüsen konnten erhärtete Volumenelemente mit den Abmessungen 5x5x5mm erzeugt werden. Der *Radiolaria Pavillon*, konnte pro Tag eine Druckhöhe von 150 – 200mm erreichen. Das Endprodukt, welches eine Größe von bis zu 3x3x3m erreichte, wies die gleiche Resistenz und Zugkraft wie Portlandzement auf, wobei die Farbe und das Design veränderbar waren. Nach Beendigung des Druckprozesses wurde die Oberfläche des Objekts von dem italienischen Künstler Andrea Morgante geglättet und poliert.⁵⁸

D-Shape war der erste großflächige 3D-Drucker, der ein fugenloses Herstellen von monolithischen Geometrien im großen Maßstab ermöglichte. Nur kurze Zeit nach Beendigung des *Radiolaria Pavillons* startete das Folgeprojekt *Radiolaria XL* mit einer Höhe von 9 Meter.⁵⁹

⁵⁷ vgl. Dini, Enrico: *D-Shape*, <http://www.d-shape.com/d_shape_presentation.pdf>, in: <<http://www.d-shape.com/>> 25. September 2014

⁵⁸ vgl. Glynn/Sheil: *Making Digital Architecture*. FABRICATE: London 2011, S. 233ff

⁵⁹ vgl. Glynn/Sheil: *Making Digital Architecture*. FABRICATE: London 2011, S. 233ff

Bild 71. links, Abbildung des *Radiolaria Pavilion* nach der Herstellung mit *D-Shape*



Bild 72. rechts

Bild 73. links, Enrico Dinis Portal-3D Drucker

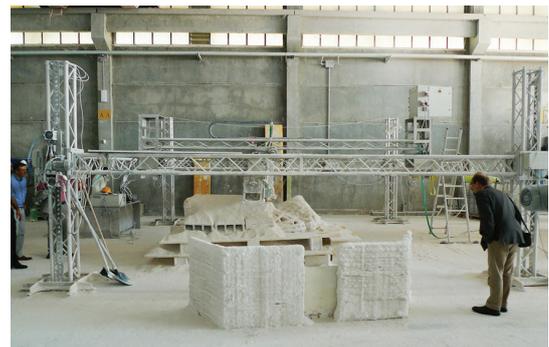


Bild 74. rechts, Bearbeitungsraum von *D-Shape*

SHANGHAI WINSUN

In 24 Stunden wurden vom Unternehmen *Shanghai WinSun Decoration Design Engineering Co* aus China, zehn Häuser mit Hilfe einer 3D Druck Technologie hergestellt. Die gedruckten Bauteile bestanden aus hochwertigem Beton mit Glasfaserbewehrung. Der Großteil des Materials wurde aus industriellem Bauschutt recycelt, weshalb die Kosten des Werkstoffes reduziert wurden. Die Realisierung der Wandsysteme basierte auf computer-gesteuertem Auftragen von Schichten. Genauere Daten zum Verfahren wurden noch nicht bekannt gegeben.⁶⁰

⁶⁰ vgl. *3D Printer Plans*, (16.04.2014): *Chinese release ew mages of 3D printed houses*, <<http://3d-printerplans.info/tag/shanghai-winsun-decoration-design-engineering-company/>>, in: <<http://3d-printerplans.info/>>, 25. September 2014



Bild 75. links, Abbildung der fertiggestellten Beton 3D Druckhäuser.



Bild 76. rechts

Bild 77. links, Setzen der vorgefertigten Wandsysteme.

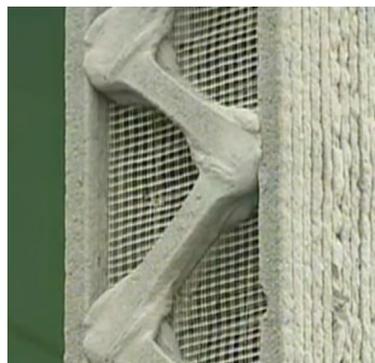
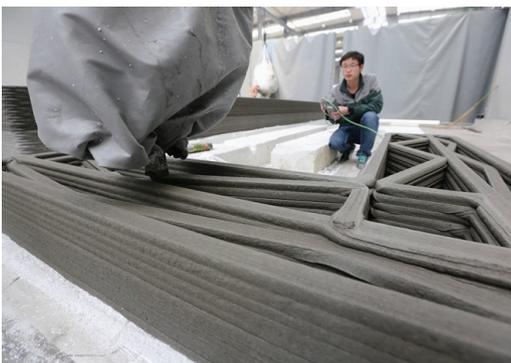


Bild 78. rechts

Bild 79. links, Herstellungsprozess von SHANGHAI WINSUN

Bild 80. mitte, Als Bewehrung wurden Glasfaserge-webe eingesetzt. Öffnungen im Wandsystem dienen als Wärmedämmung.

Bild 81. rechts

3D PRINTED CONCRETE CASTLE _ 3D HOUSE CONCRETE PRINTER

⁶¹ vgl. Varias, Lambert: 3D Printed Concrete Mini Castle: Disneyland Minnesata, <<http://technabob.com/blog/2014/08/27/3d-printed-concrete-mini-castle/>>, in: <<http://technabob.com/>>, 24. September 2014

Das Projekt von Andrey Rudenko wurde in Minnesota im Garten des Bauunternehmers mittels eines 3D Druckers realisiert. Die einzelnen, aufgetragenen Schichten hatten die Abmessungen von 10 x 30mm, was aber noch nicht dem Maximum entsprach. Zu Beginn wurde eine Druckhöhe von bestenfalls 50cm kalkuliert, damit das Objekt nicht durch das Eigengewicht des Druckmaterials einstürzte. Ein Zufall ergab an den Fertigungstagen sehr sonniges Wetter, weshalb die Höhe des Bauteils auf 100cm gesteigert werden konnte.⁶¹

Bild 82. links, 3D Printed Concrete Castle von Andrey Rudenko.

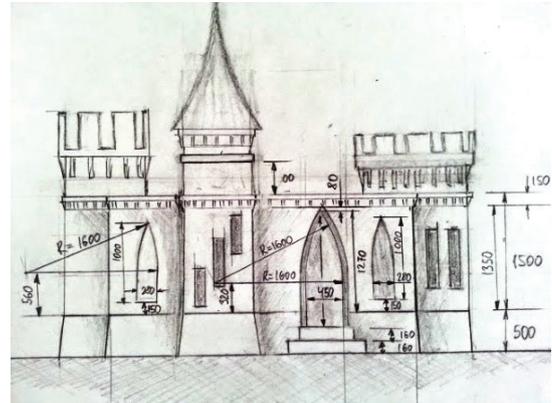


Bild 83. rechts, Skizzenhafter Entwurf des Concrete Castles

Bild 84. links, Vorgefertigte Bauteile.



Bild 85. rechts, Drucktechnologie und Fertigung.

Bild 86. links



Bild 87. rechts

3D PRINTING ON THE MOON

Bei der Möglichkeit, sich auf dem Mond häuslich niederzulassen, handelt es sich um keine Traumvorstellung. Dieser Wunsch den Mond zu besiedeln, beflügelte die Forschungseinrichtungen NASA und ESA eine Kolonie auf dem Trabant zu gründen. Beide Organisationen bedienen sich der führenden 3D Druck Technologien, wobei die NASA eine Kooperation mit der University of Southern California einging.

LUNAR CONTOUR CRAFTING

UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA, NASA/MARSHALL SPACE FLIGHT CENTER,
NASA/JET PROPULSION LABORATORY, UNIVERSITY OF ALABAMA AND MORGAN RESEARCH CORPORATION

Die Planung enthält das entwickelte System *Contour Crafting* von Behrokh Khoshnevisk, welches das vorhandene Mondmaterial zusammen mit Zusatzstoffen mischt und zu einem kraftableitenden Material verdichtet. Diese Methode wird adaptiert und ermöglicht die Herstellung gekrümmter Wände, die zum Bau der Mondstation nötig sind. Die Bau – bzw. Bearbeitungsroboter sollen mittels Spaceshuttles ins Weltall transportiert werden, um den vorhandenen Mondsand aufzubereiten.⁶²

Beim *Contour Crafting* wird ein auf Schienen lenkbarer Portalroboter aufgebaut, auf dem eine im Raum bewegliche Düse montiert ist, die das Baumaterial in Schichten aufträgt. Am Mond führen die Dünen zu erheblichen Unebenheiten, weshalb der Prozess erschwert wird. Darüber hinaus besteht keine Möglichkeit, die Schienen nach Beendigung des Bauprozesses an andere Positionen zu transportieren. Somit werden die Schienen auf automatisierten Walzenfahrzeugen fixiert, was eine Erleichterung der Bewegung mit sich bringt.

Dieses Konzept soll die Basis oder die fundamentale Tragstruktur für die Mondstationen bilden.⁶³

⁶² vgl. Khoshnevisk, Bodiford u.a.: *Luna Contour Crafting - A Novel Technique for ISRU-Based Habitat Development*, University of Southern California-NA-SA-University of Alabama-Morgan Research Corporation. 2005

⁶³ vgl. Khoshnevisk, Carlson u.a.: *Contour Crafting Simulation Plan for Luna Settlement Infrastructure Buildup*, <<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784412190.155>>, in: <<http://ascelibrary.org/>>, Oktober 2012



Bild 88. links, Konzeptuelle Annäherung an die Besiedelung des Mondes.

Bild 89. rechts

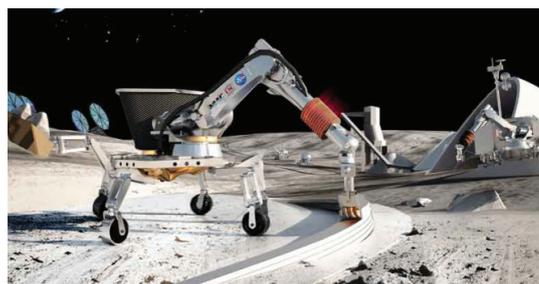
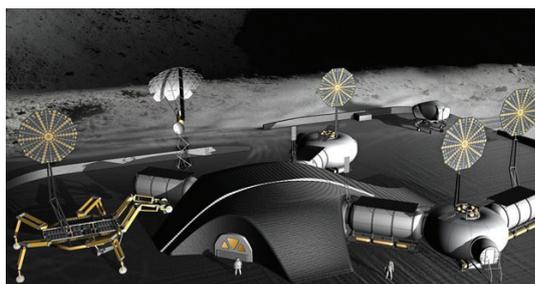


Bild 90. links

Bild 91. rechts

THE DESIGN OF A LUNAR OUTPOST

3D PRINTING REGOLITH AS A CONSTRUCTION TECHNIQUE FOR ENVIRONMENTAL SHIELDING ON THE MOON

Eine Studie ergab, dass in Anlehnung an den Herstellungsprozess von *D-Shape*, Mondstaub ebenfalls als Baumaterial eingesetzt werden könnte.

Durch die Flexibilität des Ausgangsmaterials ist die Fertigung in sämtlichen geographischen Bereichen möglich, eben auch auf dem Mond. Die *ESA* hat in Partnerschaft mit Xavier de Kestelier (*Foster & Partners*), Enrico Dini (*Monolite LTD*), Giovanne Cesaretti (*Alta SpA*) und Valentina Colla (*SSSC_Perco*) das Projekt *The Design of a Lunar Outpost* gestartet.⁶⁴

Das vorhandene Material ist über den gesamten Trabanten verteilt und schwankt bei Schichtdicken von 20cm bis zu 10m. Nur der Bindemittelbedarf muss noch geklärt werden, da es scheinbar keine natürlichen Vorkommen davon auf dem Mond gibt, um den Aushärtungsprozess zu ermöglichen. Die Anforderungen an die Konstruktion sind sehr groß, da ungewohnte physikalische und äußere Einflüsse auftreten können. Beispielsweise hat der Mond lediglich 1/6 der Gravitation als auf der Erde herrscht, Temperaturen bis 200° Celsius und Meteoriten mit einer Geschwindigkeit von 18km/s. Es sollte deshalb ein idealer Ort für die Fertigung der Mondkolonie gefunden werden. Die Kombination von Primärstruktur, Abdichtungs- und Druckausgleichsebene spielen bei der Realisierung eine wichtige Rolle. Die äußere Tragstruktur soll aus möglichst leichten, jedoch hoch tragfähigen Wandsystemen bestehen. Eine wirtschaftliche Technologie stellt die Annäherungen an Schaumeinlagerungen oder Luftkammern dar, die von Enrico Dinis 3D Drucker aus Mondstaub gefertigt werden können.

Diese Technik ist der erste Schritt in eine richtige Richtung, wobei es noch an einigen Forschungsjahren bedarf, bis ein solcher 3D Drucker auf den Mond geschickt werden kann, um ein Besiedeln zu ermöglichen.⁶⁵



Bild 92. Integration der Space Station in die Kontur des Mondes



Bild 93.

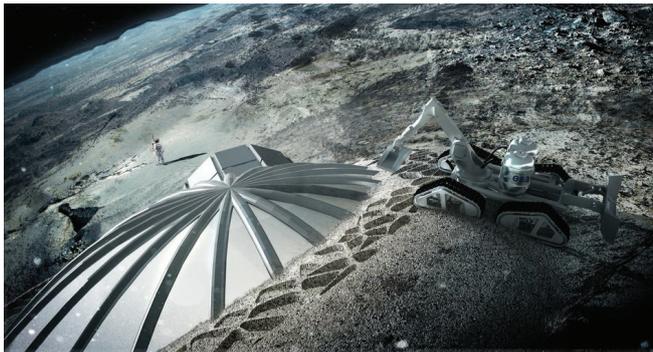


Bild 94. links,

Bild 95. rechts, Herstellung der Tragstruktur auf der Basis von D-Shape.

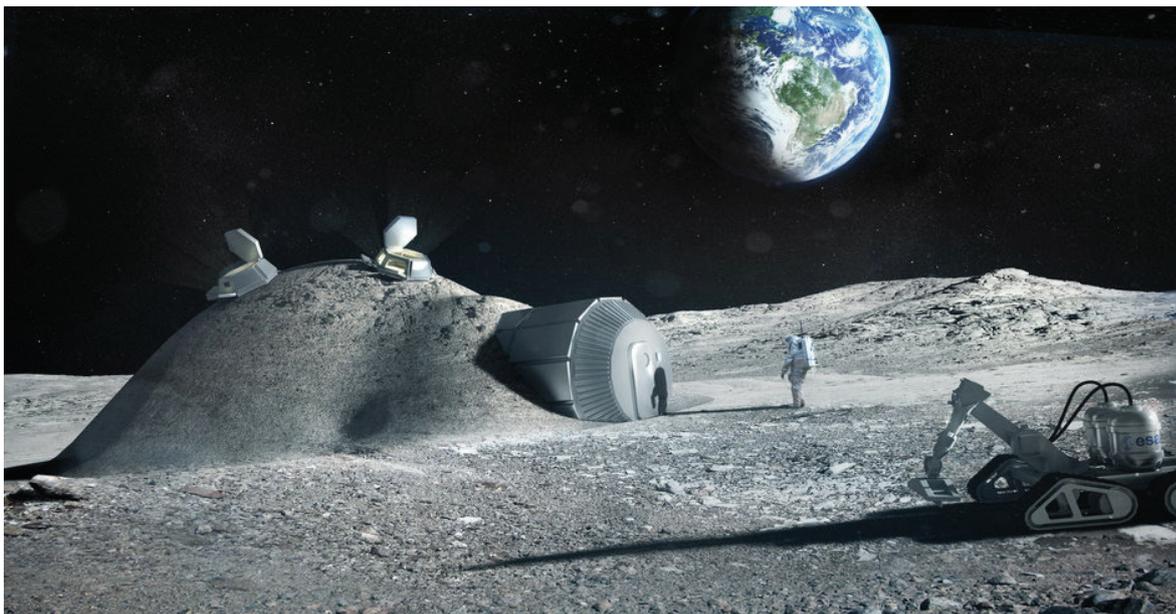


Bild 96.

ERKENNTNIS: 3D Druck

Wie im Kapitel *3D Druck* ersichtlich, bestand diese Technologie aus vier Anwendungsbereichen, wobei nur zwei davon für den Beton 3D Druck in Frage kamen.

Bei dem einen möglichen Verfahren handelte es sich um das Auftragen von extrudierten Strängen in Schichten und bei der anderen Technik wird das Primärelement (meist Pulver oder Harze) in konstanter Höhe abgezogen und durch punktuelles Setzen eines Bindemittels oder Lasers ausgehärtet. Diese zwei Herstellungsverfahren wurden bereits für den Beton 3D Druck adaptiert und angewendet.

Nach reichlicher Analyse fiel die Entscheidung auf die oben genannte Variante für das Auftragen von extrudierten Strängen in Schichten, da diese Methode mit der vorhandenen Technologie am Institut für Tragwerksentwurf und mit meinem Wissen die besten Möglichkeiten einer Realisierung bot. Zusätzlich konnten mit diesem Verfahren die größten Genauigkeiten in der Fertigung und optimale Resultate erzielt werden.

Eine wichtige Erkenntnis lieferten die unterschiedlichen Maßstäblichkeiten im Bereich des Düsenaustritts. Die Oberfläche und die Ungenauigkeiten waren umso schlechter, je größer die Düsenöffnung war. Diese Gegebenheit erläutert folgendes Beispiel intensiver.

Beispiel:

Beim konventionellen 3D Druck mit Kunststoffen wurde das Ausgangsprodukt erhitzt, extrudiert und aufgetragen. Es entstand eine Genauigkeit von 0,05mm bei einer Düsenöffnung von 0,35mm und ermöglichte somit eine nahezu makellose Oberfläche und Festigkeit. Skalierte man dieses Prinzip um das Hundertfache für den Maßstab des Beton 3D Drucks, so ergab sich eine Düsenöffnung von 35mm. Die resultierende Genauigkeit verschob sich auf 5mm, weshalb die Fehler an der Oberfläche mit freiem Auge erkennbar wären.

Daraus ergab sich für mich die Notwendigkeit eines innovativen Düsen- und Drucksystems, welches den Transport von größeren Betonmassen ermöglichte und trotzdem eine gewünschte Maßgenauigkeit erfüllte.

In dem vorherigen Kapitel wurden zwar einige Projekte genannt, die sich an den oben erwähnten Technologien bedienen, jedoch konnten keine Informationen über das Drucksystem, Düsentechnologie und Materialeigenschaften recherchiert werden.

Aus diesem Grund ging meine Arbeit über das theoretische Thema hinaus und orientierte sich an einer praxisnahen Entwicklung, um eine optimale Beton 3D Druck Technik zu generieren.

3. PRAKTISCHE UMSETZUNG VON COEBRO | BETON 3D DRUCKEN

3.1. PLANUNG DER DRUCKTECHNOLOGIE

- ZIELESETZUNG UND UMFANG DER TECHNOLOGIE
- 3D DRUCK - MASSSTABS - QUALITÄTS - DIAGRAMM
- AUSEINANDERSETZUNG MIT SPRITZBETON
- BETONCHEMIE
- SPRITZBETONVERSUCHE IM VERSUCHSSTOLLEN HAGERBACH (CH)
- PROJEKTPARTNERSCHAFT MIT DER SIKA AG SCHWEIZ
- ZEITPLAN
- MINISHOT - DRUCKTECHNOLOGIE

3.2. PLANUNG DER AUTOMATISIERUNGSEINHEIT

DEFINITION

- PLANUNG DER VERSUCHSABLÄUFE UND PROTOTYPEN
 - ENTWURF UND AUFBEREITUNG DER CAD-DATEN FÜR VERSUCHSBLOCK I IM ROBOTER DESIGN LABOR (ITE)
 - ENTWURF UND AUFBEREITUNG DER CAD-DATEN FÜR VERSUCHSBLOCK II IM ABB ROBOTER LABOR (ITE)
- ROBOTERSTEUERUNG
 - MITTELS FRÄSBAHNEN
 - MITTELS PROGRAMMIERUNG IN ECHTZEIT

3.3. VERSUCHSABLAUF_KONSTRUKTION DER PROZESSKETTE

ÜBERBLICK

- DIGITALE PROZESSKETTE - GEOMETRIEAUFBEREITUNG
- ROBOTERSTEUERUNG
- BETONAUFBEREITUNG
- MATERIALFÖRDERUNG | DÜSENTECHNOLOGIE
- ROBOTER
- DRUCKVERSUCHE

3.4. BETON 3D DRUCKEN | HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN

- VERSUCHSBLOCK I (ROBOTER DESIGN LABOR)
 - VERSUCHSREIHE I: ABFAHREN VON GERADEN UND RADIEN
 - VERSUCHSREIHE II: SCHICHTEN VON BAHNEN
 - VERSUCHSREIHE III: ABFAHREN VON RADIEN UND SCHICHTEN
 - VERSUCHSREIHE IV: DRUCKEN DES SIKA SCHRIFTZUGES
- MATERIALVERSUCHE
- VERSUCHSBLOCK II (ABB ROBOTER LABOR)
 - BETONKNOTEN
 - DRUCKEN AUF GEKRÜMMTE FLÄCHEN
 - SIKA SCHRIFTZUG

DAS 3. KAPITEL SPIEGELT DEN ABLAUF UND DEN STETIGEN PLANUNGSFORTSCHRITT DES GESAMTEN PROJEKTES WIDER.

3.1. PLANUNG DER DRUCKTECHNOLOGIE

- **ZIELESETZUNG UND UMFANG DER TECHNOLOGIE**
- **3D DRUCK - MASSSTABS - QUALITÄTS - DIAGRAMM**
- **AUSEINANDERSETZUNG MIT SPRITZBETON**
- **BETONCHEMIE**
- **SPRITZBETONVERSUCHE IM VERSUCHSSTOLLEN
HAGERBACH (CH)**
- **PROJEKTPARTNERSCHAFT MIT DER SIKA AG
SCHWEIZ**
- **ZEITPLAN**
- **MINISHOT - DRUCKTECHNOLOGIE**

***Das Ziel** dieser Arbeit war die Planung und die Umsetzung eines robotergesteuerten Förder- und Dosiersystems für die Herstellung von variablen Betonbauteilen. Dieses Verfahren konnte nur durch intensive Recherche und Auseinandersetzung im Bereich der automatisierten Fabrikation, durch Planung von Prozessketten und durch den Entwurf von Versuchsreihen und Prototypen, umgesetzt werden.*

Für die Realisierung war ein experimentelles Herantasten an automatisierte Maschinen und deren Bedienung notwendig. Dazu zählte die Beschäftigung mit der Technik des 3D Drucks - eine Kombination aus einem Drucksystem und einer Automatisierungseinheit - und die Zusammensetzung des Baustoffs Beton, bezüglich seiner Eigenschaften und seiner Chemie.

Um die erzielten Erkenntnisse anzuwenden und auszutesten wurden mehrere Entwürfe gestaltet, die sich in einem bestimmten Maßstab bewegten. Die aktive Beschäftigung mit der Maßstäblichkeit ergab die Ausarbeitung von großen Elementen im Bereich des Bauwesens, da die Konstruktion von kleinen Geometrien aus dem verwendeten Baustoff Beton keine Anwendung finden würde. Somit kristallisierte sich aus mehreren Entwürfen der konstruierte Betonknoten heraus, der als Zwischenstück für kraftableitende Stützen im Bauwesen dienen könnte.

Einen großen Anteil an der Arbeit machten die praktischen Versuche aus, die durch die Abstimmung des Druckmaterials (Beton), des Drucksystems (MiniShot Maschine) und der Automatisierungseinheit (Roboter) verwirklicht werden konnten und Prototypen entstehen ließen. Diese Experimente veranschaulichten die Erkenntnisse und Problematiken des Beton 3D Drucks.

IN ABHÄNGIGKEIT DES PROJEKTZIELES ENTSTANDEN FOLGENDE KERNTHEMEN:

- ROBOTERGESTEUERTES AUFTRAGEN DES DRUCKMATERIALS IN SCHICHTEN (ANNÄHERUNG AN FUSED DEPOSITION MODELING)
- VOLLAUTOMATISCHER UND KONSTANTER TRANSPORT DES DRUCKMATERIALS
- DOSIERUNG UND AUFBEREITUNG DES DRUCKMATERIALS, UM DIE EIGENSCHAFTEN FÜR DEN TRANSPORT UND DIE FRÜHSTANDSFESTIGKEIT ERFÜLLEN ZU KÖNNEN
- HOHE DAUERHAFTIGKEIT; DEFINIERTE BETONQUALITÄT

DIE TECHNOLOGIE WURDE IN ZWEI BEREICHE GEGLIEDERT:

- DRUCKTECHNOLOGIE
- AUTOMATISIERUNGSEINHEIT

3D DRUCK - DIAGRAMM

Dieses eigens für die Masterarbeit erstellte Diagramm, beschäftigt sich mit der Maßstäblichkeit in Abhängigkeit von Qualität und Oberflächen im 3D Druck. Durch die Erkenntnisse aus dieser Abbildung und aus dem Bereich der Betoneigenschaften fiel die Entscheidung auf die dreidimensionalen Strukturelemente. Laut meiner Recherche handelte es sich dabei, um den idealen Maßstab für die Anwendung des Beton 3D Drucks.

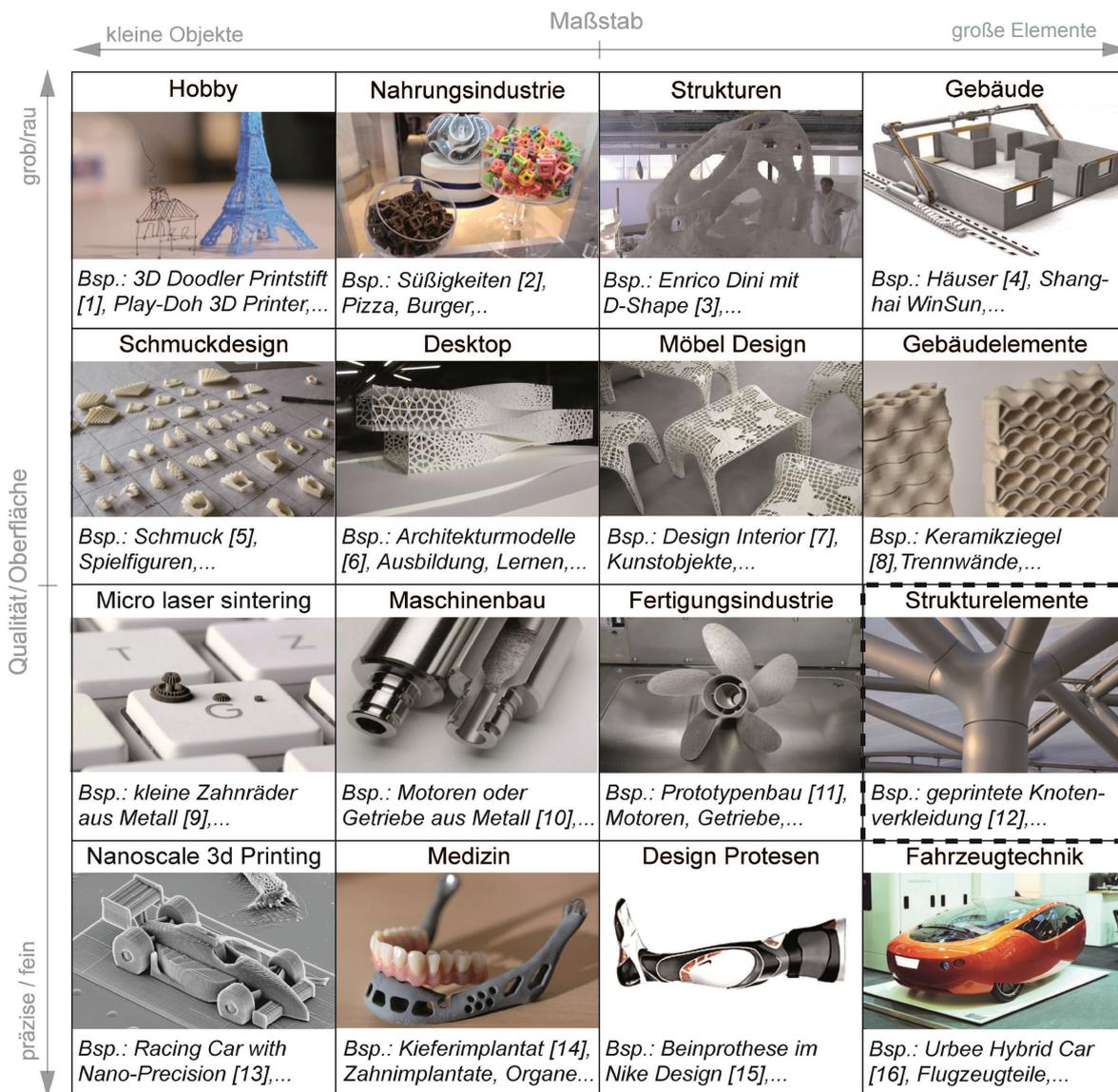


Bild 57. Darstellung von unterschiedlichen Maßstäben und Qualitäten der verschiedensten 3D Druckverfahren als Diagramm, Christian Pichlkastner, ITE

DRUCKTECHNOLOGIE

ERKENNTNIS:

Durch das Fehlen genauerer Informationen hinsichtlich der Drucktechnologie, war die Auseinandersetzung mit der Betonchemie von großem Wert. Zusätzlich empfahl Dr. Joachim Juhart vom Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie der TU Graz den Bereich des Spritzbetons einzubeziehen, da das Torkretierverfahren einer Herstellung mittels 3D Druckdüse wohl am ähnlichsten sei.

SPRITZBETON

Der Begriff *Spritzbeton* beschreibt drei Bereiche dieser Technologie:

- den Baustoff
- das Herstellungsverfahren
- die Bautechnik

Beim Herstellungsverfahren von Spritzbeton unterscheidet man zwischen folgenden Methoden:

- Dichtstromverfahren für Nassspritzbeton
- Dünnstromverfahren für Trockenspritzbeton
- Dünnstromverfahren für Nassspritzbeton⁶⁶

Der Ablauf dieses Verfahrens startete mit dem Anmischen der Ausgangsstoffe und dem Transportieren zur Spritzbetonmaschine. In dieser Maschine wurde das Material durch geschlossene und überdruckfeste Rohre zur Spritzdüse gefördert. Dort formte sich der Beton zu einem Strahl und wurde auf die gewünschte Stelle aufgespritzt. Das Aufspritzen geschah unter hohem Druck, was wiederum zum Verdichten des Materials führte.⁶⁷

Die Kernthemen der Spritzbetonrezeptur:

- hohe Frühstandsfestigkeit
- definierte Festbetoneigenschaften
- Verarbeitungszeit, lange Offenzeit
- Pumpfähigkeit
- Spritzbarkeit
- minimaler Rückprall

ERKENNTNIS:

- Das Material wurde bis zu einer Korngröße von 4mm als Spritzmörtel bezeichnet. Ab einer Korngröße von 4mm wurde der Ausdruck Spritzbeton verwendet.
- Ausschließlich die Verwendung von Dichtstrommaschinen war für den 3D Druck brauchbar. Dünnstrommaschinen bildeten keinen konstanten Förderstrom.
- Die Geschwindigkeiten dieser Herstellung waren zu hoch. Es durfte kein Rückprall entstehen.
- Um die Eigenschaften der Betonrezeptur beeinflussen zu können, mussten die Bestandteile und Einflussfaktoren ermittelt werden.

⁶⁶ vgl. Höfler/Schlumpf/
Jahn: Sika Spritzbeton
Handbuch, Sika Schweiz
AG, Zürich 2012. S. 7

⁶⁷ vgl. Höfler/Schlumpf/
Jahn: Sika Spritzbeton
Handbuch, Sika Schweiz
AG, Zürich 2012. S. 8ff

BETONCHEMIE

Beton ist ein Dreistoffgemisch aus Zement, Zuschlagstoffen und Wasser. Je nach Anwendung kann die Betonrezeptur durch spezielle Betonzusatzstoffe oder Betonzusatzmittel zu einem fünf Phasengemisch erweitert werden.⁶⁸

⁶⁸ vgl. Höfler/Schlumpf/
Jahn: Sika Spritzbeton
Handbuch, Sika Schweiz
AG,
Zürich 2012. S. 16

Eine kurze Auflistung der einzelnen Ausgangsstoffe:

Zement:

In der Rezeptur dient der Zement als *Leim*, welcher die Gesteinskörner miteinander verbindet. Man kann den Zement auch als hydraulisches Bindemittel sehen, das die mechanischen Eigenschaften des Betons beeinflusst. Die Auswahl des Zements entscheidet über die gewünschten Anforderungen des benötigten Festbetons. Für Spritzbeton muss der Baustoff einen sehr raschen Erstarrungsbeginn und eine hohe Frühstandsfestigkeit aufweisen. Das Verhalten in Kombination mit Abbindebeschleunigern oder anderen Zusatzstoffen ist für den Spritzbeton entscheidend. Der Zementanteil in der Rezeptur beträgt zwischen 300 - 450kg/m³.⁶⁹

⁶⁹ vgl. Höfler/Schlumpf/
Jahn: Sika Spritzbeton
Handbuch, Sika Schweiz
AG,
Zürich 2012. S. 16

Zuschlagstoffe: Gesteinskörnung

Das Gestein bildet das Tragwerk und das Volumen der Betonmatrix. Es besteht aus circa 75% Sand und Kies. Die Verarbeitungs- und Festbetoneigenschaften sind stark von der geologischen Mixtur der Zuschläge abhängig. Die Zuschläge haben die folgende Funktionen zu erfüllen:

- dienen der Gleichmäßigkeit in der Betonmischung
- sind verantwortlich für den Wasserbedarf
- wirken als wirtschaftlicher Füllstoff in der Betonmatrix
- haben Einfluss auf Biegezug- und Druckfestigkeit (mechanische Eigenschaften)
- beeinflussen die Verarbeitung der Betonmischung
- spielen eine große Rolle für die zu erreichende Dauerhaftigkeit⁷⁰

⁷⁰ vgl. Höfler/Schlumpf/
Jahn: Sika Spritzbeton
Handbuch, Sika Schweiz
AG,
Zürich 2012. S. 18ff

ERKENNTNIS:

Die Wahl und der Anteil der Gesteinskörnung bestimmen das Verhalten und die Eigenschaften des Spritzbetons. Die Korngröße des Gesteins ist für das Pumpverhalten der Mischung ausschlaggebend. Die maximale Gesteinsgröße soll 1/3 des Rohrdurchmessers der Spritzbetoneinheit nicht übersteigen. Zusätzlich darf der definierte Feinanteilgehalt ($\leq 0,125\text{mm}$) nicht variieren, da bereits ein geringer Anteil von Weichteilen in der Mischung, die Frostbeständigkeits-eigenschaften beeinflussen würde. Das Zuschlagkorn darf beim konventionellen Betonieren eine Größe von maximal 16mm und beim Spritzbeton 8mm nicht überschreiten.⁷¹

⁷¹ vgl. Höfler/Schlumpf/
Jahn: Sika Spritzbeton
Handbuch, Sika Schweiz
AG,
Zürich 2012. S. 18ff

Zugabewasser/Wasser

Das Wasser wird entweder bei der Herstellung in Form von Zugabewasser oder durch die Eigenfeuchtigkeit des Gesteins beigemischt. Durch Wasser und Zusatzmittel kann die Konsistenz des Betons reguliert werden. Das Wasser benötigt keine speziellen Eigenschaften, es sollte jedoch keine Stoffe enthalten, die die Hydratation behindern oder beschleunigen würden, wie zum Beispiel Öle, Fette, Chloride, Sulfate, Zucker oder Salze. Leitungswasser ist immer für die Herstellung von Spritzbeton verwendbar. Bei klarem Wasser wie Moor-, Meer- und Abwasser sollte eine spezielle Untersuchung durchgeführt werden.⁷²

⁷² vgl. Höfler/Schlumpf/
Jahn: Sika Spritzbe-
ton Handbuch, Sika
Schweiz AG,
Zürich 2012. S. 20

Zusatzstoffe

Die Zusatzstoffe werden für die folgenden Anforderungen und Eigenschaften eingesetzt:

- zur Beimengung der Feinanteilmenge $\leq 0,125\text{mm}$ (Füllstoff)
- zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit
- zur Steigerung des Wasserrückhaltevermögens
- zur Kostenoptimierung und Einsparung des Zementanteils
- zur Beschleunigung der Frühstandsfestigkeit ⁷³

⁷³ vgl. Höfler/Schlumpf/
Jahn: Sika Spritzbe-
ton Handbuch, Sika
Schweiz AG,
Zürich 2012. S. 16ff

| EFFEKT | ZUSATZ | ANMERKUNG |
|--------------------|---------------------------------|--|
| Hydraulisch | Zement | Zementtyp und -menge beeinflussen die Verarbeitung und die Festigkeitsentwicklung |
| Latent hydraulisch | Hochofenschlacke (GGBS) | Verlangsamt die Festigkeitsentwicklung und erhöht die Dauerhaftigkeit |
| Puzzolanisch | Silikafume Flugasche (Typ V) | Verbessert die Dauerhaftigkeit, erhöht das Bindungsverhalten und damit die mechanischen Eigenschaften. Reduziert den pH-Wert im Wasser, darum nur in kleinen Mengen verwenden. |
| Inert | Steinmehl (Kalksteinmehl) | Hilft Partikelmatrix zu erhöhen. Festigkeit wird nicht verbessert. |

1. Tabelle: Höfler/Schlumpf/
Jahn: Sika Spritzbeton
Handbuch, Sika Schweiz
AG, Zürich 2012. S. 17

| CHARAKTERISTIK | ZEMENT | SILIKAFUME | FLUGASCHE | SCHLACKE | STEINMEHL |
|-------------------------------|--------|------------|-----------|----------|-----------|
| FRISCHBETON | | | | | |
| HANDLING | ++ | ++ | +++ | + | +++ |
| WASSERRÜCKHALTEKAPAZITÄT | ++ | +++ | + | + | ++ |
| FESTIGKEITSENTWICKLUNG | | | | | |
| FRÜHSTANDSFESTIGKEIT BIS 4H | +++ | + | - | - | +/- |
| FRÜHSTANDSFESTIGKEIT BIS 12H | ++ | ++ | - | - | +/- |
| ENDFESTIGKEIT | ++ | +++ | ++ | +++ | +/- |
| DAUERHAFTIGKEIT | | | | | |
| WASSEREINDRINGWIDERSTAND | ++ | +++ | ++ | ++ | + |
| SULFATWIDERSTAND | - | ++ | +/- | +++ | +/- |
| ASR WIDERSTAND | - | +/- | +/- | +++ | +/- |

2. Tabelle: Höfler/Schlumpf/
Jahn: Sika Spritzbeton
Handbuch, Sika Schweiz
AG,
Zürich 2012. S. 18

Zusatzmittel

Zusatzmittel werden zielgerecht eingesetzt, um die Betoneigenschaften zu verbessern und zu verändern. Sämtliche Zusatzmittel, mit Ausnahme des Erstarrungsbeschleunigers, der an der Spritzdüse zugeführt wird, werden schon beim Mischvorgang des Betons beigemischt.

Das Zusatzmittel wird in Prozentanteilen des Zements, über Gewichtsmessung (0,5 bis 7,0%) oder über das Volumen (2kg/m^3 bis 32kg/m^3) beigefügt.⁷⁴

⁷⁴ vgl. Höfler/Schlumpf/
Jahn: Sika Spritzbeton
Handbuch, Sika Schweiz
AG,
Zürich 2012. S. 21ff

| SPRITZBETON ZIELSPEZIFIKATION | KONTROLLPARAMETER | BETONZUSATZMITTEL |
|---|-----------------------|--|
| Druckfestigkeit Biegefestigkeit Dauerhaftigkeit | Betoneigenschaften | Fließmittel Zusatzstoffe Faser (Stahl, Kunststoff) |
| Pumpbarkeit Spritzbarkeit Spritzkonfiguration | Verarbeitbarkeit | Mischungsstabilisatoren Zusatzstoffe Fließmittel |
| Festigkeitsentwicklung | Abbinden und Erhärten | Spritzbetonbeschleuniger Fließmittel |
| Verarbeitungszeit | Offenzeit | Verzögerer |

³ Tabelle: Höfler/Schlumpf/
Jahn: Sika Spritzbeton
Handbuch, Sika Schweiz
AG,
Zürich 2012. S. 21

ERKENNTNIS:

- Das Beimengen von Zusatzstoffen und -mitteln war unumgänglich.
- Um Beton über eine ausreichend lange Zeit transportieren zu können, war ein Verzögerer notwendig.
- Die Pumpbarkeit, welche für den Transport durch die Leitungen verantwortlich war, sollte durch ein Fließmittel stabilisiert werden.
- Um dem Beton die nötige Eigensteifigkeit und Frühstandsfestigkeit zum Auftragen in Schichten zu ermöglichen, wurden ein hoher Zementanteil und ein Betonbeschleuniger benötigt.
- **Partner im Bereich Betonchemie und Spritzbetonmaschinen sollte in das Projekt eingebunden werden.**

Das Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie der TU Graz konnte den Kontakt zu ihrem Lieferanten (Firma Sika AG Schweiz) für Betonchemie herstellen. Darüber hinaus besaß die Sika AG ebenfalls Technologien im Spritzbetonbereich.

ERKENNTNIS:

- Die Firma Sika schlug einen kunststoffmodifizierten, werkgemischten Mörtel vor, welcher die Frühstandsfestigkeit positiv beeinflussen sollte.
- Nach Bedarf sollte an der Düse ein zusätzlicher Beschleuniger, wie in der Spritzbetontechnologie, beigemischt werden.

Ein Maschinentechologe des Unternehmens Sika, Herr Friedrich Egger, wurde zu Rate gezogen. Um das Thema der Arbeit veranschaulichen und die Anforderungen an die Technologie diskutieren zu können, wurde ein Datenblatt verfasst. (Datenblatt siehe Anhang)

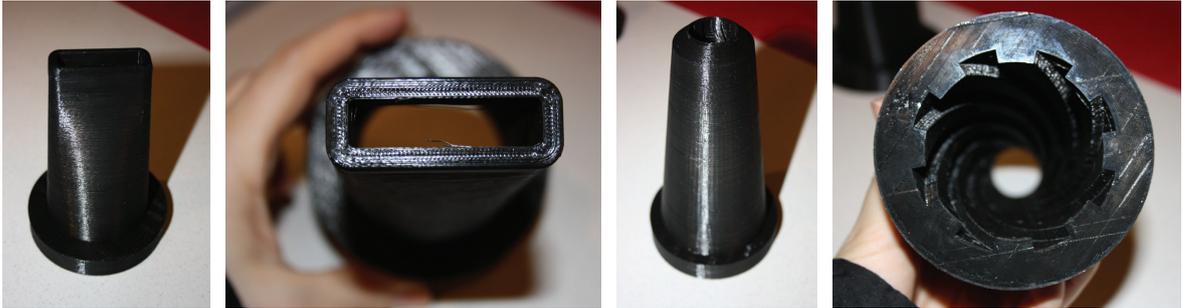
ERKENNTNIS:

- Eine Adaptierung von herkömmlichen Spritzbetonmaschinen war laut Aussagen des Maschinentechnologen nicht möglich.

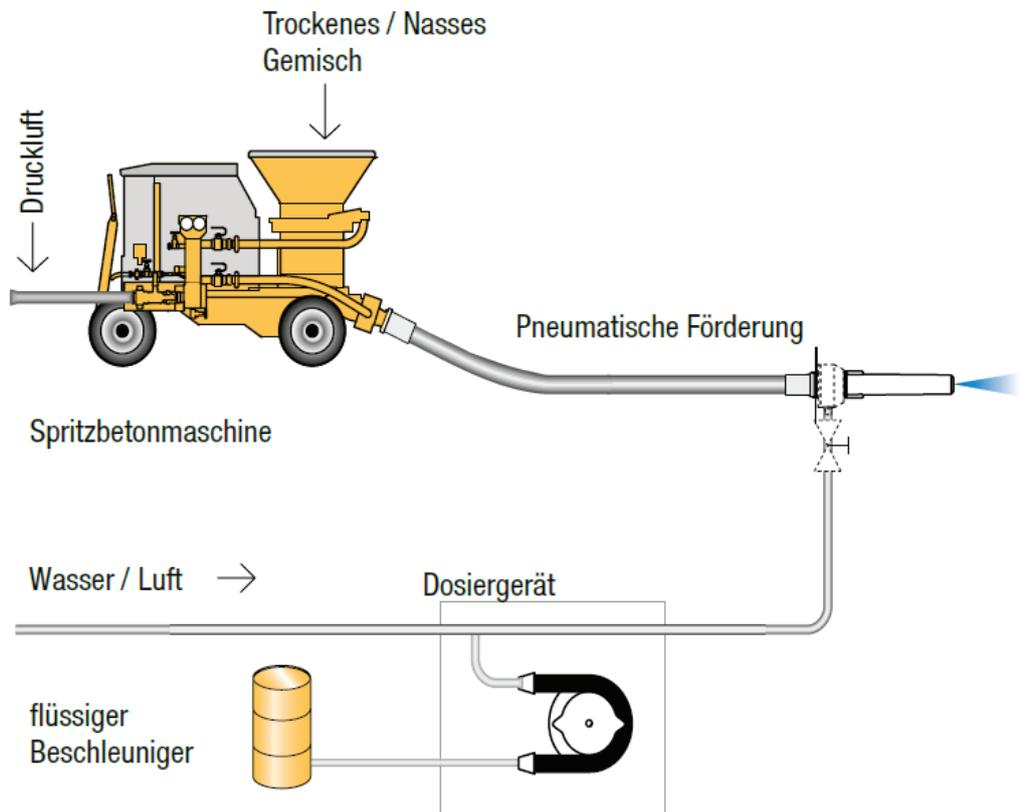
Der Prozess und die Handhabung von industriell verwendeten Spritzbetonmaschinen konnte im Versuchsstollen in Hagerbach (CH), getestet werden.

Für den Probeversuch wurden im Vorhinein zwei Spritzbetondüsen entworfen und im 3D Drucker hergestellt. Diese sollten Informationen über das Verhalten des Betons aufgrund ihrer unterschiedlichen Austrittsöffnungen liefern.

Bilder 97 - 100. Düsen-
aufsätze für Spritzbeton-
versuche.



SPRITZBETONVERSUCHE IM VERSUCHSSTOLLEN HAGERBACH (CH)



Bilder 101. Dünnstrom-
verfahren für Nass- und
Trockenspritzbeton.



- DAS DOSIEREN, WIE AUCH DAS
MISCHEN DER BETONBESTANDTEILE

Bild 102. Auswahl an
Faserbewehrung im Ver-
suchsstollen Hagerbach.



Bild 103. Ein Betonverzögerer
wurde beim Mischprozess
beigemengt. Verlängert die
Offenzeit.



Bild 104. Konsistenz der Be-
tonmischung für Spritzbeton.

Bild 105. Beton wurde abgefüllt und zum Ort des Betonierens transportiert.

- TRANSPORT DES DRUCKMATERIALS UND BEFÜLLEN DER SPRITZBETONMASCHINE



Bild 106. Spritzbetonapplikation für Tunnelbau.



Bild 107. Der vorgemischte Beton wird zur Spritzbetonmaschine transportiert und in die Maschine gefüllt.





- DAS SPRITZEN MIT UNTERSCHIEDLI-
CHEN DÜSEN

Bild 108. Spritzbeton



Bild 109a und 109b.
Konsistenz einer Spritzbe-
ton Oberfläche.



Bild 110. links, Spritzbeton-
düse von der Sika AG.

Bild 111. rechts, Anwen-
dung der 3D gedruckten
Düse

Bild 112a. links, Aufspannung der 3D Durckdüse auf Spritzbetonapplikation.



Bild 112b. rechts, Verhalten der Düse während des Spritzens. Das Druckmaterial der 3D gedruckten Düse ist nicht dicht und das Wasser entweicht.



Bild 113. links, Die Düsenöffnung wurde zu klein ausgeführt.



Bild 114. rechts, Der Beton verstopft die Düse. Eingearbeitete Windungen in der Düse haben keinen positiven Effekt.



Bild 115. links und **Bild 116.** rechts, Durch die Verstopfung der Düse stieg der Druck im System an. Nach kurzer Verweildauer kam es zum Bruch des Materials.



ERKENNTNIS:

- Zement, Zuschlagstoffe und Fasern wurden vermengt und zur Spritzbetonmaschine gebracht. Durch Druckluft transportierte man das Material durch den Schlauch zur Spritzdüse. Direkt an der Düse wurde das Anmachwasser beigemengt und mit Druck auf die gewünschte Stelle gespritzt. Ein manuell einstellbares Ventil regulierte den Wasseranteil in der Mischung.
- Ein konstanter Förderstrom war möglich.
- Der Spritzdruck machte eine Verwendung für den 3D Druck unmöglich.
- Die benötigten Durchflussmengen entwickelten sich in Abhängigkeit der Düsenöffnungen und der Vorschubgeschwindigkeit des Roboters.
- Die geforderte Materialgeschwindigkeit sollte dem Austritt einer Zahnpasta aus der Tube entsprechen.

Weitere Inspirationen lieferten Druckgussmaschinen, die das Material mittels eines Extruders förderten. Dieser Extruder beinhaltete eine Schnecke, die sehr genau gesteuert und für niedrige Geschwindigkeiten reguliert werden konnte. Die Firma Sika unterstützte diese Variante, sah jedoch Schwächen in der Regulierung der Druckmenge. Bestehende Spritzbetonapplikationen mit Schneckenpumpen konnten lediglich zwischen 5 L/min und 14 L/min variieren und waren für Testversuche zu überdimensioniert.⁷⁵

⁷⁵ Interview mit Markus Jahn, geführt von Jürgen Holl, Graz, Mai 2014

ERKENNTNIS: - Zwischen Spritzbeton und dem Beton 3D Druck herrschte ein Maßstabsprung. Eine Adaption und ein Umbau der Spritzbetontechnologie für den 3D Druck war nicht möglich.
- Die Druckmenge musste in den Bau der Druckapplikation einbezogen werden.

Am 3. Februar 2014 wurde mein Projekt COEBRO der SIKA AG Schweiz, in Zürich vorgestellt. Man versuchte das Unternehmen als Partner für diese Diplomarbeit zu gewinnen. Eine Zusammenarbeit mit der Firma war sehr wichtig, da das bisherige Know-How zu begrenzt war und die Realisierung von Betonbauteilen mittels 3D Druck alleine nicht möglich gewesen wäre.

Nach zwei Monaten Bedenkzeit kam eine positive Rückmeldung der Firma, die das Projekt einen weiteren Schritt in die richtige Richtung lenkte.

Die Zusammenarbeit verlangte im Vorfeld eine detaillierte Dokumentation der Projektanforderungen und die Verteilung der Aufgaben.

Um dem logistischen Aufwand gerecht zu werden, wurden die zu leistenden Arbeitsaufträge anhand der Qualifikationen der Projektbeteiligten abgestimmt.

Projektpartnerschaft mit der Sika AG Schweiz

Verteilung der Arbeitsprozesse

Jürgen Holl, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz:

- Erarbeitung von Erkenntnissen aus der Recherche
- Definition Projektablauf, Anforderungen und Prozesskette
- Planung der Automatisierungseinheit
- Erstellung von Versuchsabläufen
- Aufbereitung von computergenerierten Daten
- Robotersteuerung
- Probeversuche

SIKA AG, Zürich, Schweiz:

- Adaption der Betoniereinheit in Abhängigkeit bestehender Kenntnisse im Bereich Betonförderung/Mischmaschinen.
- Bereitstellung dieser Betoniereinheit
- Forschung im Bereich Druckmaterial/Beton für 3D Druck
- Bereitstellung von Materialien
- Lieferung zum Roboterlabor des Institutes für Tragwerksentwurf, TU Graz

Definition Projektablauf, Anforderungen und Prozesskette

Noch bevor die Firma Sika mit der Planung im Bereich der Drucktechnologie beginnen konnte, mussten die erhobenen Unterpunkte klar definiert werden, um in Abhängigkeit von bereits ermittelten Erkenntnissen entwurfsbezogene Entscheidungen treffen zu können. Es wurden Projekt interne Rahmenbedingungen aufgestellt und daraus Lösungsansätze entwickelt. Ein Pflichtenheft entstand, welches exakt definierte Anforderungen an das System und das Druckmaterial beinhaltet. Dieses Pflichtenheft wird in den nachfolgenden Punkten erläutert.

Anforderungen an das System

- Vollautomatisch
- Konstante Förderung (Zuckerbäckermethode, ohne Pressluft)
- Output angepasst an die Applikationstechnik
 - hohe Auftragsgeschwindigkeit (0-100mm/s)
 - geringe Schichtstärken ($\leq 1\text{cm}$)
- Formgebung während oder nach dem Applikationsprozess
- Verdichtung während oder nach dem Applikationsprozess
- Maßgenauigkeit ist abhängig vom Applikationsprozess und dem Mix-Design
- Verlustfreie Applikation
- Stop & Go- fähig
- Versuchsobjekt: Dimension 40 x 40cm

Anforderungen an das Druckmaterial

- Gute Applizierbarkeit (konstant) bei systembedingten Düsenöffnungen
- Maximales Größtkorn $\leq 2\text{mm}$, um die Massgenauigkeit zu erhöhen
- Hohe Grundstandfestigkeit für ein schalungsfreies Betonieren
- Hohe Klebewirkung für auskragende Bauteile
- Druckfestigkeiten an Mörtel: C100-130
- Sika entwirft das Mix Design mit und ohne Fasern
- Druckfestigkeitsentwicklung angepasst an die Applikationstechnik und -geschwindigkeit
- Offenzeit angepasst an die Applikationstechnik und -geschwindigkeit (die Verarbeitbarkeit ist zu gewährleisten; kalte Fugen sind zu vermeiden)
- Hohe Dauerhaftigkeit (Rissreduktion)
- Hohe Formstabilität (Kriechen)

Düsenöffnungen und Durchflussmengen

Kreisförmige Düsenöffnung

| Düse | Durchmesser (mm) | PI | Querschnitt (mm ²) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | Vorschubgeschwindigkeit (mm/sek) |
|------|------------------|------|--------------------------------|------|------|------|-------|-------|----------------------------------|
| 1 | 8 | 3,14 | 50 | 503 | 1005 | 1508 | 2011 | 2513 | mm ³ /s |
| 2 | 15 | 3,14 | 177 | 1767 | 3534 | 5301 | 7069 | 8836 | mm ³ /s |
| 3 | 20 | 3,14 | 314 | 3142 | 6283 | 9425 | 12566 | 15708 | mm ³ /s |

Rechteckige Düsenöffnung

| Düse | Länge (mm) | Breite (mm) | Querschnitt (mm ²) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | Durchflussmenge/Sekunde |
|------|------------|-------------|--------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------------------------|
| 4 | 24 | 8 | 192 | 1920 | 3840 | 5760 | 7680 | 9600 | mm ³ /s |
| 5 | 40 | 8 | 320 | 3200 | 6400 | 9600 | 12800 | 16000 | mm ³ /s |

Minimale Durchflussmenge = 2,5cm³/sek

Maximale Durchflussmenge = 16cm³/sek

4. Tabelle: Jürgen Holl, Graz,
8. Mai 2014

Skizzen Prozesskette

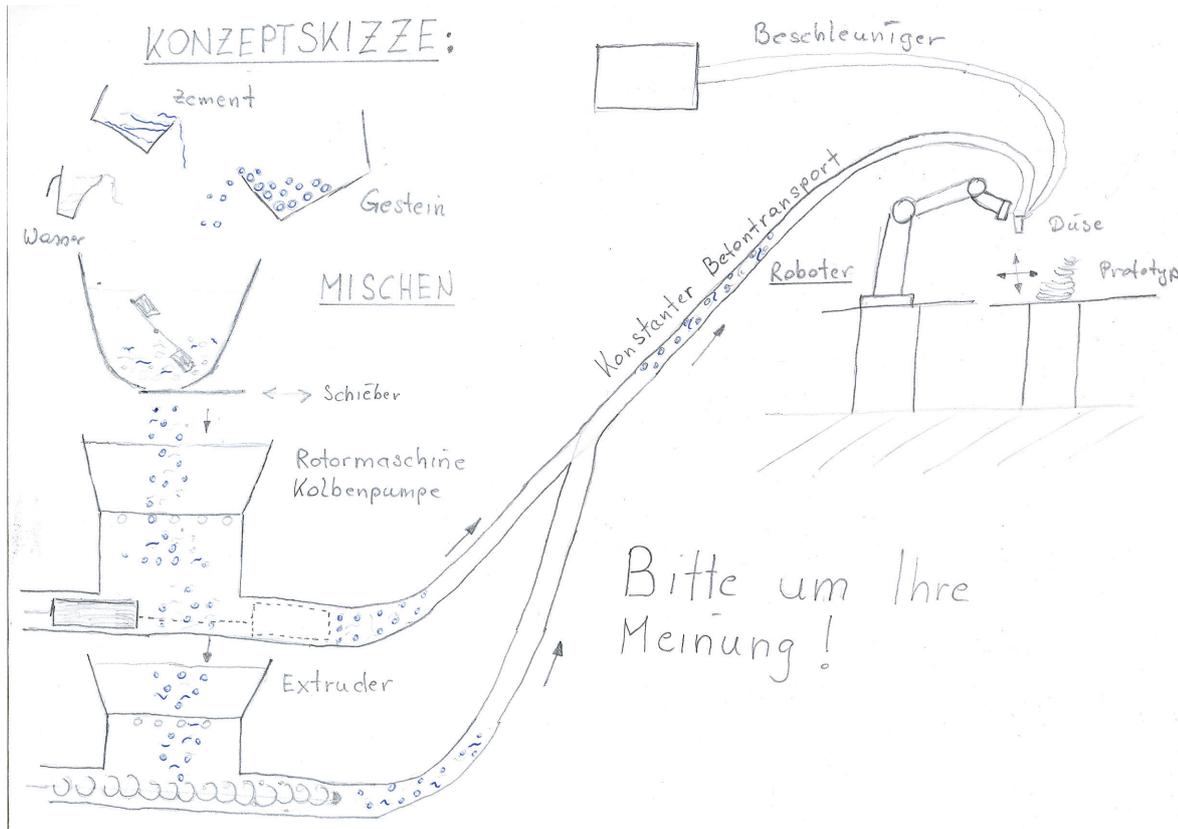


Bild 117. Die Konzeptskizze zeigt einen schematischen Ablauf und Aufbau der benötigten Prozesskette für das 3D Drucken von Beton.

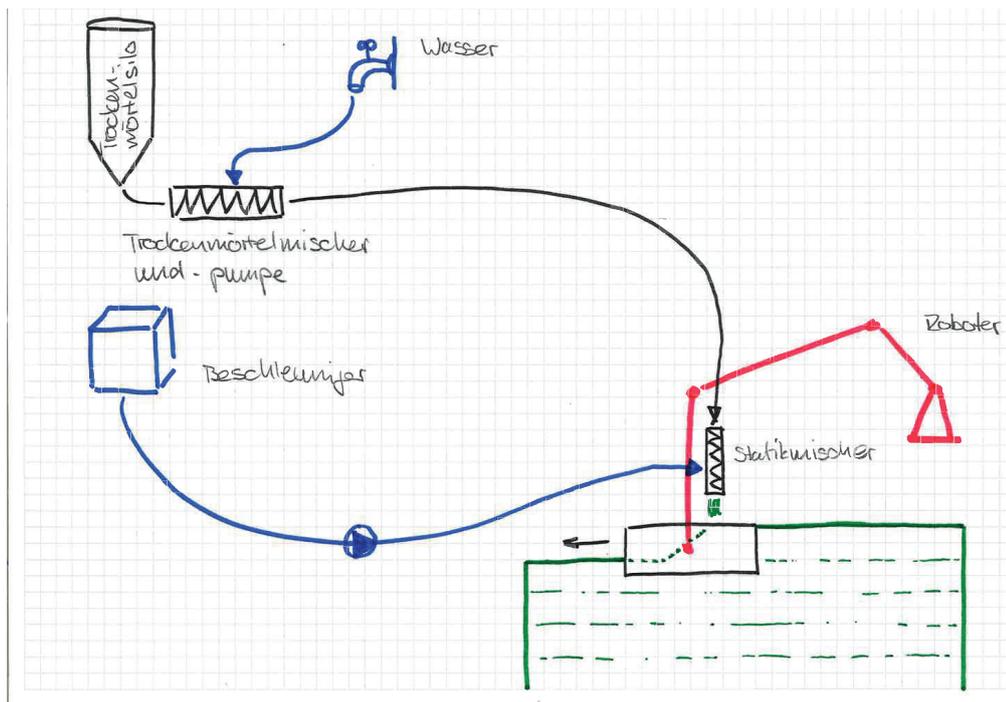


Bild 118. weiterer Entwurf der Prozesskette von Markus Jahn, Sika AG.

5.Tabelle: Zeitplan der beiden
Projektpartner für den
Ablauf des Projektes.

Zeitplan: Masterarbeit Jürgen Holl



| | | Sika | Jürgen Holl / Institut für Tragwerksentwurf / TU Graz |
|------------|--------|--|--|
| Mai | Wochen | Aufgabenstellung | Aufgabenstellung |
| Mittwoch | 30 | | |
| Donnerstag | 1 | Pflichtenheft Forschung Druckmaterial Forschung Drucksystem | Versuchsprogramme definieren Fixierung Düsen-Typen Detailpläne Düsen Prototyp/Versuchskörper - Fixierung Schichtstärkenermittlung (H/B) Pläne Adapterplatte Roboterarm für Befestigung |
| Freitag | 2 | | |
| Samstag | 3 | | |
| Sonntag | 4 | | |
| Montag | 5 | | |
| Dienstag | 6 | | |
| Mittwoch | 7 | | |
| Donnerstag | 8 | Forschung Druckmaterial Forschung Drucksystem Fertigung Druckdüsen | Versuchsprogramme definieren Dokumentation 3D Modell Grasshopper |
| Freitag | 9 | | |
| Samstag | 10 | | |
| Sonntag | 11 | | |
| Montag | 12 | | |
| Dienstag | 13 | | |
| Mittwoch | 14 | | |
| Donnerstag | 15 | Forschung Druckmaterial Abstimmung Materialaufbereitung Forschung Drucksystem Fertigung Drucksystem Adapterplatte Roboterarm Fertigung Druckdüsen | Versuchsprogramme definieren Dokumentation Begleitende Beratertätigkeit 3D Modell Grasshopper Robotercode Adaption Roboterlabor für Printversuche |
| Freitag | 16 | | |
| Samstag | 17 | | |
| Sonntag | 18 | | |
| Montag | 19 | | |
| Dienstag | 20 | | |
| Mittwoch | 21 | | |
| Donnerstag | 22 | Gemeinsamer Funktionstest (Sika & Jürgen Holl) des Drucksystems bei Sika Zürich | |
| Freitag | 23 | Forschung Druckmaterial Abstimmung Materialaufbereitung Forschung Drucksystem Fertigung Drucksystem Ausgabe Pläne des Drucksystems für TU Graz | Dokumentation Begleitende Beratertätigkeit 3D Modell Grasshopper Robotercode Adaption Roboterlabor für Printversuche |
| Samstag | 24 | | |
| Sonntag | 25 | | |
| Montag | 26 | | |
| Dienstag | 27 | | |
| Mittwoch | 28 | | |
| Donnerstag | 29 | | |
| Freitag | 30 | Forschung Druckmaterial | Dokumentation Begleitende Beratertätigkeit Robotercode |
| Samstag | 31 | | |
| Sonntag | 1 | | |
| Montag | 2 | | |
| Dienstag | 3 | | |
| Mittwoch | 4 | | |
| Donnerstag | 5 | | |
| Freitag | 6 | Lieferung Drucksystem & Druckmaterial zur TU Graz | |
| Samstag | 7 | Funktionstest TU Graz (Maschinentechniker Sika und Team Roboterlabor TU Graz) | |
| Sonntag | 8 | Kick off Meeting TU GRAZ | Kick-off-Meeting TU GRAZ |
| Montag | 9 | | |
| Dienstag | 10 | | |
| Mittwoch | 11 | | |
| Donnerstag | 12 | | |
| Freitag | 13 | | |
| Samstag | 14 | | |
| Sonntag | 15 | Bereitstellung Druckmaterial | 1. PRINTEN ROBOTER-LABOR TU GRAZ DOKUMENTATION ERGEBNISSE |
| Montag | 16 | | |
| Dienstag | 17 | | |
| Mittwoch | 18 | | |
| Donnerstag | 19 | | |
| Freitag | 20 | | |
| Samstag | 21 | | |
| Sonntag | 22 | Bereitstellung Druckmaterial Begleitende Beratertätigkeit | 1. PRINTEN ROBOTER-LABOR TU GRAZ DOKUMENTATION ERGEBNISSE Tastversuche Drucksystem TU Graz (Manuell) Robotercode (Abstimmung) |
| Montag | 23 | | |
| Dienstag | 24 | | |
| Mittwoch | 25 | | |
| Donnerstag | 26 | | |
| Freitag | 27 | | |
| Samstag | 28 | | |
| Sonntag | 29 | Begleitende Beratertätigkeit | 1. PRINTEN ROBOTER-LABOR TU GRAZ ZWISCHENBERICHT PRINT-ERGEBNISSE FÜR SIKA |
| Montag | 30 | | |

| | | Sika | Jürgen Holl / Institut für Tragwerksentwurf / TU Graz |
|------------|--------|--|---|
| Juli | Wochen | Aufgabenstellung | Aufgabenstellung |
| Dienstag | 1 | | |
| Mittwoch | 2 | Begleitende Beratertätigkeit | |
| Donnerstag | 3 | | |
| Freitag | 4 | | |
| Samstag | 5 | Nach Bedarf Anpassung/Neufertigung Druckdüse | Dokumentation |
| Sonntag | 6 | Nach Bedarf Optimierung Drucksystem | Optimierung |
| Montag | 7 | Nach Bedarf Optimierung Materialgemisch (Fasern) | |
| Dienstag | 8 | | |
| Mittwoch | 9 | | |
| Donnerstag | 10 | | |
| Freitag | 11 | Nach Bedarf Anpassung/Neufertigung Druckdüse | |
| Samstag | 12 | Nach Bedarf Optimierung Drucksystem | Dokumentation |
| Sonntag | 13 | Nach Bedarf Optimierung Materialgemisch (Fasern) | Optimierung |
| Montag | 14 | LIEFERUNG NEU ERGEBNISS TU GRAZ | |
| Dienstag | 15 | | |
| Mittwoch | 16 | | |
| Donnerstag | 17 | | |
| Freitag | 18 | | 2. PRINTEN ROBOTER-LABOR TU GRAZ |
| Samstag | 19 | Begleitende Beratertätigkeit | PROTOTYP |
| Sonntag | 20 | | Robotercode (Abstimmung) |
| Montag | 21 | | Dokumentation |
| Dienstag | 22 | | |
| Mittwoch | 23 | | |
| Donnerstag | 24 | | 2. PRINTEN ROBOTER-LABOR TU GRAZ |
| Freitag | 25 | | PROTOTYP |
| Samstag | 26 | Begleitende Beratertätigkeit | Robotercode (Abstimmung) |
| Sonntag | 27 | | Dokumentation Ergebnisse |
| Montag | 28 | | |
| Dienstag | 29 | | |
| Mittwoch | 30 | | |
| Donnerstag | 31 | | |
| Freitag | 1 | Begleitende Beratertätigkeit | Dokumentation Ergebnisse |
| Samstag | 2 | | |
| Sonntag | 3 | | |
| Montag | 4 | | |
| Dienstag | 5 | | |
| Mittwoch | 6 | | |
| Donnerstag | 7 | | |
| Freitag | 8 | Begleitende Beratertätigkeit | Dokumentation Ergebnisse |
| Samstag | 9 | Zwischenbericht-Meeting | Zwischenbericht-Meeting |
| Sonntag | 10 | | |
| Montag | 11 | | |
| Dienstag | 12 | | |
| Mittwoch | 13 | | |
| Donnerstag | 14 | | |
| Freitag | 15 | Begleitende Beratertätigkeit | Dokumentation Ergebnisse |
| Samstag | 16 | | |
| Sonntag | 17 | | |
| Montag | 18 | | |
| Dienstag | 19 | | |
| Mittwoch | 20 | | |
| Donnerstag | 21 | | |
| Freitag | 22 | | |
| Samstag | 23 | Begleitende Beratertätigkeit | Dokumentation / Diplomarbeit verfassen |
| Sonntag | 24 | | |
| Montag | 25 | | |
| Dienstag | 26 | | |
| Mittwoch | 27 | | |
| Donnerstag | 28 | | |
| Freitag | 29 | Begleitende Beratertätigkeit | Dokumentation / Diplomarbeit verfassen |
| Samstag | 30 | | |
| Sonntag | 31 | | |

5.Tabelle: Zeitplan der beiden
Projektpartner für den
Ablauf des Projektes.

5. Tabelle: Zeitplan der beiden
Projektpartner für den
Ablauf des Projektes.

| | | Sika | Jürgen Holl / Institut für Tragwerksentwurf / TU Graz |
|-----------------|----------|----------------------------|---|
| September | Wochen | Aufgabenstellung | Aufgabenstellung |
| Montag | 1 | Woche | Dokumentation / Diplomarbeit verfassen |
| Dienstag | 2 | | |
| Mittwoch | 3 | | |
| Donnerstag | 4 | 19. Woche | Begleitende Beratertätigkeit |
| Freitag | 5 | | |
| Samstag | 6 | | |
| Sonntag | 7 | | |
| Montag | 8 | 20. Woche | Dokumentation / Diplomarbeit verfassen |
| Dienstag | 9 | | |
| Mittwoch | 10 | | |
| Donnerstag | 11 | | |
| Freitag | 12 | | |
| Samstag | 13 | | |
| Sonntag | 14 | | |
| Montag | 15 | 21. Woche | Begleitende Beratertätigkeit |
| Dienstag | 16 | | |
| Mittwoch | 17 | | |
| Donnerstag | 18 | | |
| Freitag | 19 | | |
| Samstag | 20 | | |
| Sonntag | 21 | | |
| Montag | 22 | 22. Woche | Begleitende Beratertätigkeit |
| Dienstag | 23 | | |
| Mittwoch | 24 | | |
| Donnerstag | 25 | | |
| Freitag | 26 | | |
| Samstag | 27 | | |
| Sonntag | 28 | | |
| Montag | 29 | 22. Woche | Reserve |
| Dienstag | 30 | | |
| Oktober | | | |
| Mittwoch | 1 | Diplomarbeit Abgabe | |

DIE ABGABE DER DIPLOMARBEIT WURDE AUF 20. OKTOBER VERSHOBBN.

Den nötigen Denkanstoß für die Weiterentwicklung brachte die Definition der Durchflussmengen. Die Firma Sika forschte an Druckgussmaschinen auch im kleineren Maßstab, um den Output zu minimieren und Druckmaterial zu sparen. Bei dieser Technologie wurden unterschiedliche Mörtelmischungen auf Sensoren gespritzt, welche bestimmte Ergebnisse über Druck- und Zugfestigkeiten des Konglomerats kalkulierten. Der Spritzdruck konnte über computergesteuerte Druckzylinder aufgebaut werden, welche die Mörtelmischung und Betonbeschleuniger durch Leitungen zur Spritzdüse beförderten. Durch diesen Prozess konnten nahezu dieselben Werte wie bei konventionellen Spritzbetonversuchen erzielt werden.⁷⁶

Diese Maschine nannte man **MINI-SHOT-SYSTEM**.

- ERKENNTNIS:**
- Das Fassungsvermögen des Zylinders war mit 2 Liter begrenzt.
 - Outputgeschwindigkeiten lagen zwischen 50 - 2000mL/min. Ideal für beginnende Tastversuche.
 - Slurry-Pumpe (Mörtelzylinder) und Beschleuniger-Pumpe konnten getrennt von einander mittels Computer gesteuert werden.
 - Dieses System war die geeignete Methode für das 3D Drucken.

⁷⁶ Interview mit Markus Jahn, geführt von Jürgen Holl, Graz, Mai 2014

Um die Mini-Shot als geeignete Drucktechnologie verwenden zu können, mussten an der Düse und am Mischprozess, zwischen Mörtel und Beschleuniger, Änderungen vorgenommen werden.

Ein Funktionstest wurde im Labor der Firma Sika in Zürich durchgeführt.

Aufbau des Mini-Shot-Systems:

Steuergerät



Bild 119. MiniShot Maschine im Labor der Sika AG in Zürich.

Edelstahl Fülltrichter

Slurry-Pumpe



Bild 120. links

3-Wegeventil

Druckschlauch Mörtel

Beschleuniger Pumpe

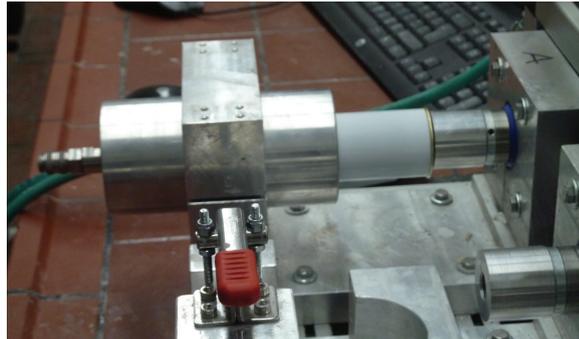


Bild 121. rechts

Bild 122. links

Bild 123. rechts

Beschleuniger Schlauch

Adapterflansch

Bild 124. links



Bild 125. rechts,
Der Adapterflansch ist
die Verbindung zwischen
Druckschlauch, Beschleuni-
gerschlauch und Druckdüse

Druckdüse

Statikmischer

Anschluss für Beschleunigerschlauch

Bild 126. links

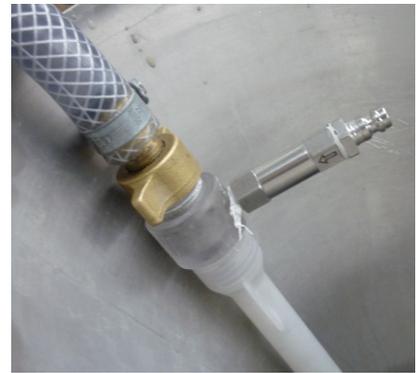


Bild 127. mitte, Der
Statikmischer dient der
Durchmischung des Mörtels
mit dem Beschleuniger

Bild 128. rechts

Im Zuge des Funktionstests wurden bereits **manuelle Druckversuche** durchgeführt.

Bild 129. links

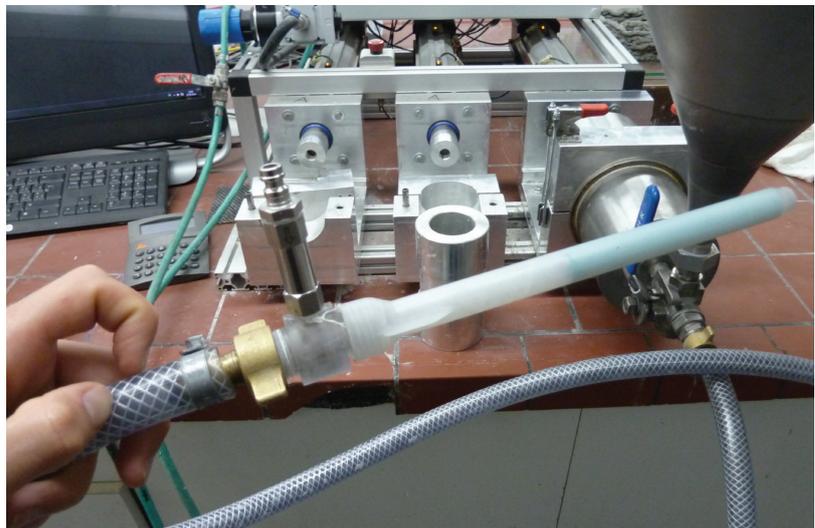


Bild 130. rechts



Bild 130. links



Bild 131. rechts



Bild 132. links, Schichtenweises Auftragen des Druckmaterials.



Bild 133. rechts



Bild 134. links, Durch Steigerung der Verfahrensgeschwindigkeit kann die Geometrie des Druckstranges verändert werden.



Bild 135. rechts, Konsistenz des Druckversuchs im erhärteten Zustand.

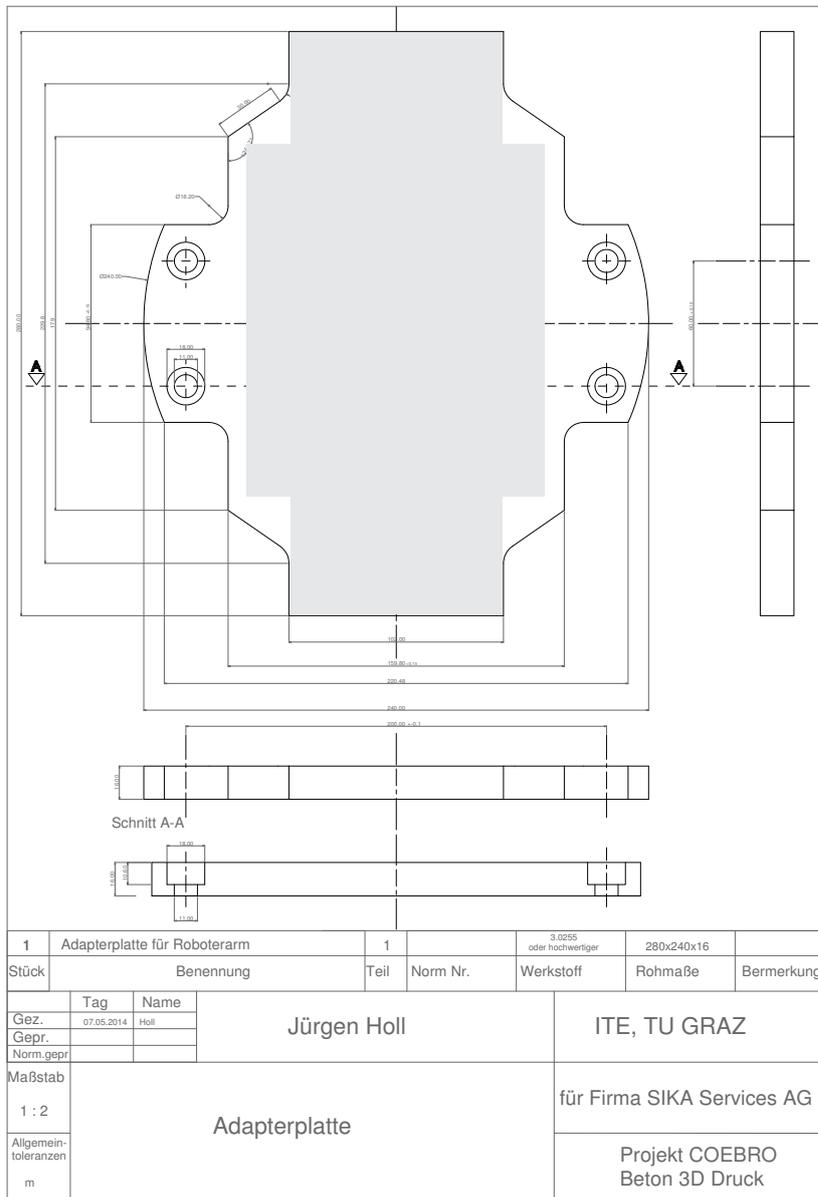
- ERKENNTNIS:**
- Druckmörtel wurde in einem externen Mixer vermengt und gemischt. Konsistenz des Mörtels konnte mit geschmolzener Schokolade verglichen werden. War nicht pumpbar.
 - Hohe Eigen- und Frühstandsfähigkeit. Aufbau in Schichten möglich. Definiertes Stapeln war für das Gleichgewicht des Drucks ausschlaggebend. Bei ungenauem Setzen der Schichten kam das Objekt zum Einsturz.
 - Druckgeschwindigkeiten mussten exakt mit Vorschubgeschwindigkeit des Roboters abgestimmt werden.
 - Zugabe von Beschleuniger geschah direkt an der Düse, um ein frühzeitiges Aushärten zu verhindern.
 - Adapterflansch wurde als T-Anschluss ausgebildet, um den Beschleuniger im Zentrum des Mörtels einzuspritzen.
 - Statikmischer vermengte Mörtel und Beschleuniger. Länge konnte variieren.
 - Öffnung der Düsengeometrie war für die Form des Stranges bestimmend.

- Die Druckdüse wurde in Abhängigkeit von der Robotersteuerung kreisförmig ausgeführt.
- Der Statikmsicher und die Druckdüse konnten aus dem Produktkatalog von Nordson EFD entnommen werden. Diese Produkte wurden für gewöhnlich im Zwei-Komponenten-Kleber-Bereich eingesetzt.

Die Planungen hinsichtlich der Drucktechnologie waren nahezu abgeschlossen. Die Maschine, wie auch das Druckmaterial waren definiert und das System konnte nach Graz geliefert werden. Die Befestigung am Roboterarm musste noch entwickelt und montiert werden.

In Graz wurde ein Plan für die Adapterplatte am Roboterarm erstellt und als Basis für die Befestigungspunkte definiert.

Plan 1. Adapterplatte



Befestigung der Druckeinheit auf dem Roboterarm:

In Abhängigkeit der Bohrungen auf der Adapterplatte, plante die Firma Sika eine Befestigung für die Druckdüse und den Druckschlauch. Dieser Anschluss wurde mit einem Kunststoff 3D Drucker gefertigt.

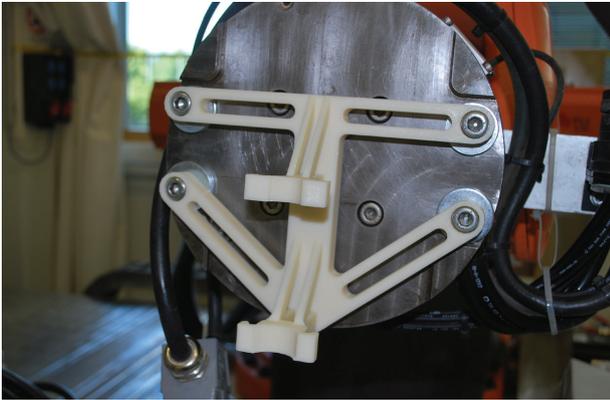


Bild 136. links Befestigung der Druckdüse am Roboterarm

Bild 137. rechts

Lieferung des Drucksystems und des Druckmaterials, sowie Funktionstest der Druckeinheit in Graz

Das Drucksystem wurde mittels Transportunternehmen nach Graz gebracht. Darüber hinaus stellte die Firma Sika zusätzlich drei Kollegen für den reibungslosen Aufbau und den Funktionstest der Druckeinheit im Roboter Design Labor (RDL) der TU Graz zur Verfügung. Der Funktionstest beinhaltete eine intensive Einführung in die Bedienung des Mini-Shot-Systems und in das Anmischen des Druckmaterials. Das RDL wurde bereits im Vorfeld für die Beton 3D Druckversuche umgerüstet.

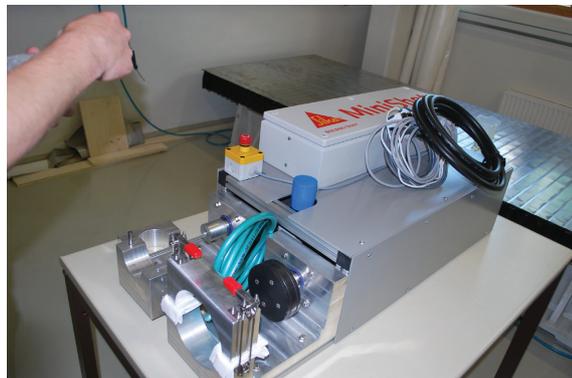


Bild 138. links, Aufbau der MiniShot im RDL.

Bild 139. rechts



Bild 141. links, Funktionstest der MiniShot im RDL.

Bild 142. rechts, Manuell gesteuerter Druckversuch

3. PRAKTISCHE UMSETZUNG VON COEBRO | BETON 3D DRUCKEN

3.1. PLANUNG DER DRUCKTECHNOLOGIE

- ZIELESETZUNG UND UMFANG DER TECHNOLOGIE
- 3D DRUCK - MASSSTABS - QUALITÄTS - DIAGRAMM
- AUSEINANDERSETZUNG MIT SPRITZBETON
- BETONCHEMIE
- SPRITZBETONVERSUCHE IM VERSUCHSSTOLLEN HAGERBACH (CH)
- PROJEKTPARTNERSCHAFT MIT DER SIKA AG SCHWEIZ
- ZEITPLAN
- MINISHOT - DRUCKTECHNOLOGIE

3.2. PLANUNG DER AUTOMATISIERUNGSEINHEIT

DEFINITION

- 3.2.1. PLANUNG DER VERSUCHSABLÄUFE UND PROTOTYPEN
 - ENTWURF UND AUFBEREITUNG DER CAD-DATEN FÜR VERSUCHSBLOCK I IM ROBOTER DESIGN LABOR (ITE)
 - ENTWURF UND AUFBEREITUNG DER CAD-DATEN FÜR VERSUCHSBLOCK II IM ABB ROBOTER LABOR (ITE)
- 3.2.2. ROBOTERSTEUERUNG
 - MITTELS FRÄSBAHNEN
 - MITTELS PROGRAMMIERUNG IN ECHTZEIT

3.3. VERSUCHSABLAUF_KONSTRUKTION DER PROZESSKETTE

ÜBERBLICK

- DIGITALE PROZESSKETTE - GEOMETRIEAUFBEREITUNG
- ROBOTERSTEUERUNG
- BETONAUFBEREITUNG
- MATERIALFÖRDERUNG | DÜSENTECHNOLOGIE
- ROBOTER
- DRUCKVERSUCHE

3.4. BETON 3D DRUCKEN | HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN

- VERSUCHSBLOCK I (ROBOTER DESIGN LABOR)
 - VERSUCHSREIHE I: ABFAHREN VON GERADEN UND RADIEN
 - VERSUCHSREIHE II: SCHICHTEN VON BAHNEN
 - VERSUCHSREIHE III: ABFAHREN VON RADIEN UND SCHICHTEN
 - VERSUCHSREIHE IV: DRUCKEN DES SIKA SCHRIFTZUGES
- MATERIALVERSUCHE
- VERSUCHSBLOCK II (ABB ROBOTER LABOR)
 - BETONKNOTEN
 - DRUCKEN AUF GEKRÜMMTE FLÄCHEN
 - SIKA SCHRIFTZUG

3.2. PLANUNG DER AUTOMATISIERUNGSEINHEIT

DEFINITION

- 3.2.1. PLANUNG DER VERSUCHSABLÄUFE UND PROTOTYPEN

ENTWURF UND AUFBEREITUNG DER CAD-DATEN FÜR
VERSUCHSBLOCK I IM ROBOTER DESIGN LABOR (ITE)

ENTWURF UND AUFBEREITUNG DER CAD-DATEN FÜR
VERSUCHSBLOCK II IM ABB ROBOTER LABOR (ITE)

AUTOMATISIERUNGSEINHEIT

DEFINITION:

Die Aufgabe der Automatisierungseinheit war das generative Steuern und Bewegen der Druckdüse. Die Druckeinheit wurde auf einem computergesteuerten Roboterarm befestigt. Die Abläufe des Roboters mussten an die Output-Geschwindigkeit der Drucktechnologie angepasst werden, um einen konstanten, wiederholbaren Druckstrang in Schichten zu ermöglichen. Mittels geplanter Druckversuche sollten Erfahrungswerte hinsichtlich der Druckeigenschaften erzielt und aufgelistet werden.

Die Automatisierungseinheit sollte eine detaillierte Dokumentation der Funktion, Handhabung und der Problemstellungen beim Beton 3D Druck liefern.

Die Automatisierungseinheit beinhaltet drei relevante Bereiche:

- Erstellung von Versuchsabläufen
- Aufbereitung von computergenerierten Daten
- Robotersteuerung

PLANUNG DER VERSUCHSABLÄUFE UND PROTOTYPEN:

Auf Grund einer experimentellen Annäherung wurden zwei Versuchsblöcke definiert.

| |
|--|
| <p>Versuchsblock I: <i>zwei Wochen im Juli 2014, Roboter Design Labor, TU Graz (RDL)</i> <i>(beinhaltet Versuchsreihe I - IV)</i></p> <p>Versuchsblock II: <i>zwei Wochen im August 2014, ABB Roboter Labor, TU Graz (ABB LAB)</i> <i>(beinhaltet Versuchsreihe Betonknoten, Drucken auf gekrümmte Fläche und Sika Schriftzug)</i></p> |
|--|

VERSUCHSBLOCK I (RDL)

AUFBEREITUNG VON CAD DATEN

In diesem Block sollten vier unterschiedliche Versuchsreihen behandelt und in Versuchsprotokollen genau dokumentiert werden. Vorangetrieben wurden diese Versuche von dem Ziel, Beton in vordefinierten Strängen aufzutragen und schichtweise zu stapeln. Um dieses Ergebnis zu erzielen, musste das System Schritt für Schritt optimiert werden.

Jede Versuchsreihe hatte einen definierten Zweck und festgelegte Ziele. Voraussetzung dafür war eine lückenlose Prozesskette.

PLANUNG VON VERSUCHSREIHE I:

Angesichts der Tatsache, dass sich in der Prozesskette zwei unterschiedliche Maschinen mit verschiedener Kalibrierung und Handhabung befanden, mussten Roboter und MiniShot aufeinander abgestimmt werden.

Zielsetzung der Versuchsreihe I:

- Konstante Vorschubgeschwindigkeit des Roboters bei Geraden und Radien.
- Konstante Druckleistung von MiniShot
- Koordination und Kombination von Vorschubgeschwindigkeit des Roboters und der Druckgeschwindigkeit der MiniShot Maschine in Abhängigkeit vom Querschnitt des Druckstranges
- Mischverhältnis von Mörtel und Beschleuniger.
- Überprüfen der unterschiedlichen Düsendurchmesser

Durch die klare Zielsetzung dieser Versuchsreihe, wurde eine geeignete Geometrie entworfen und generiert. Das mehrmalige Wiederholen des Versuchs und das Verbessern der einzelnen Einflussfaktoren der Prozesskette sollten wichtige Ergebnisse liefern.

Die Geometrie basierte auf simplen Geraden und Radien. Es wurde an einem definierten Ausgangspunkt gestartet, welcher auch als Endpunkt diente. Die Durchführung aller Versuchsabläufe geschah auf einer vorgefertigten 40 x 40cm Holzplatte, welche zum Schutz mit einer Kunststoffplane überspannt wurde.

Bild 143.

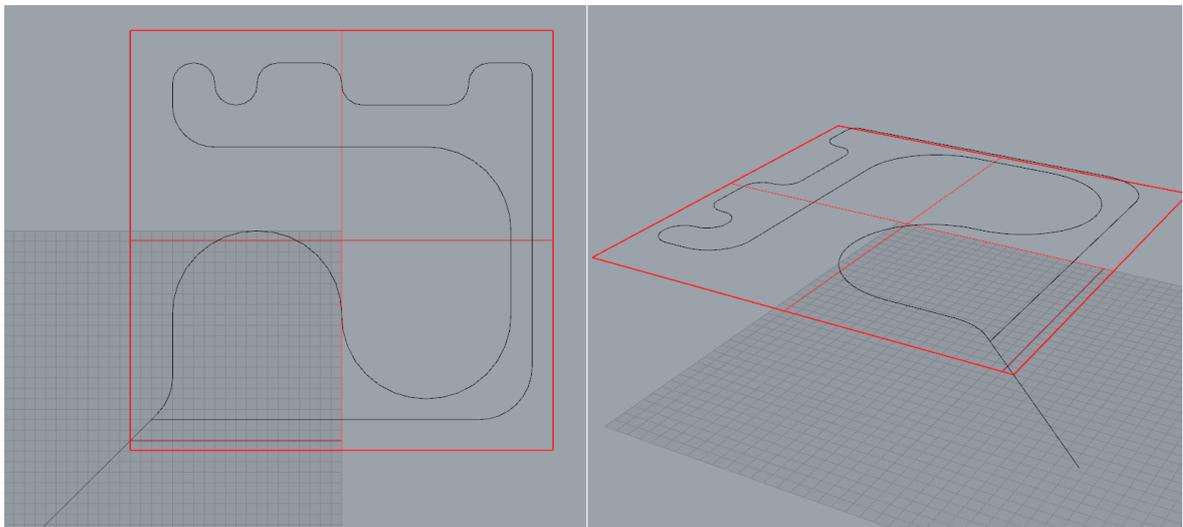


Bild 144.

PLANUNG VON VERSUCHSREIHE II:

Die gewonnenen Erkenntnisse aus Versuchsreihe I sollten berücksichtigt werden, um das System zu optimieren.

Zielsetzung der Versuchsreihe II:

- Genauigkeit der wiederkehrenden Roboterbahnen (Toleranzen)
- Definiertes Stapeln von Schichten direkt übereinander
- Präzise Aussage über Zustellhöhen
- Verformung der einzelnen Schichten in Abhängigkeit des Mörtel-Beschleunigerverhältnisses.
- Materialstau bei Zustellpunkt

Die Geometrie basierte auf gestapelten Geraden und Radien. Es wurde versucht, sechs identische Layer zu schichten.

Startpunkt diente als Endpunkt.

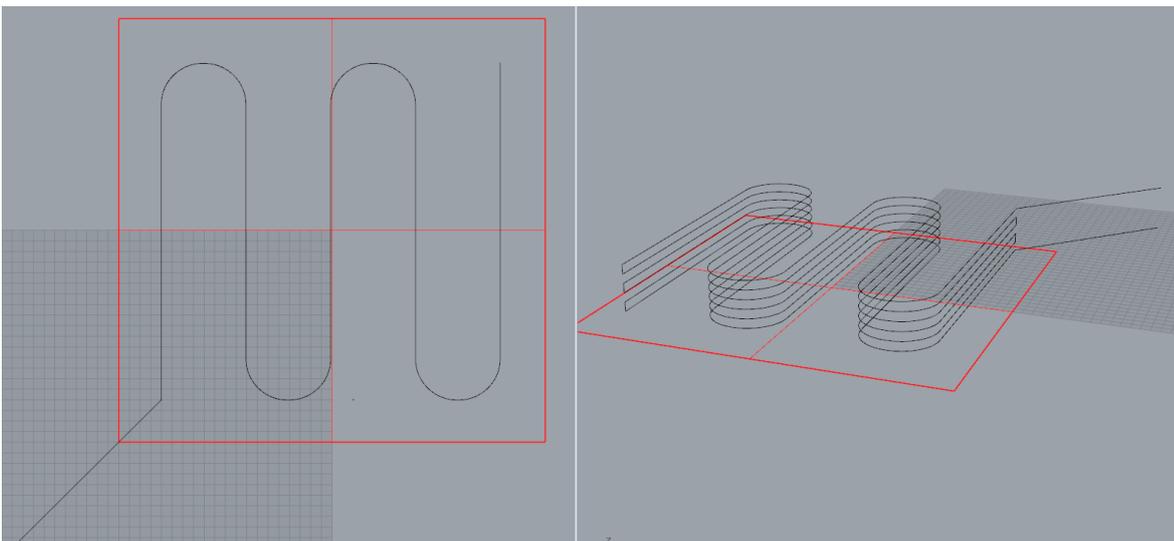


Bild 145.

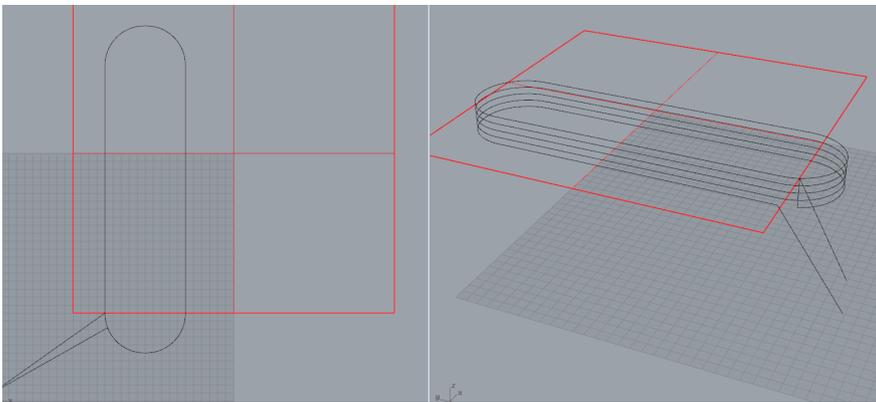
PLANUNG VON VERSUCHSREIHE III:

Die gewonnenen Erkenntnisse aus Versuchsreihe I-II sollten berücksichtigt werden, um das System zu optimieren.

Zielsetzung der Versuchsreihe III:

- Optimierung des Mörtel-Beschleuniger Verhältnisses für Erhöhung der Frühstandsfestigkeit
- Genauigkeit der wiederkehrenden Roboterbahnen (Toleranzen)
- Definiertes Stapeln von Schichten direkt übereinander
- Präzise Aussage über Zustellhöhen
- Verformung der einzelnen Schichten in Abhängigkeit des Mörtel-Beschleuniger Verhältnisses, speziell im Bereich der Stufe zwischen Aufspanntisch und Druckplatte

Bild 146.



Die Geometrie basierte auf geschichteten, wiederkehrenden Radien und Geraden. Die Druckplatte wurde etwas versetzt und die Druckbahnen verschoben. Startpunkt diente als Endpunkt.

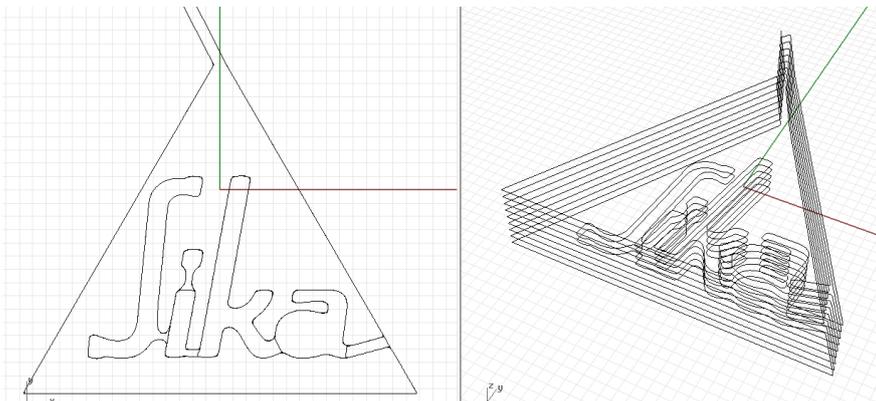
PLANUNG VON VERSUCHSREIHE IV:

Die gewonnenen Erkenntnisse aus Versuchsreihe I-III sollten berücksichtigt werden, um das System zu optimieren.

Zielsetzung der Versuchsreihe IV:

- Drucken des Sika Schriftzuges
- Abfahren sehr enger Radien
- Erkenntnis aus Druckentwicklung unterschiedlicher Polylinien (kleine Radien, lange Geraden)

Bild 147.



Die Geometrie basierte auf dem Firmenlogo des Projektpartners Sika. Es wurde versucht, neun Layer zu schichten, welche sich wie ein Treppenverlauf entwickelten. Startpunkt diente als Endpunkt.

AUSARBEITUNG VERSUCHSBLOCK II (ABB LAB)

AUFBEREITUNG VON CAD DATEN

Im Versuchsblock II sollten die erzielten Ergebnisse des Versuchsblocks I gesammelt werden und in die Herstellung von vier Prototypen einfließen. Darüber hinaus wurde eine neue Robotersteuerungssoftware verwendet, die eine flexiblere Versuchsabfolge ermöglichte. Der Fokus dieses Versuchsblocks lag auf der Fertigung eines Betonknotens im Maßstab 1:1 und des Sika Logos. Darüber hinaus gab es zwei Experimente in Anlehnung an das Forschungsprojekt *Schaltisch*, die das Drucken auf doppelt gekrümmten Flächen darstellten.

ENTWURF BETONKNOTEN

Vor dem Entwurf des Prototypen wurden die Kernpunkte, welche ein geeignetes Schaustück vermitteln sollten, ein weiteres Mal gegenübergestellt, um die wichtigsten Kriterien erneut aufzulisten:

- Flexibilität
- Genauigkeit im Wiederholvorgang
- Aufbauen von Schichten
- Verbindung und Festigkeit zwischen den Bahnen
- Auskragungen für Verjüngungen
- Bedürfnis einer sinnvollen Verwendung des Prototypen im Maßstab 1:1, kein Modell
- Anpassung der Prozesskette und des Druckmaterials
- Oberflächenqualität

Das übergeordnete Konzept sollte ein Betonknoten sein, welcher sich aus drei elliptischen Betonbeinen nach oben verjüngt und in einen Kreis übergeht. Der schlanke Prototyp sollte im Kern hohl ausformuliert werden und durch minimales Versetzen der einzelnen Layer auskragen. Das Objekt konnte aufgrund des geringen Fassungsvermögens des Mörtelspeichers (Druckzylinders) nur mittels mehrerer Betonierschritte gefertigt werden. Durch das auftretende Eigengewicht und die Auskragungen, der darüber liegenden Schichten, sollten die geplanten Druckhöhen zwischen 5 - 10cm liegen, um die Verformung der einzelnen Layer gering zu halten. Die Erkenntnisse des Versuchsblocks I zeigten, dass eine Stapelung von Schichten mit versetzten Druckbahnen für Auskragungen nur durch eine stützende zweite Bahn möglich war.

ERSTER ENTWURF BETONKNOTEN

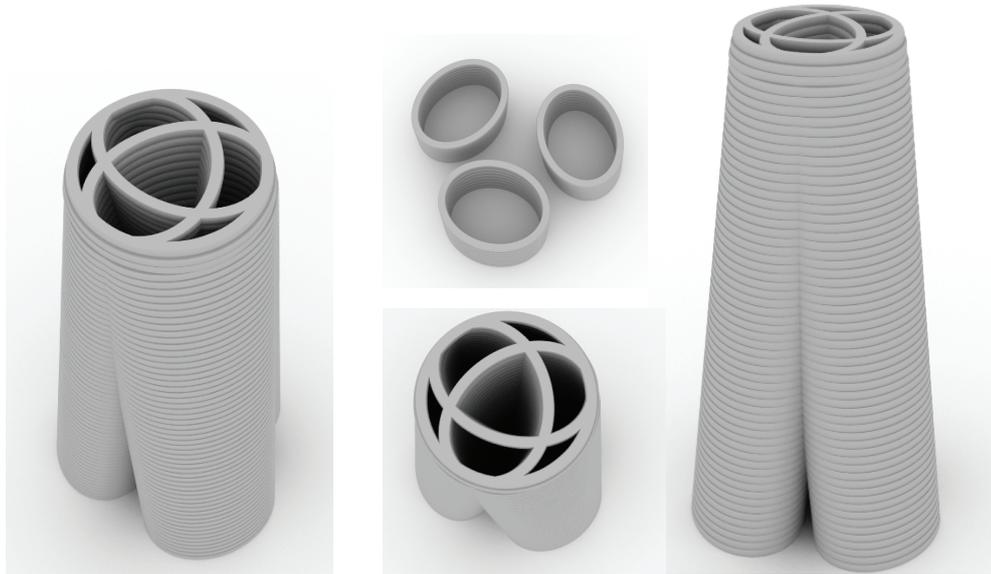


Bild 148.

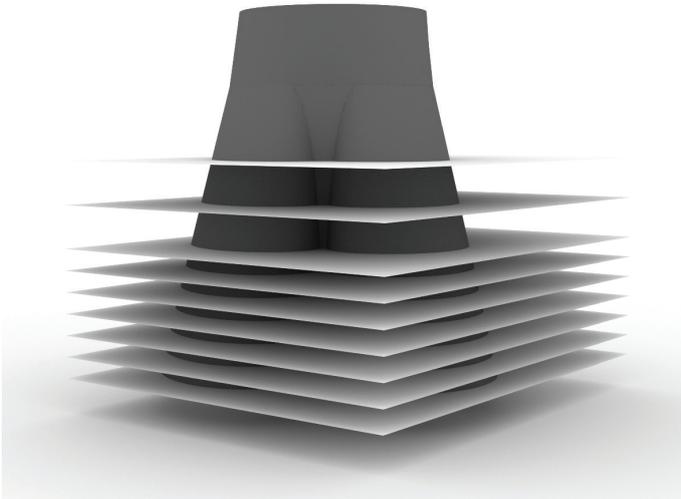
Die Kontur des ersten Entwurfs zeigte bereits Ähnlichkeiten zum Endprodukt. Die Herstellung und der Druckprozess waren in dieser Ausarbeitung noch nicht integriert und somit musste die Form für die neue Phase des Druckens komplett überarbeitet werden, damit zusammenhängende Linien entstanden.

ERKENNTNISSE UND GRUNDREGELN ZUR AUFBEREITUNG VON CAD DATEN BEIM 3D DRUCKEN MIT BETON:

- Für die Robotersteuerung mussten die erstellten CAD-Linien zu einer durchgehenden Polylinie verbunden werden, um eine konstante Druckgeschwindigkeit zu erzielen.
- Es gab keine Möglichkeit zum Absetzen der Kontur oder zu einem Stop and Go Mechanismus.
- Konturen brauchten eine Zu- und eine Ausfahrt.
- Es waren keine spitzen Winkel möglich.
- Die Konturen durften nicht mehr als 3mm auskragen.
- Zusätzlich musste beim Stapeln von Schichten mit Auskragungen, eine stützende zweite Bahn berücksichtigt werden.
- Der Druckstrang musste abgezogen werden, um eine ebene Auflagefläche für weitere Layer zu ermöglichen. Die Zustellung der Schichten war von der Mörtelkonsistenz, der Vorschubgeschwindigkeit des Roboterarms und von der Druckgeschwindigkeit des Mini Shot-Systems abhängig. Diese drei Variablen waren für die Kontur des Druckstranges verantwortlich.

Ein zusätzliches Problem stellte der hohe Wasseranteil (ca. 90%) im Beschleuniger dar. Durch den Einsatz von dem Betonbeschleuniger wurde eine hohe Frühstandfestigkeit versprochen. In den ersten Sekunden nach dem Austritt erzielte dieser jedoch den gegenteiligen Effekt und machte den Mörtel flüssiger. Sehr zum Nachteil für die Kontur.

AUFBEREITUNG VON CAD DATEN DES BETONKNOTENS



ERKENNTNIS: Durch die Verwendung des Beschleunigers war beim Stapeln der Layer die Verformung der unten liegenden Bahnen enorm. Dieser Zustand wirkte sich auf die Zustellhöhen des Roboters aus, weshalb es nicht möglich war, den modellierten Knoten mittels konstanter Ebenen zu schneiden und als Bahnen darzustellen.

Bild 149. Teilen des Prototypen in Layer. Die Höhen der jeweiligen Schichten entsprechen dem Querschnitt des Druckmaterials.



Bild 150. Entwurf der drei elliptischen Basislayer:

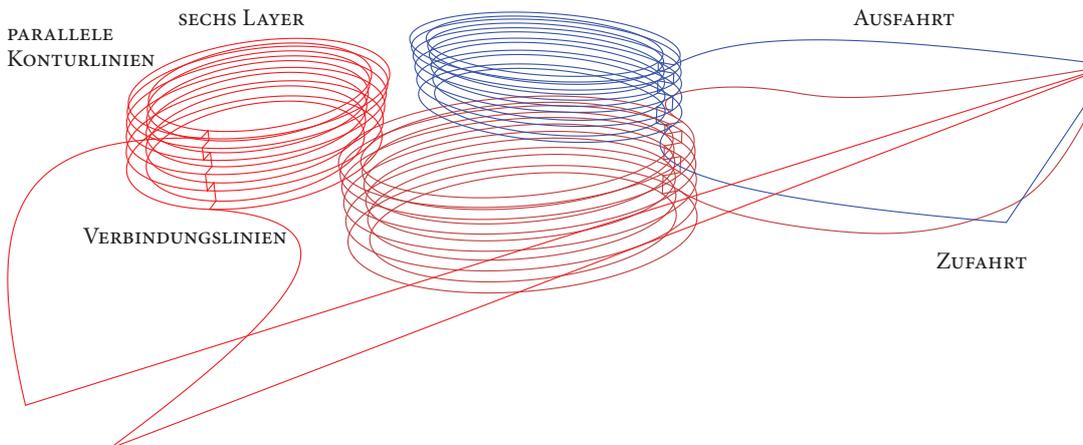


Bild 151. Das Volumen wird in druckbare Parallellinien mit Zu- und Ausfahrt umgewandelt.

ERKENNTNIS: Die Basis des Betonknotens bildeten drei elliptische Beine, die sich mit zunehmender Höhe zur Mitte verjüngten. Jede Ellipse hatte eine Zufahrt und eine Ausfahrt, die den Anfangs- und Endpunkt definierten. Es wurden jeweils sechs Layer gestapelt, die aus zwei parallelen Konturen mit Verbindungslinien generiert wurden.

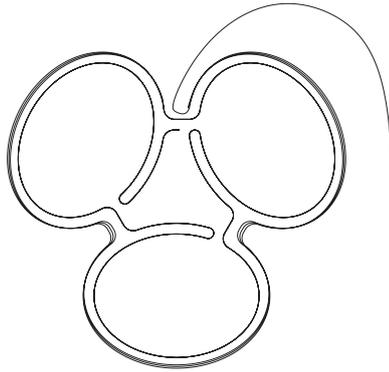


Bild 152. Grundriss: Spezieller Aufbau der Druckbahnen für die Verbindung der Basislayer.

VERBINGUNG DER ELLIPSEN

ERKENNTNIS: In den verbindenden Bereichen der drei Beine mussten die Anordnung und der Verlauf der Druckbahnen speziell verändert werden, um das Drucken von Parallellinien zu ermöglichen. Dieses Aufbereitungssystem wurde in sämtlichen weiteren Layern angewendet.

Die Verjüngung des Prototyps nach oben hin verlangte eine Auskrägung der einzelnen Druckbahnen. Im Vorfeld wurde ein Auskrägungswert von 1mm Überstand pro Druckbahn definiert, welcher einen äußerst flachen Verjüngungswinkel entstehen ließ. Die praktischen Druckversuche ermöglichten jedoch einen realen Überstand von 3mm.

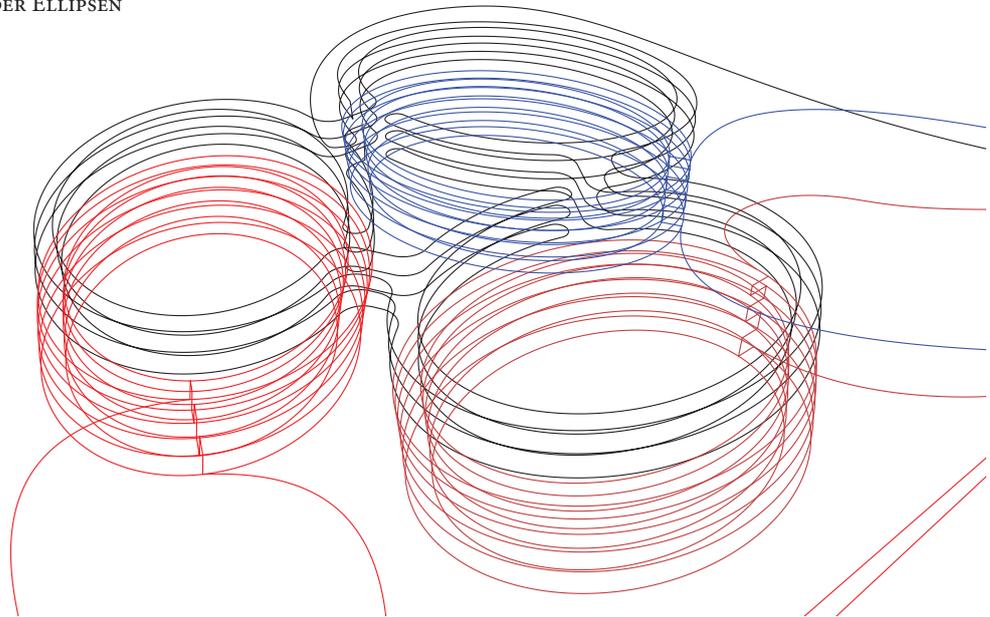


Bild 153. Perspektive: Spezieller Aufbau der Druckbahnen für die Verbindung der Basislayer.

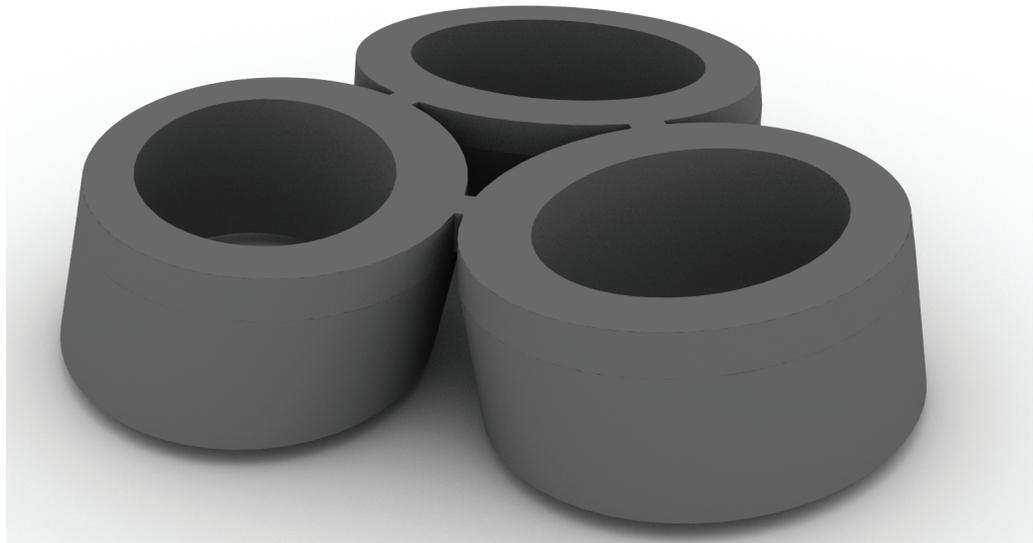


Bild 154. Volumenmodell für die Verbindung der Basislayer.



Bild 155. links, Volumenmodell: Querschnitt des Prototypen verjüngt sich.

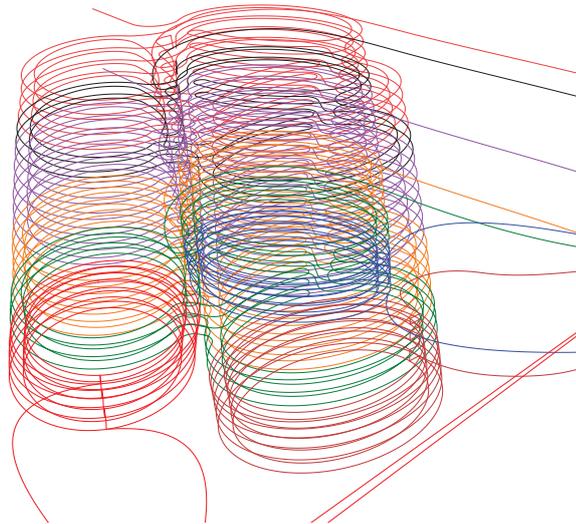


Bild 156. rechts, Perspektive der Druckbahnen. Im Inneren des Bauteils entstehen Auskragungen.

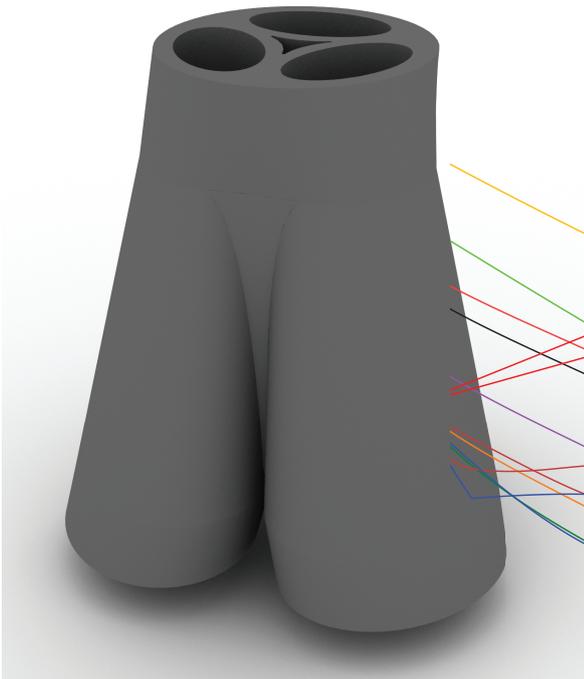


Bild 157. links, Volumenmodell des gewünschten Prototypen.

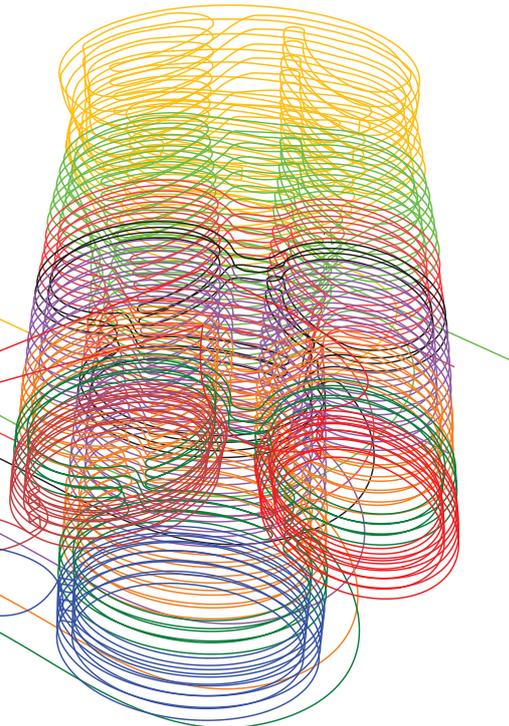


Bild 158. rechts, Perspektive der Druckbahnen. Die Kontur des Prototyps bildet als Abschluss einen Kreis.

ERKENNTNIS: Der Prototyp konnte nahezu hohl ausgeführt werden. Durch die Überschneidungen und die Verwendung von Parallelbahnen entstand im Kern eine spannende Geometrie. Die letzte Herausforderung stellte im oberen Bereich der Übergang zum Kreis dar, welcher den Abschluss des Bauteils bedeutete. In diesem Areal mussten die Auskragungen des Druckmaterials einen Wert von mindestens 3mm betragen, da ansonsten das Schließen des Kreises nicht möglich gewesen wäre. Somit war der Planungsprozess des Prototypen beendet.

3. PRAKTISCHE UMSETZUNG VON COEBRO | BETON 3D DRUCKEN

3.1. PLANUNG DER DRUCKTECHNOLOGIE

- ZIELESETZUNG UND UMFANG DER TECHNOLOGIE
- 3D DRUCK - MASSSTABS - QUALITÄTS - DIAGRAMM
- AUSEINANDERSETZUNG MIT SPRITZBETON
- BETONCHEMIE
- SPRITZBETONVERSUCHE IM VERSUCHSSTOLLEN HAGERBACH (CH)
- PROJEKTPARTNERSCHAFT MIT DER SIKA AG SCHWEIZ
- ZEITPLAN
- MINISHOT - DRUCKTECHNOLOGIE

3.2. PLANUNG DER AUTOMATISIERUNGSEINHEIT

DEFINITION

- 3.2.1. PLANUNG DER VERSUCHSABLÄUFE UND PROTOTYPEN
 - ENTWURF UND AUFBEREITUNG DER CAD-DATEN FÜR VERSUCHSBLOCK I IM ROBOTER DESIGN LABOR (ITE)
 - ENTWURF UND AUFBEREITUNG DER CAD-DATEN FÜR VERSUCHSBLOCK II IM ABB ROBOTER LABOR (ITE)
- 3.2.2. ROBOTERSTEUERUNG
 - MITTELS FRÄSBAHNEN
 - MITTELS PROGRAMMIERUNG IN ECHTZEIT

3.3. VERSUCHSABLAUF_KONSTRUKTION DER PROZESSKETTE

ÜBERBLICK

- DIGITALE PROZESSKETTE - GEOMETRIEAUFBEREITUNG
- ROBOTERSTEUERUNG
- BETONAUFBEREITUNG
- MATERIALFÖRDERUNG | DÜSENTECHNOLOGIE
- ROBOTER
- DRUCKVERSUCHE

3.4. BETON 3D DRUCKEN | HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN

- VERSUCHSBLOCK I (ROBOTER DESIGN LABOR)
 - VERSUCHSREIHE I: ABFAHREN VON GERADEN UND RADIEN
 - VERSUCHSREIHE II: SCHICHTEN VON BAHNEN
 - VERSUCHSREIHE III: ABFAHREN VON RADIEN UND SCHICHTEN
 - VERSUCHSREIHE IV: DRUCKEN DES SIKA SCHRIFTZUGES
- MATERIALVERSUCHE
- VERSUCHSBLOCK II (ABB ROBOTER LABOR)
 - BETONKNOTEN
 - DRUCKEN AUF GEKRÜMMTE FLÄCHEN
 - SIKA SCHRIFTZUG

3.2. PLANUNG DER AUTOMATISIERUNGSEINHEIT

- 3.2.2. ROBOTERSTEUERUNG

MITTELS FRÄSBAHNEN (RHINO, ROBOT STUDIO, HYPER
MILL, PI PATH) ROBOTER DESIGN LABOR

MITTELS PROGRAMMIERUNG IN ECHTZEIT (RHINO,
GRASSHOPPER, HAL) ABB ROBOTER LABOR

ROBOTER DESIGN LABOR, IRB 6660

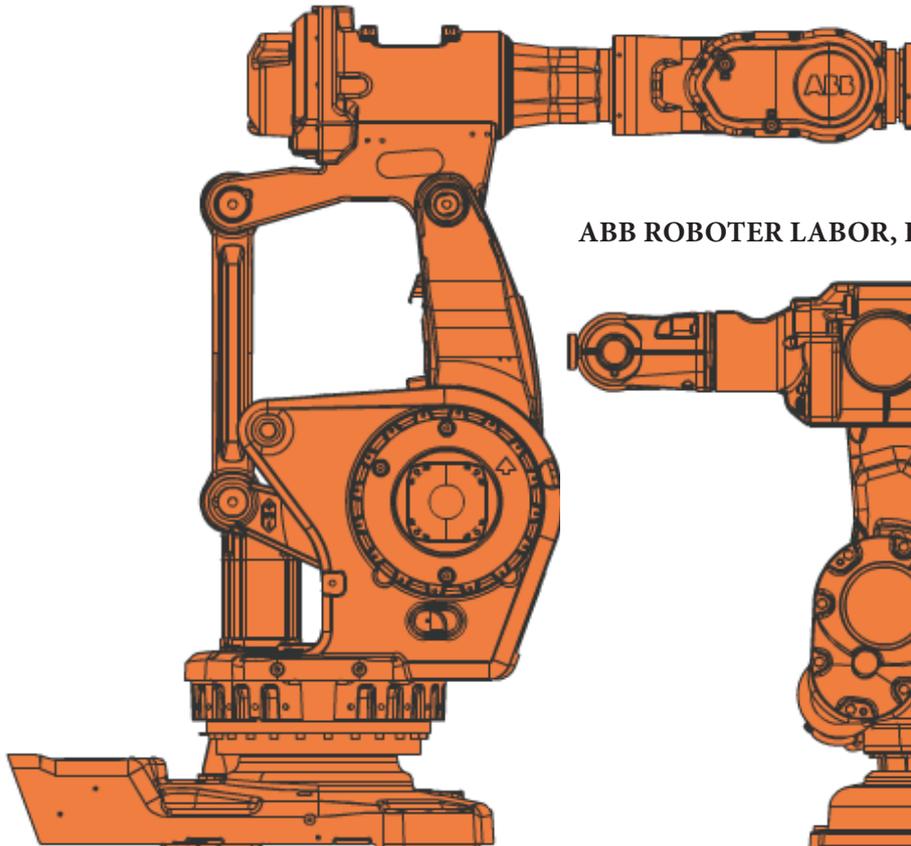


ABB ROBOTER LABOR, IRB 140

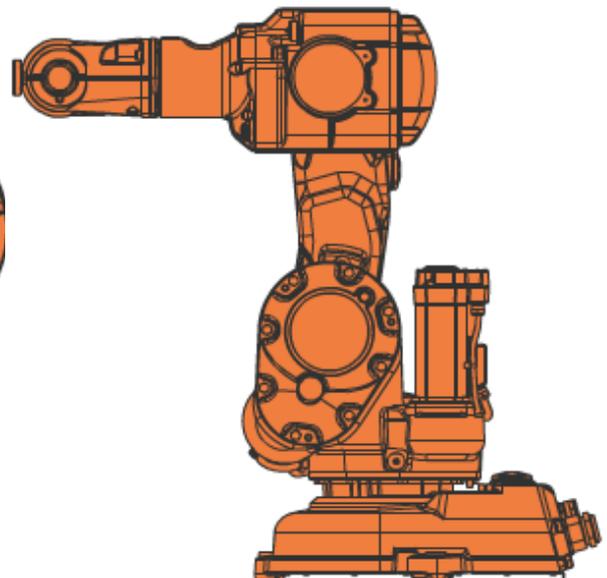


Bild 159.

Für das 3D Drucken war ein konstantes Abfahren von definierten Bahnen notwendig, welches am Institut für Tragwerksentwurf nur mit einem Roboter erzielt werden konnte. Die Steuerung des Roboters stellte eines der Kernprobleme dieser Arbeit dar, welches gelöst werden musste.

Zwei Problematiken mussten geklärt werden:

- die Druckdüse musste einem vorgegebenen Pfad ohne Abweichungen folgen
- die Vorschubgeschwindigkeit sollte eine konstante Bewegung aufweisen und an die Outputgeschwindigkeit des Drucksystems angepasst werden.

Um diese zwei Herausforderungen bewältigen zu können, sollte das System der Robotersteuerung Schritt für Schritt verbessert und kalibriert werden. Dieser Prozess war nur durch praktische Versuche unter Einbeziehung der gesamten Prozesskette des Beton 3D Druckens zu lösen.

Bei der Robotersteuerung wurde das Fundament der digitalen Steuereinheit behandelt. Die im Kapitel *Aufbereitung Versuchsblock I-II* erstellten CAD Dateien wurden übernommen und in einen Robotercode umgewandelt. Zusätzlich dienten Kollisionskontrollen der Durchführung und der Bedienung der robotereigenen Hardware.

Die Wahl der richtigen und geeigneten Software war noch nicht eindeutig geklärt:

- Generierung von Roboterbahnen anhand von Fräsbahnen (Roboter Design Labor)
- Programmierung in Echtzeit (ABB Roboter Labor)

Um die Stränge mithilfe von Fräsbahnen zu erzeugen, war ein Zusammenspiel der Programme *Rhinoceros*, *HyperMill*, *PiPath* und *Robotstudio* notwendig.

Die zweite Herangehensweise basierte auf einem Rhinoceros gestützten Plug-In namens Grasshopper, durch welches man mittels einer eigens für Robotersteuerung programmierten Software (HAL) sehr einfach und schnell Roboterbahnen erzeugen konnte.

ROBOTERSTEUERUNG ANHAND VON FRÄSBAHNEN (RHINO, ROBOT STUDIO, HYPER MILL, PI PATH)

KURZBESCHREIBUNG DES ABLAUFES:

- Einmessen des Aufspanntisches, sowie der Druckdüse und Abstimmen mit gespeicherten Daten im Robot Studio.
- Erstellen der 3D Daten im Modellierprogramm Rhinoceros und zerlegen in Polylinien.
- .step Dateien in HyperMill einspielen und Joblisten (Fräsbahnen) erstellen.
- NC-Dateien exportieren, in PiPath in Kombination mit Roboter und Aufspanntisch öffnen und eine Kollisionskontrolle durchführen.
- Bei erfolgreicher Simulation .mod Dateien erstellen und zusätzlich einen Robotercode manuell für den 3D Druck modifizieren.
- Laden des Robotercodes auf die Robotersteuerung und starten.

EINMESSEN DER DRUCKDÜSEN

Bild 160.



Bild 161.

Der ABB.IRB 6660 des Roboter Design Labors wurde primär als Fräsroboter verwendet und beinhaltet somit am Roboterarm austauschbare Frässpindeln. Das Gewicht dieser Spindel variierte zwischen 40 - 80kg und war im Gesamtgewicht des Roboterarms eingerechnet. Aus diesem Grund musste vor dem Einmessen ein Ersatzgewicht auf dem Arm angebracht werden, um die Spindel zu simulieren und die Druckdüse vor eine Beschädigung zu schützen.

WAHL DER DRUCKDÜSENGEOMETRIE

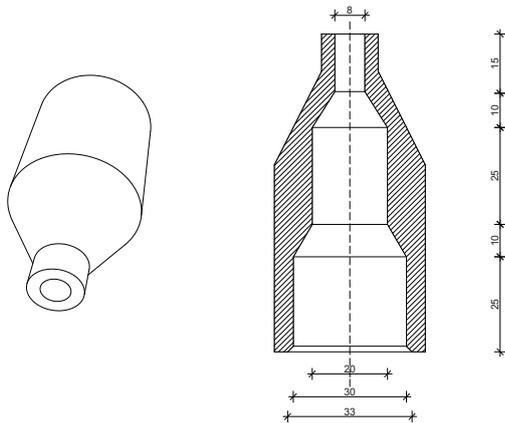
Die Robotersteuerung hatte großen Einfluss auf die Geometrie der Druckdüse. Im Vorfeld wurden verschiedene Düsenöffnungen aufgelistet und Eigenschaften besprochen.

Die Düsen konnten in zwei Kategorien gegliedert werden:

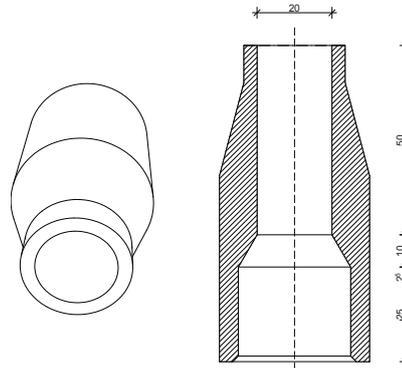
- kreisförmige Düsenöffnung
- rechteckige Düsenöffnung

Beispiele der geplanten Düsen:

Düsenöffnung 8mm (kreisförmig)

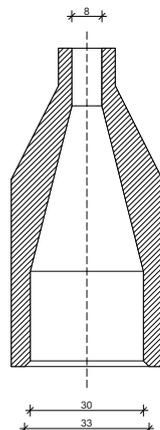
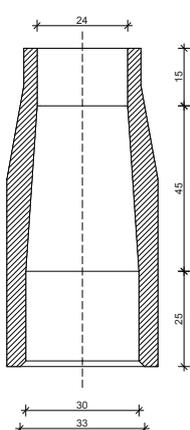


Düsenöffnung 20mm (kreisförmig)

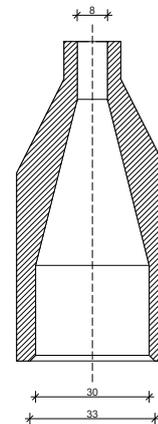
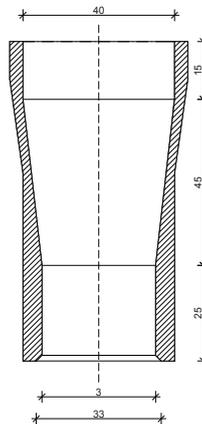


Plan 2. Jürgen Holl,
22. Mai 2014

Düsenöffnung 8x24mm (rechteckig)



Düsenöffnung 8x40mm (rechteckig)



Plan 3. Jürgen Holl,
22. Mai 2014

Pro und Contra der kreisförmigen Düse:

- + Die Geometrie des Druckstranges hatte immer dieselbe Form.
- + Man musste keine zusätzlichen Schwänkbewegungen machen.
- + Die Robotersteuerung wurde durch die Düsenöffnung nicht beeinflusst.
- + Durch kleine Düsenöffnungen (bis zu 8mm) konnte die Genauigkeit des Objekts gesteigert werden.
- Erzeugte am Druckstrang immer Radien.

Pro und Contra der rechteckigen Düse:

- + Erleichterte flächiges Auftragen von Schichten und diente dem Laminieren.
- + Die Druckstränge wiesen eine vorteilhafte Geometrie auf.
- Form des Düsenstranges konnte variieren.
- Benötigten eine spezielle Robotersteuerung oder eine zusätzliche Schwänkeinrichtung, um eine definierte Stranggeometrie zu erzeugen.

Bild 161. Erkenntnisse über das Manövrieren der Druckdüse

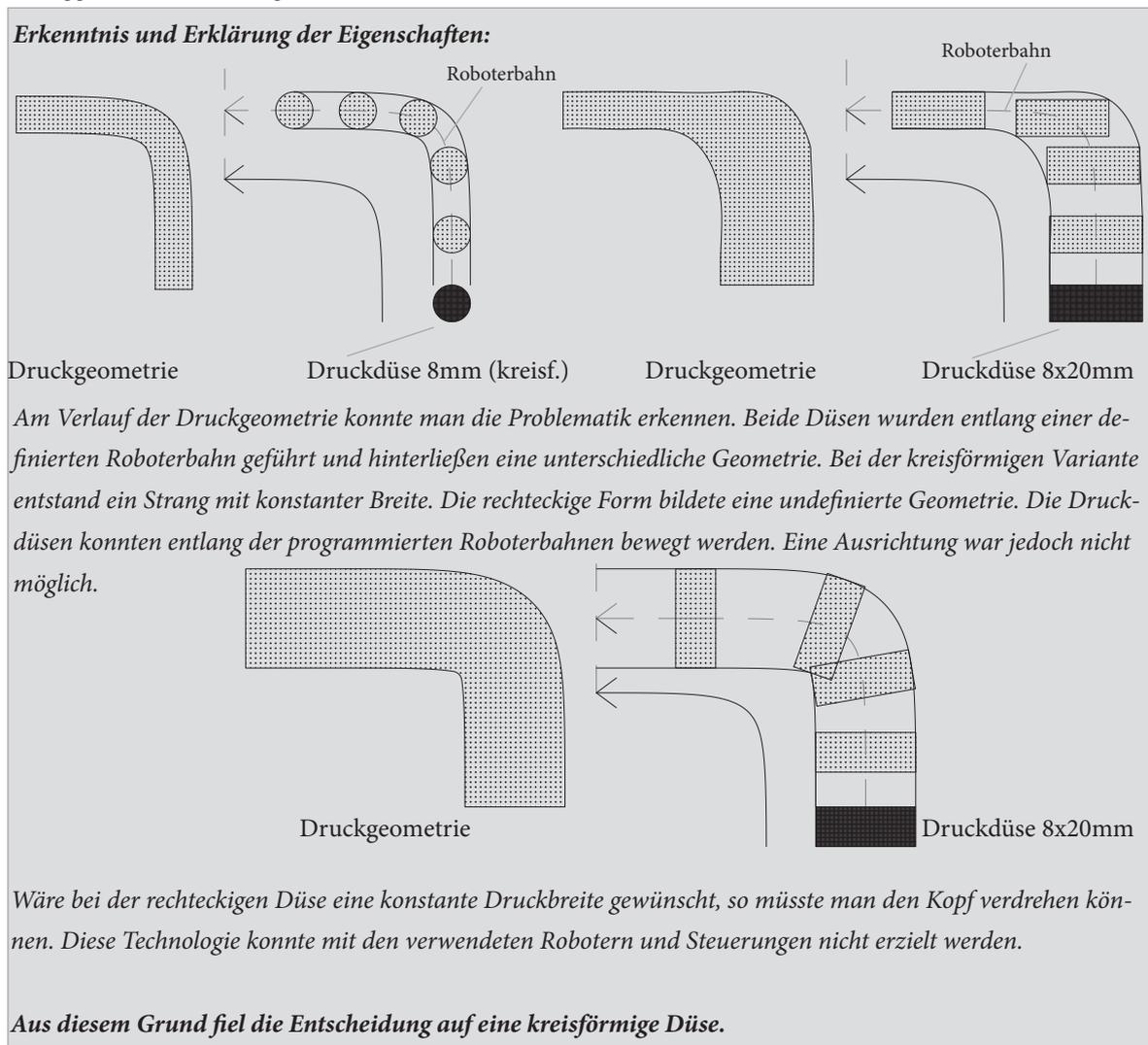
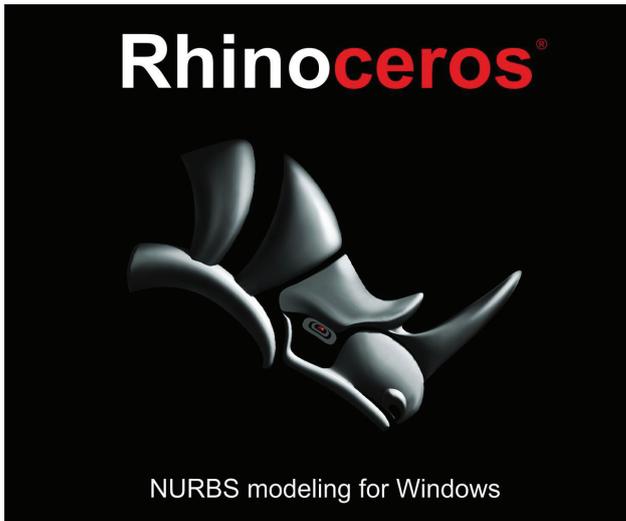


Bild 162. Erkenntnisse über das Manövrieren der Druckdüse



ADAPTION DER CAD DATEN FÜR DIE VERSUCHSREIHEN

Die benötigten CAD Daten wurden im Modellierprogramm Rhino erstellt und als .step Datei gespeichert. Das richtige Dateiformat war für eine weitere Verwendung im CAM-System hyperMill notwendig.

Bild 168. *Rhinoseros*

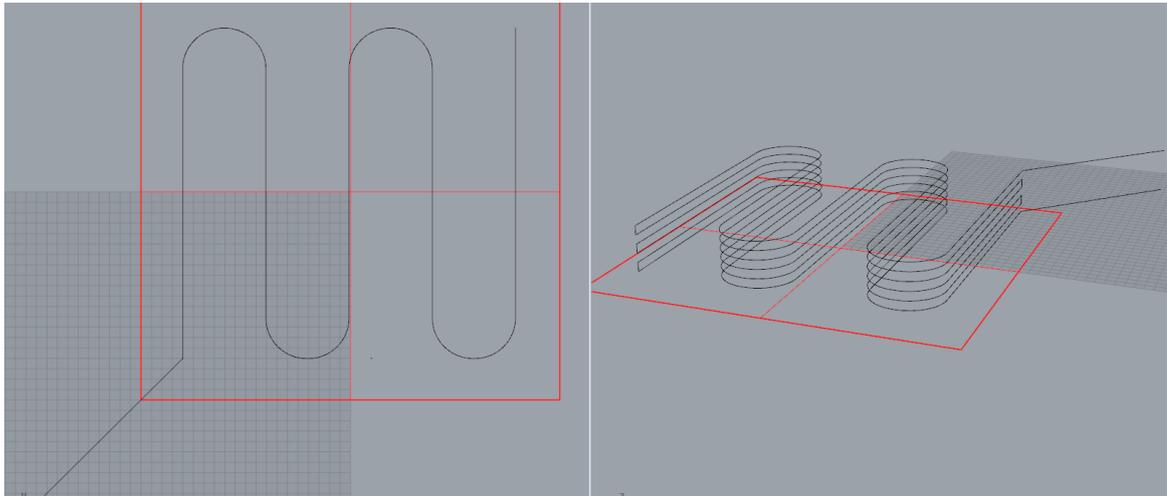


Bild 169. *Druckbahnen*

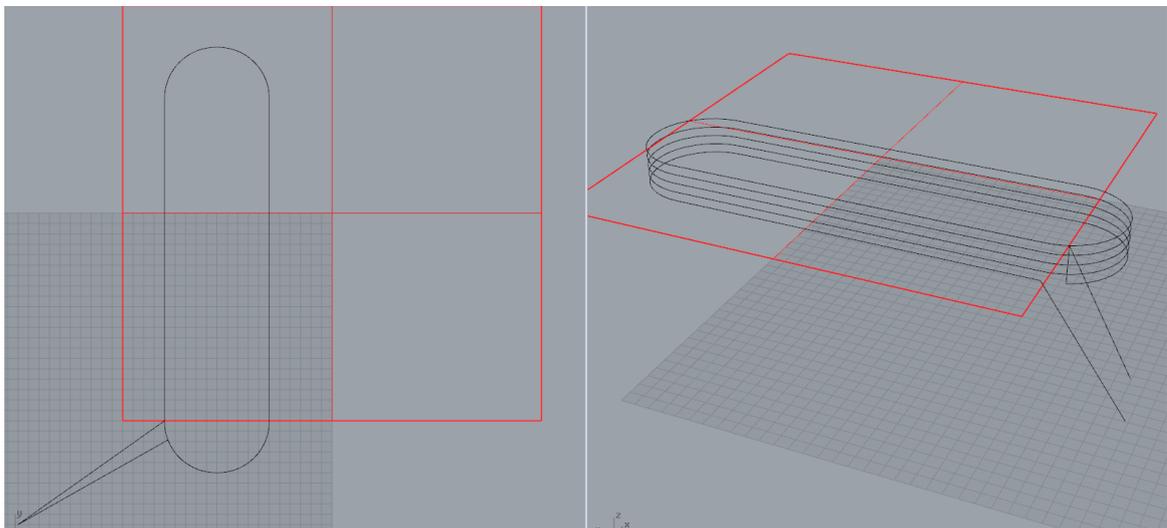


Bild 170. *Druckbahnen*

ERSTELLUNG DER FRÄSBAHNEN IM HYPER MILL

Dieses Programm ist hauptsächlich für eine spanabtragenden Fertigung vorgesehen. Die Steuerung konnte durch spezielle Bedienung auch für das Aufbauen von Schichten verwendet werden.

Man musste jeden Layer separat programmieren. Erst direkt am Roboter wurden die einzelnen Schritte zusammengefügt und ermöglichten somit die Stapelung von Schichten. Durch diesen Schritt konnte man ein konstantes Abfahren der einzelnen Layer ohne Verzögerung erzielen.



Bild 171. hyperCAD

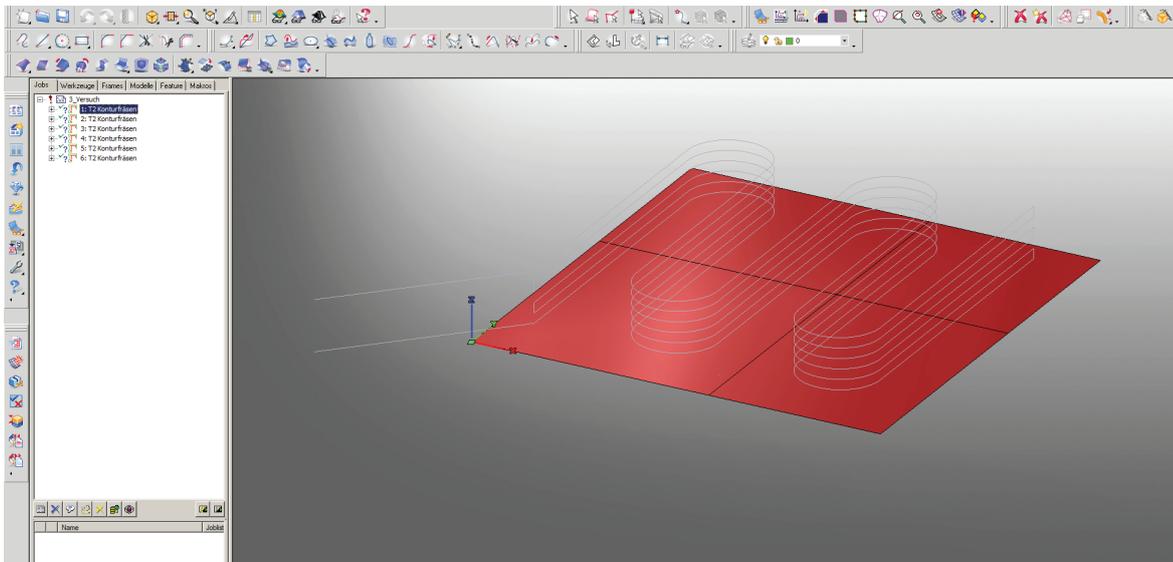


Bild 172. Laden der Fräsbahnen.

2D Zyklen mit Konturfräsen wurden als Jobs ausgewählt.

Dieser Zyklus musste mehrmals wiederholt werden, um den Aufbau von Schichten zu ermöglichen.

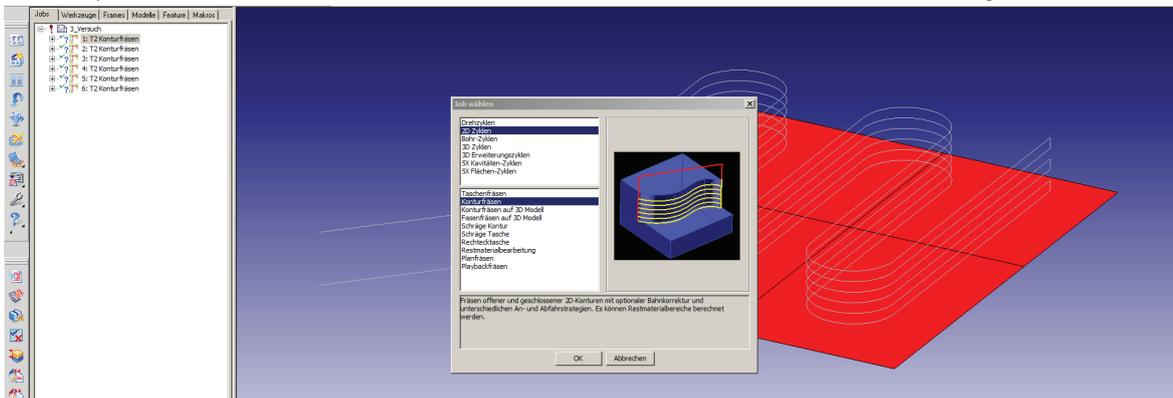


Bild 173. Konturfräsen

Bild 174. links, Einstellungen der Jobs.

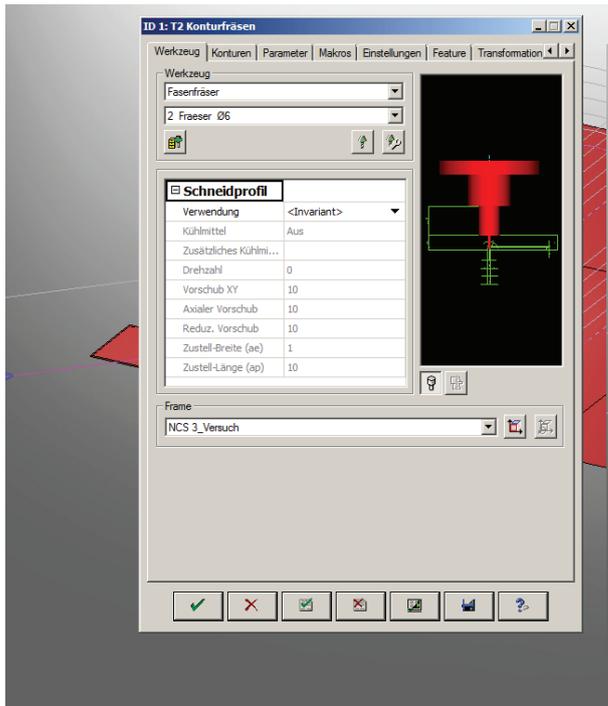
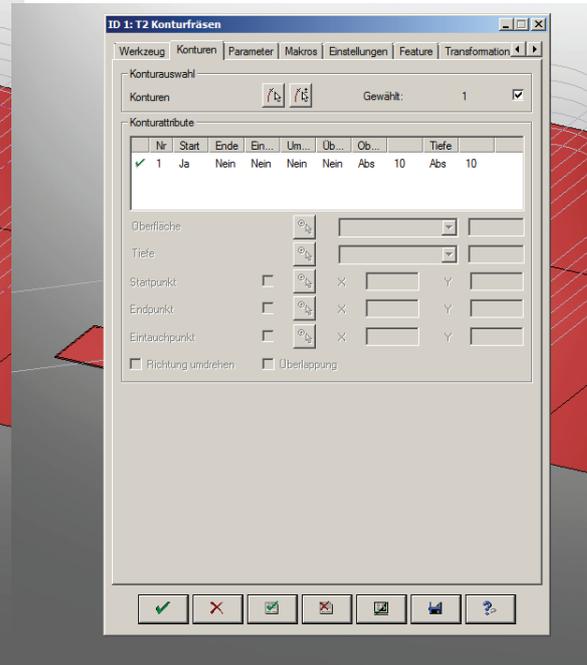


Bild 175. rechts, Einstellungen der Jobs.



Die einzelnen Jobs beinhalteten verschiedene Unterpunkte, die für die Einstellung des richtigen Werkzeuges, der gewünschten Kontur, der Parameter, der Präzision und der Geschwindigkeiten, verantwortlich waren. Nach gründlicher Einstellung der gesamten Kriterien konnte der Konturprozess berechnet werden.

Bild 176. links, Berechnen des Fräszyklus.

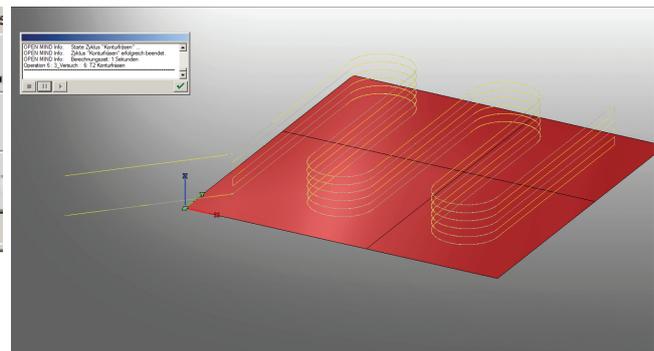
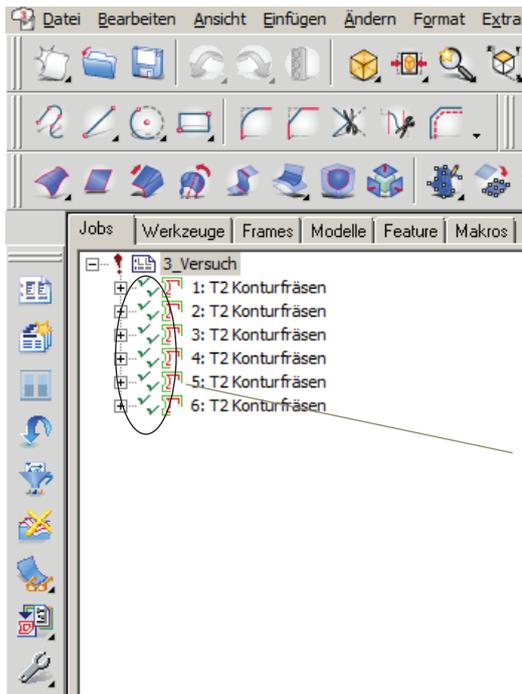


Bild 177. rechts, Berechnen des Fräszyklus.

Wenn die Kontur berechnet und der Zyklus als erfolgreich beurteilt wurde, erschienen die Bahnen im rechten Bild gelb markiert und im linken Bild bekam jede Kontur zwei grüne Häkchen.

Ab diesem Zeitpunkt konnte eine erfolgreiche Simulation durchgeführt werden, um die Prozesskette zu kontrollieren.

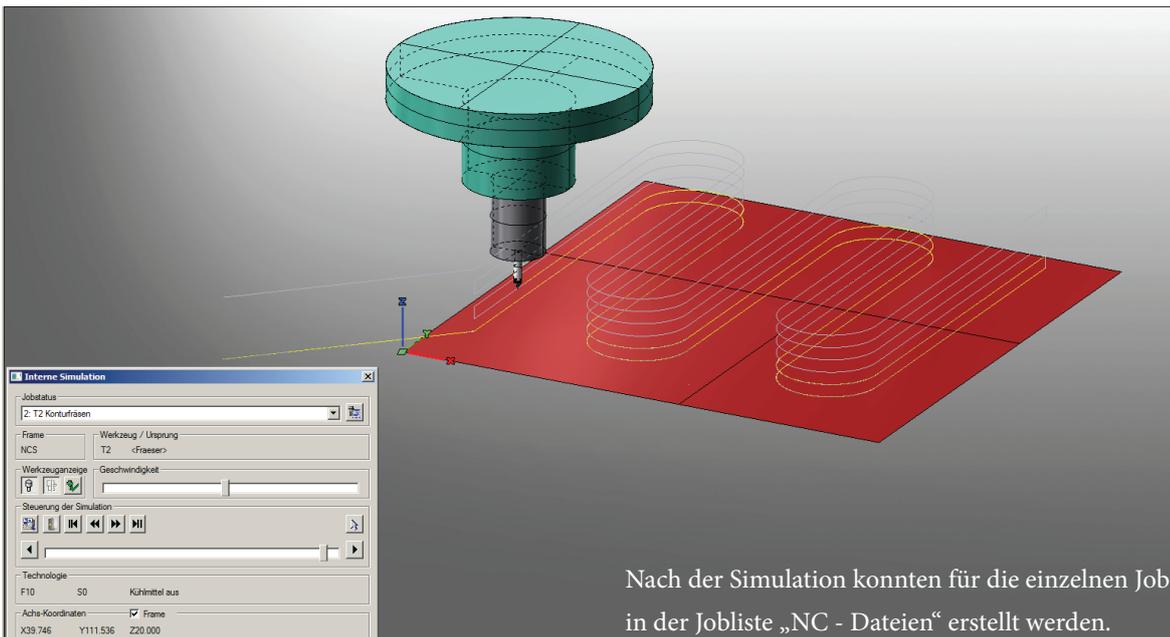


Bild 178. Simulation und NC-Datei

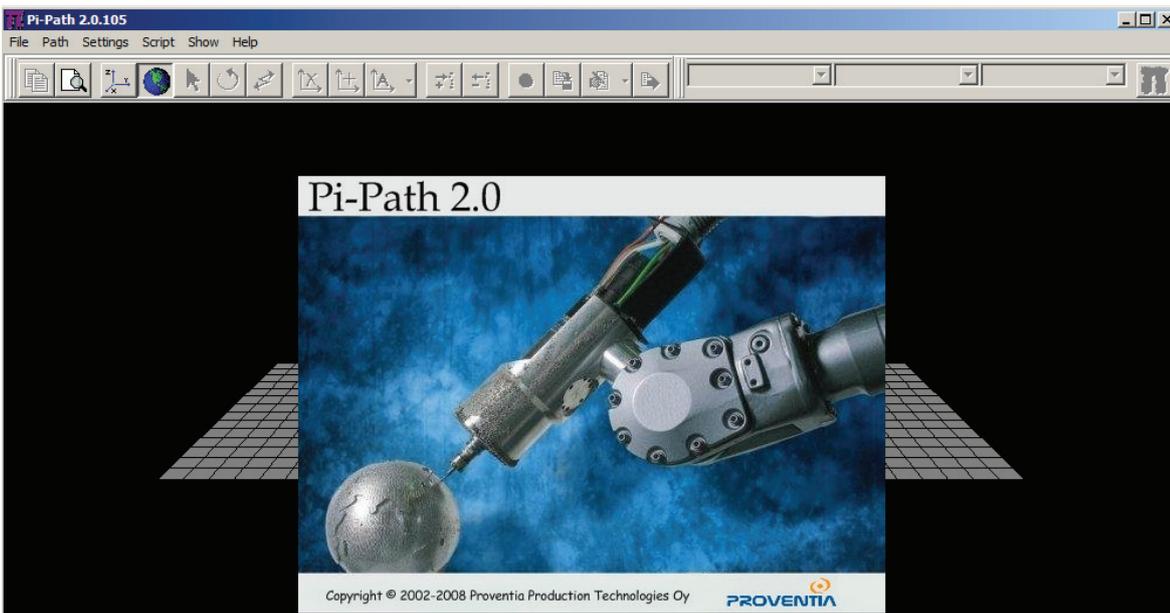
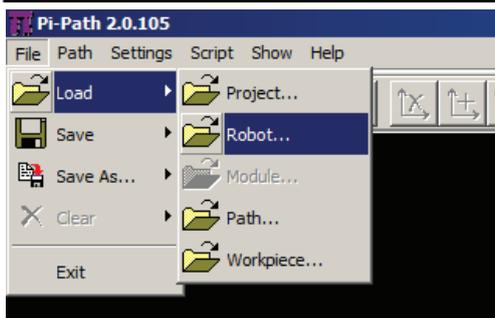


Bild 179. Kollisionskontrolle PiPath



Pi Path diente als Kollisionskontrolle. Es ermöglichte ein vorzeitiges Simulieren der gesamten Roboteranlage und eine Änderung der Position des Roboters auf der Linearachse, sowie auf den einzelnen Roboterachsen. Um eine Simulation zu starten, mussten vorerst Roboter, Aufspanntisch und Fräsbahnen geladen werden. Zusätzlich sollten Workobjekt und Werkzeug für die richtige Position am Aufspanntisch ausgewählt werden.

Bild 180.

Überprüfung der Bahnen im Pi Path.

Bild 180. Laden von Roboter und Aufspanntisch

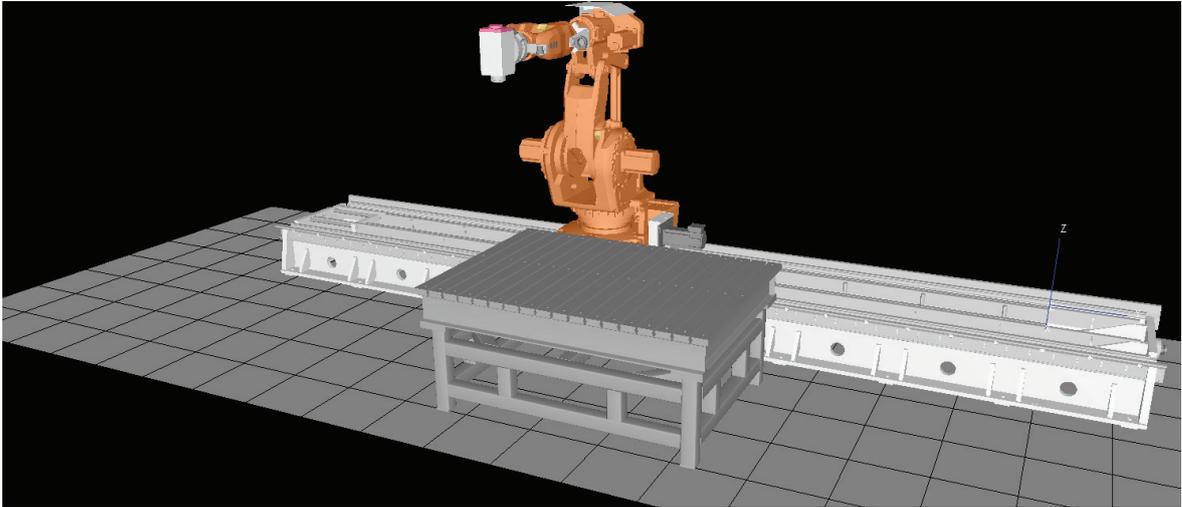


Bild 181. links, Laden von Fräsbahnen

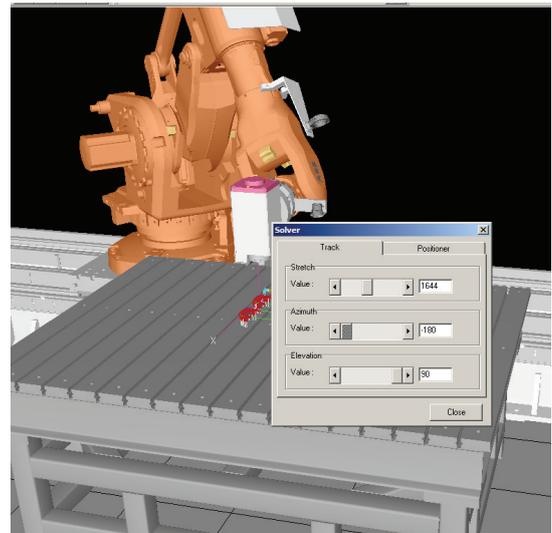
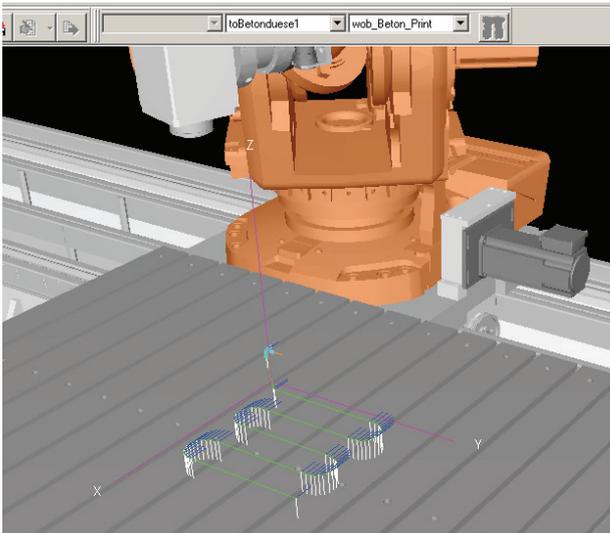
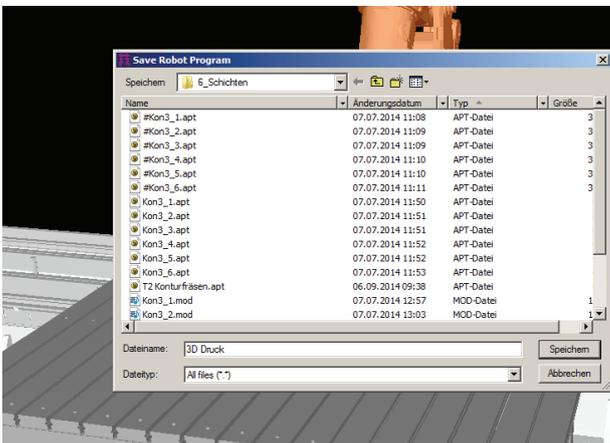


Bild 182. rechts, Ausrichten des Roboters auf der Linearachse

Bild 183. Speichern .mod-File



Durch die Simulation wurden mögliche Kollisionen bemerkt, woraufhin das System eine Fehlermeldung signalisierte. Beim Eintreten einer Kollision konnte durch Manövrieren eines Solvers, die Stellung der Roboterachsen und der Standort des Roboters auf der Linearachse verändert werden. Bei einer positiven Simulation wurde die Datei durch den Befehl *Save Robot Programm* in eine .mod Datei umgewandelt.

Um die .mod-files auf die Robotersteuerung zu speichern, mussten dort noch einige Positionen manuell verändert werden:

- Startposition
- Spindel aus
- Konstante Geschwindigkeit
- Luft aus
- Haltepunkte löschen (WaitTime)
- Werkzeug überprüfen

```

1 1 1
2 VERSION:1
3 LANGUAGE:ENGLISH
4
5
6 MODULE Rom2_2
7
8 PROC DrivePath()
9 AccSet( 5,5)
10 WaitTime (InPos, 1)
11 TuneReset:
12 (Mechanism 5:
13 |SpindleOn)
14 (SetTool G05T100(Extern1), 1)
15 (SetTool G05T100(Extern1), 1)
16
17 vProcess.v_tool= 200;
18 vProcess.v_tool= 100;
19
20 MoveJ [(-249,9879,-349,9941,300,0)60], [0,0,0,0,0,0], [0,14943813,0,0,98877108,0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3750,0000,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
21 MoveJ [(-100,0000,-100,0000,10,0)200], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
22 vProcess.v_tool= 200;
23
24 vProcess.v_tool= 100;
25
26 vProcess.v_tool= 100;
27
28 vProcess.v_tool= 100;
29
30 TuneReset:
31
32 MoveJ [118,2226,18,2306,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
33 MoveJ [127,9572,28,1719,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
34 MoveJ [135,4539,39,8994,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
35 MoveJ [139,4237,53,1532,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
36 MoveJ [139,9990,63,3320,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
37 MoveJ [139,9990,116,7791,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
38 MoveJ [143,4214,143,8369,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
39 MoveJ [149,8861,157,2599,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
40 MoveJ [156,9652,189,7919,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
41 MoveJ [167,3778,180,6994,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
42 MoveJ [179,5800,189,3849,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
43 MoveJ [182,8359,189,4987,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
44 MoveJ [106,4487,198,9730,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
45 MoveJ [1138,0870,199,0517,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
46 MoveJ [1246,6477,199,6492,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
47 MoveJ [139,9483,189,6135,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
48 MoveJ [124,0322,179,33949,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
49 MoveJ [1183,6931,166,2087,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
50 MoveJ [139,9749,151,1001,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
51 MoveJ [1196,6686,139,2416,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
52 MoveJ [1201,4450,104,1410,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
53 MoveJ [1206,2748,88,3087,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
54 MoveJ [1214,6939,78,2529,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;
55 MoveJ [1226,4110,60,1632,9,9965], [0,0,0,0,0,0], [0,0,0,0,0,0], [0,0,-1,0], [3521,8883,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009], vProcess.z1,toBetonduese(Wob);=wob_Beton_Print;

```

Bild 184. Änderungen von Positionen im Robotercode

Hochladen der .mod-files auf die Robotersteuerung.

| Name | Typ | Datum | Größe | Typ |
|--------------|-----|--------------|--------|-----|
| 01_versuch | mod | Jul 8 12:42 | 618 B | |
| 02_Schleifen | mod | Sep 8 09:38 | 618 B | |
| 03_Park | mod | Jan 20 09:19 | 210 B | |
| 04_Park | mod | Jan 20 09:17 | 740 B | |
| 05_Park | mod | Jan 20 10:38 | 760 B | |
| 06_Park | mod | Jan 20 10:35 | 1010 B | |
| 07_Park | mod | Jan 20 10:38 | 810 B | |
| 08_Park | mod | Jan 20 10:02 | 2310 B | |
| 09_Park | mod | Jan 20 08:37 | 310 B | |
| 10_Park | mod | Jan 20 09:24 | 1010 B | |
| 11_Park | mod | Jan 20 09:16 | 1710 B | |
| 12_Park | mod | Jan 20 20:29 | 2310 B | |
| 13_Park | mod | Jan 20 11:07 | 1010 B | |
| 14_Park | mod | Jan 14 14:24 | 1010 B | |
| 15_Park | mod | Jan 20 12:20 | 1710 B | |
| 16_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 17_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 18_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 19_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 20_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 21_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 22_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 23_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 24_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 25_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 26_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 27_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 28_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 29_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 30_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 31_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 32_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 33_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 34_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 35_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 36_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 37_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 38_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 39_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 40_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 41_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 42_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 43_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 44_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 45_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 46_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 47_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 48_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 49_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 50_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 51_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 52_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 53_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 54_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 55_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 56_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 57_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 58_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 59_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |
| 60_Park | mod | Jan 20 12:20 | 2310 B | |

Bild 185

Nach dem erfolgreichen Hochladen der .mod Dateien wurden die erstellten Daten hintereinander geschichtet und als Routinen gespeichert. Es entstand eine Prozesskette, welche die Bahnen konstant hintereinander und ohne Verzögerungen oder Halten abarbeitete.

Bild 186. links, Laden der Dateien



Bild 187. rechts, Laden der Dateien

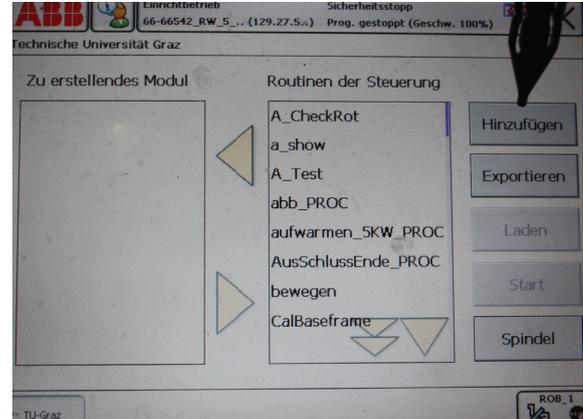


Bild 189. links, Erstellen von Routinen und Schichten der einzelnen Dateien.

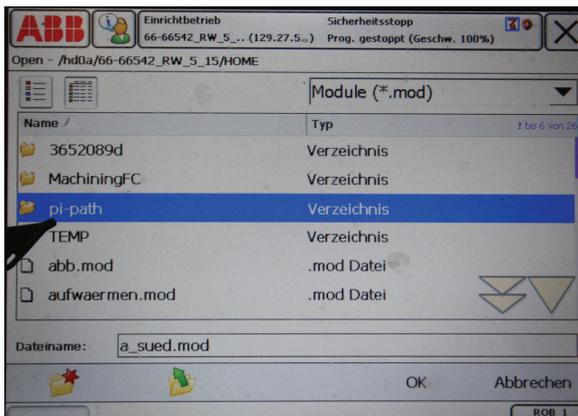


Bild 190. rechts

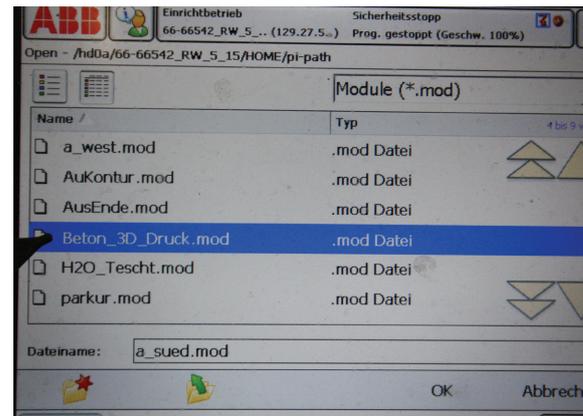


Bild 191. links, Auswahl von Dateien

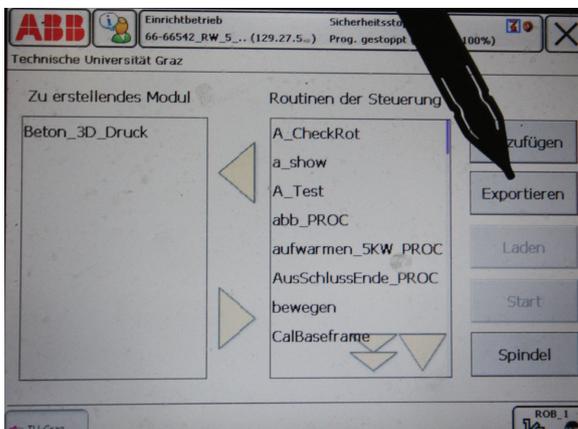
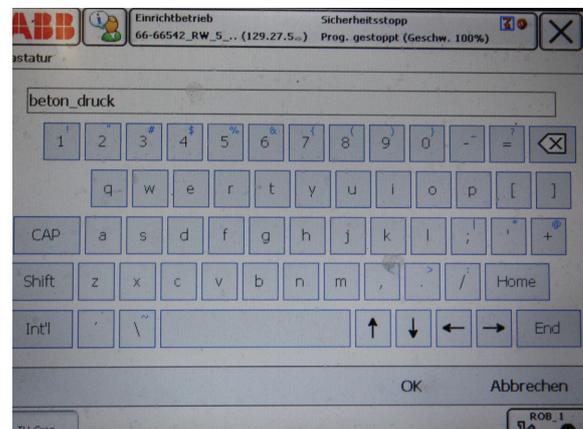


Bild 192. rechts, Erstellen von Routinen und Schichten der einzelnen Dateien.



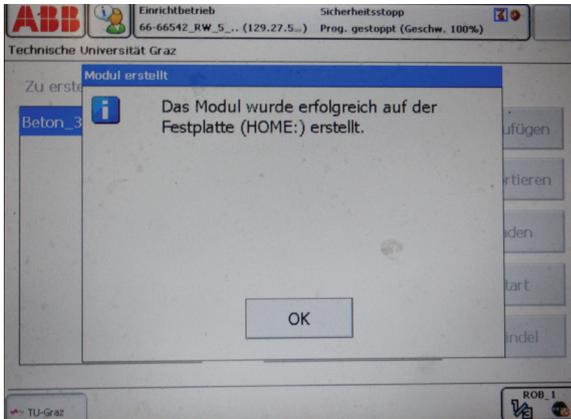


Bild 193. links

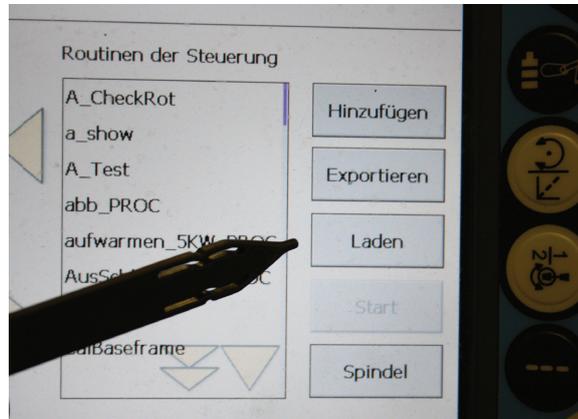


Bild 194. rechts

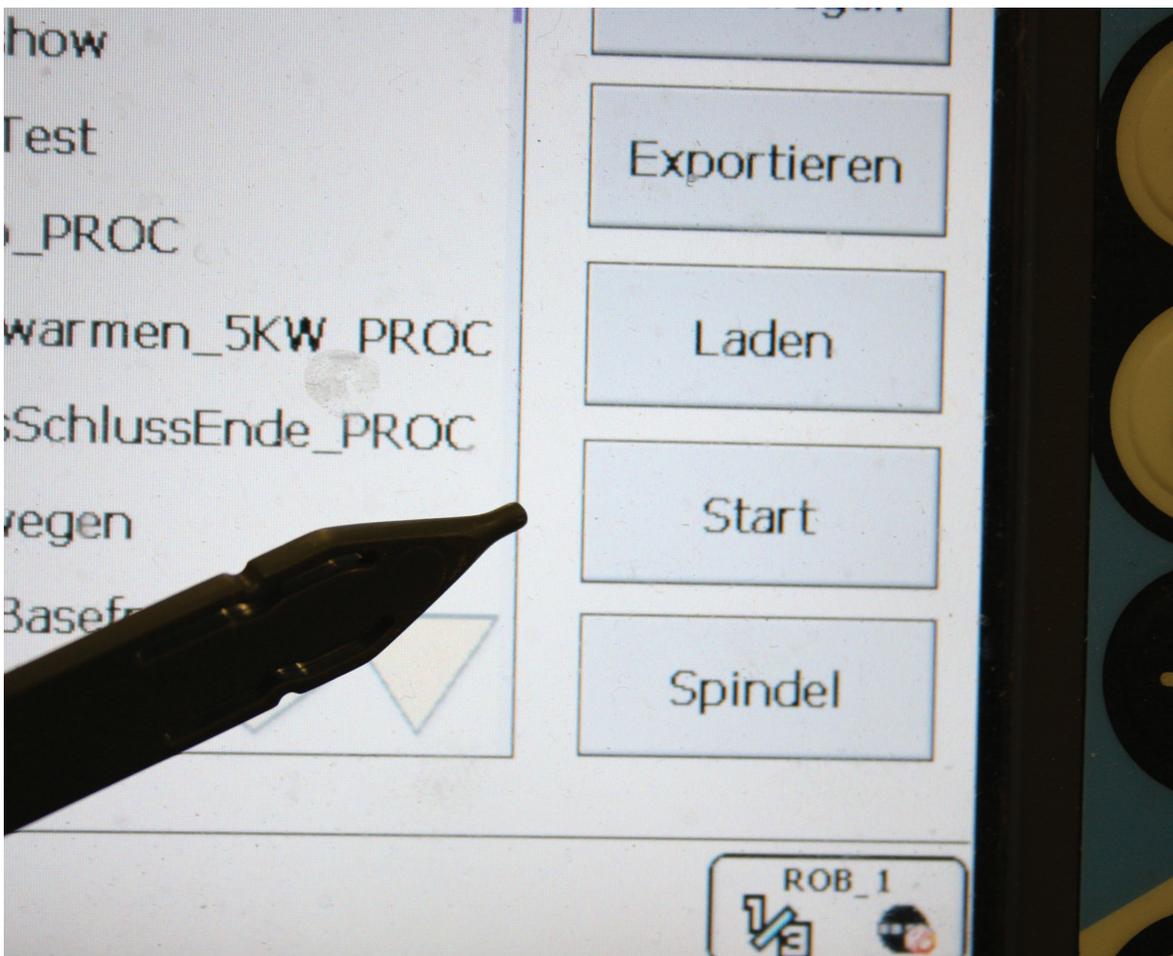


Bild 195.

NÄCHSTER SCHRITT: ROBOTER STARTET

ROBOTERSTEUERUNG IN ECHTZEIT

(RHINO, GRASSHOPPER, HAL)

Kurzbeschreibung Ablauf:

- Einmessen des Aufspanntisches, sowie der Druckdüse und Abstimmung der Daten in Hal. (Angaben zum Roboter, Werkzeug und Workobjekt)
- Erstellen der CAD Daten im Modellierprogramm Rhinoceros und Zerlegung in Polylinien.
- Laden von Grasshopper und HAL.
- Eingabe der Kurven.
- Unterteilung der Kurven in Targets.
- Reorientierung der Targets für Ansteuerung des Roboters im Raum.
- Ermittlung der Targets.
- Angaben zu den Aktionen (Speed, Zone, ...); Angaben zum Werkzeug
- Simulieren der Roboterbahnen und Generierung des Codes.
- Speichern des Codes als .mod Datei und Übertragung auf die Robotersteuerung mittels USB Stick.
- Laden der .mod Datei und starten.

Erstellen der CAD Daten und Zerlegung in Polylinien

Der Prototyp wurde im Rhino modelliert und in Polylinien zerlegt. Die Polylinien wurden in Bearbeitungsschritte mit vier bis acht gestapelten Bahnen unterteilt. Jeder Bearbeitungsschritt brauchte eine Zu- und Ablaufbahn, da die Druckdüse immer am selben Ausgangspunkt startete. Die Verteilung der einzelnen Druckbahnen variierte in der Höhe zwischen 5 und 10mm.

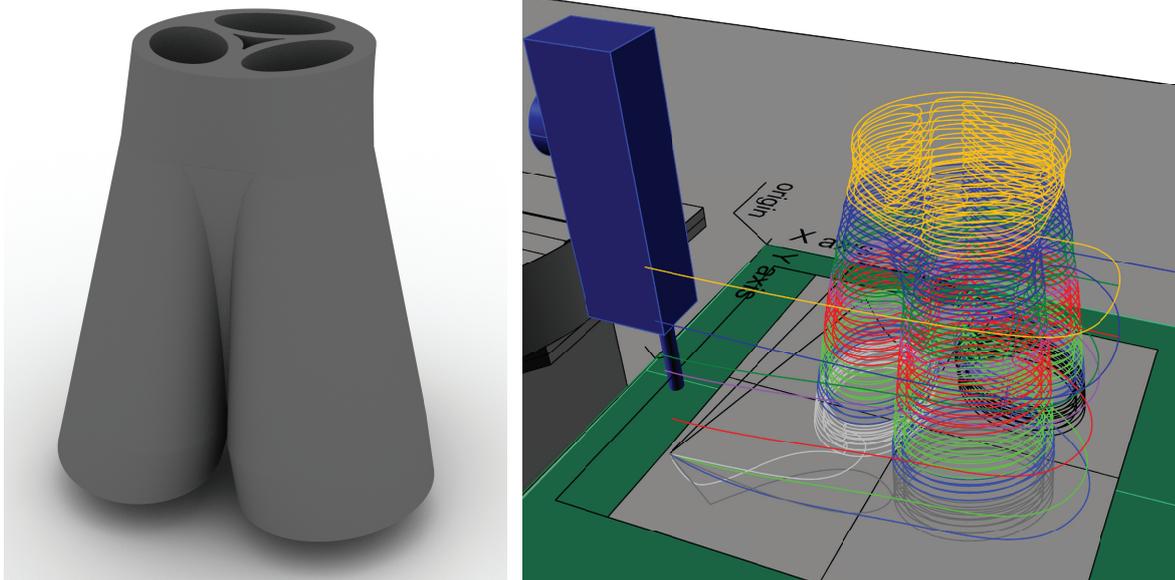


Bild 196. links, Entwurf des Betonknotens

Bild 197. rechts, Druckbahnen in der Hal-Simulation

Ertstellen der Roboterbahnen in GRASSHOPPER und HAL

Der nächste Schritt fand bereits in der Software Grasshopper statt und enthielt die Programmierschritte namens Hal, die extra für die Robotersteuerung im Grasshopper erstellt wurden.

Die im Rhino gefertigten Linien wurden mit dem Befehl *SET ONE CURVE* ins Grasshopper importiert und konnten somit dort verwendet werden. Der Programmierschritt *WOBJ.PLANE IDEAL UND REAL* bewirkte die Ausrichtung des idealen Tisches zum realen. Die Robotersteuerung befahl dem Roboter, sich von Punkt A nach Punkt B, nur entlang von Geraden zu bewegen. Das Abfahren von Radien war im Sinne von Kurven nicht möglich. Dadurch wurden die Radien und Kurven in Unterpunkte (Targets) geteilt. Je kleiner die Abstände zwischen den Targets, desto kleiner ist die Abweichung zur realen Kurve.

Im Programmierschritt *REORIENTIERUNG DER TARGETS ZUR ANSTEUERUNG MIT DEM ROBOTER IN 90° SCHRITTEN* definierte man die Ausrichtung des Roboterarmes zu den Targets.⁷⁷

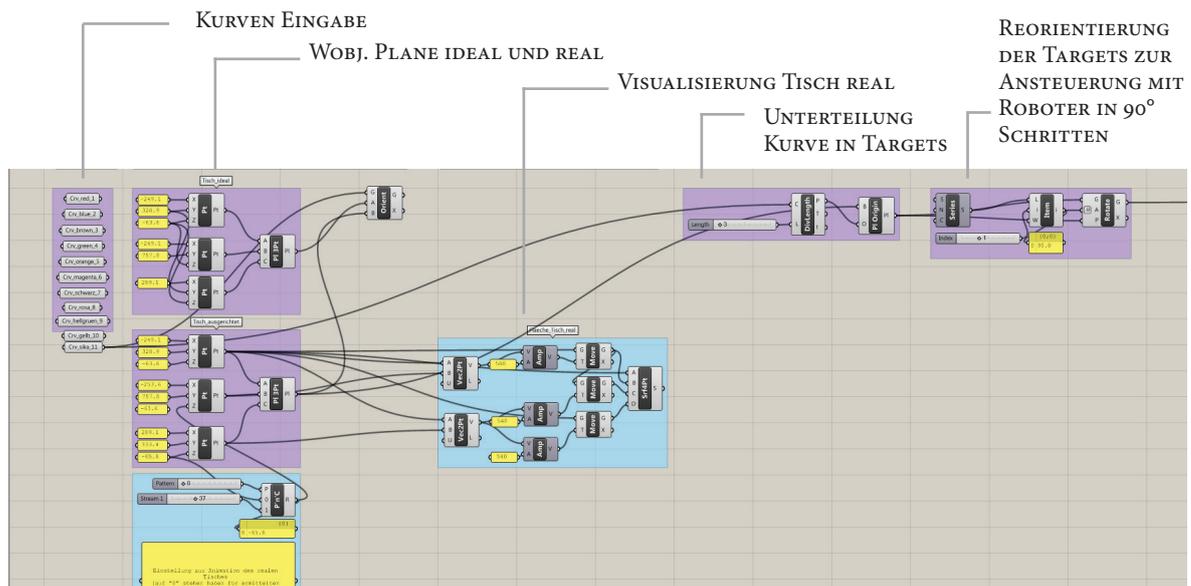


Bild 198. Roboterprogrammierung mit Hal

Mittels eines regulierbaren Solvers konnte die Position der einzelnen Targets geprüft werden. Die Angaben zum Roboter waren durch die Auswahl des richtigen Roboter-Items definiert. Das Werkzeug musste manuell vermessen und das work object mit dem Roboter angetastet werden. Die Aktion *Speed* kennzeichnete die Verfahrensgeschwindigkeit des Roboterarms. Man konnte sich zwischen *Code generieren* und *Code simulieren* entscheiden.⁷⁸

⁷⁸ Interview mit Felix Amtsberg, geführt von Jürgen Holl, Graz, 9. September 2014

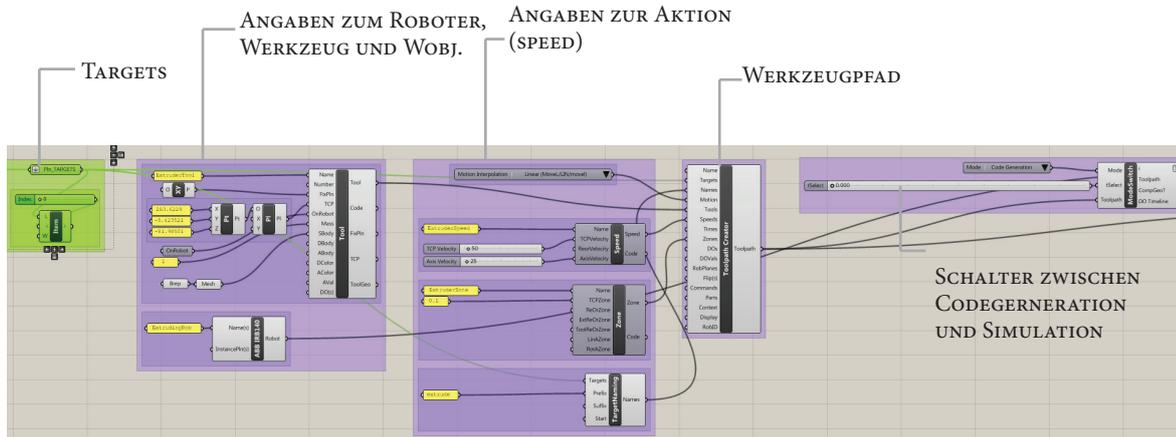


Bild 199. Roboterprogrammierung mit Hal

Bei der Codegeneration wurden im IK Solver aus den Targets Achsen mit richtiger Position erzeugt. Der Postprozessor verarbeitete die Achsstellungen und der Quick Time Manager berechnete die Daten, die unter dem Robotercode aufgelistet wurden. Das Ergebnis konnte man in eine .mod Datei speichern. Mit einem USB Stick wurde der Code auf die Steuerung des Roboters übertragen. Der Ladevorgang funktionierte ident mit der Programmierung der Fräsbahnen.⁷⁹

⁷⁹ Interview mit Felix Amtsberg, geführt von Jürgen Holl, Graz, 9. September 2014

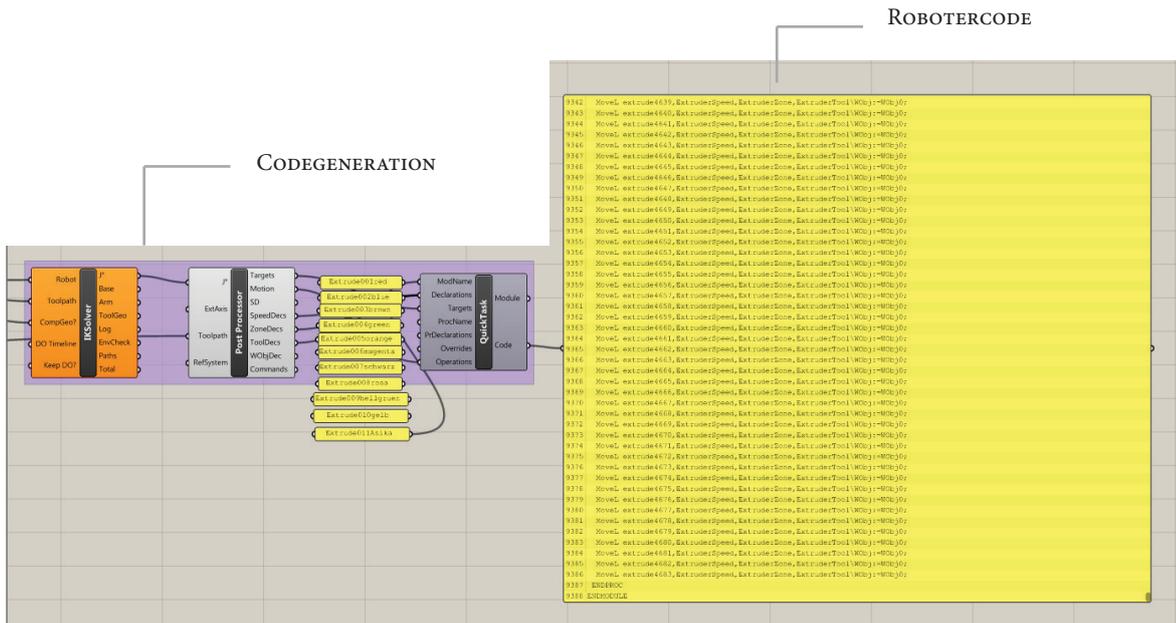


Bild 200. Generierung des Robotercodes

3. PRAKTISCHE UMSETZUNG VON COEBRO | BETON 3D DRUCKEN

3.1. PLANUNG DER DRUCKTECHNOLOGIE

- ZIELESETZUNG UND UMFANG DER TECHNOLOGIE
- 3D DRUCK - MASSSTABS - QUALITÄTS - DIAGRAMM
- AUSEINANDERSETZUNG MIT SPRITZBETON
- BETONCHEMIE
- SPRITZBETONVERSUCHE IM VERSUCHSSTOLLEN HAGERBACH (CH)
- PROJEKTPARTNERSCHAFT MIT DER SIKA AG SCHWEIZ
- ZEITPLAN
- MINISHOT - DRUCKTECHNOLOGIE

3.2. PLANUNG DER AUTOMATISIERUNGSEINHEIT

DEFINITION

- 3.2.1. PLANUNG DER VERSUCHSABLÄUFE UND PROTOTYPEN
 - ENTWURF UND AUFBEREITUNG DER CAD-DATEN FÜR VERSUCHSBLOCK I IM ROBOTER DESIGN LABOR (ITE)
 - ENTWURF UND AUFBEREITUNG DER CAD-DATEN FÜR VERSUCHSBLOCK II IM ABB ROBOTER LABOR (ITE)
- 3.2.2. ROBOTERSTEUERUNG
 - MITTELS FRÄSBAHNEN
 - MITTELS PROGRAMMIERUNG IN ECHTZEIT

3.3. VERSUCHSABLAUF_KONSTRUKTION DER PROZESSKETTE

ÜBERBLICK

- DIGITALE PROZESSKETTE - GEOMETRIEAUFBEREITUNG
- ROBOTERSTEUERUNG
- BETONAUFBEREITUNG
- MATERIALFÖRDERUNG | DÜSENTECHNOLOGIE
- ROBOTER
- DRUCKVERSUCHE

3.4. BETON 3D DRUCKEN | HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN

- VERSUCHSBLOCK I (ROBOTER DESIGN LABOR)
 - VERSUCHSREIHE I: ABFAHREN VON GERADEN UND RADIEN
 - VERSUCHSREIHE II: SCHICHTEN VON BAHNEN
 - VERSUCHSREIHE III: ABFAHREN VON RADIEN UND SCHICHTEN
 - VERSUCHSREIHE IV: DRUCKEN DES SIKA SCHRIFTZUGES
- MATERIALVERSUCHE
- VERSUCHSBLOCK II (ABB ROBOTER LABOR)
 - BETONKNOTEN
 - DRUCKEN AUF GEKRÜMMTE FLÄCHEN
 - SIKA SCHRIFTZUG

3.3. VERSUCHSABLAUF KONSTRUKTION DER PROZESSKETTE

ÜBERBLICK

- DIGITALE PROZESSKETTE - GEOMETRIEAUFBEREITUNG
- ROBOTERSTEUERUNG
- BETONAUFBEREITUNG
- MATERIALFÖRDERUNG | DÜSENTECHNOLOGIE
- ROBOTER
- DRUCKVERSUCHE

ÜBERBLICK: VERSUCHSABLAUF | KONSTRUKTION DER PROZESSKETTE

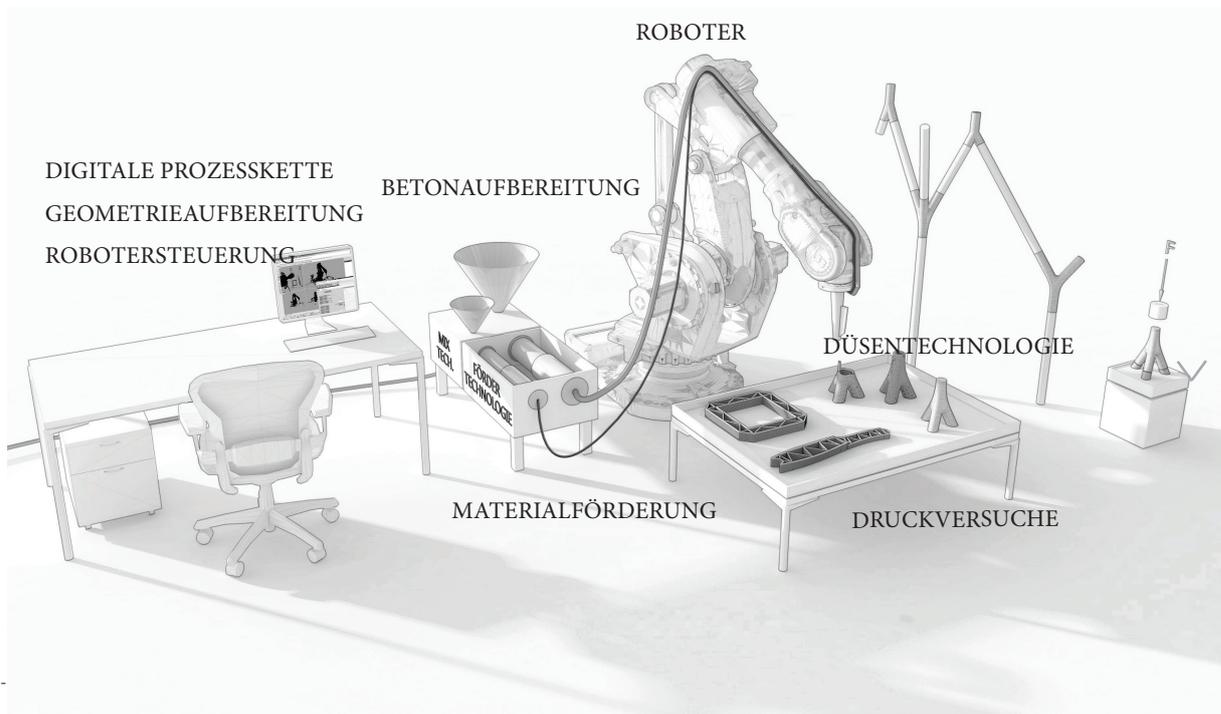


Bild 201. Theoretische Konstruktion der Prozesskette.



Bild 202. Realisierter Ablauf der Prozesskette

In diesem Kapitel wird der Versuchsablauf und die benötigten Prozesse Schritt für Schritt beschrieben. Der Leser erhält einen kompakten Überblick von den zusammenhängenden Technologien, vom Entwurf bis zum realen Bauteil, um sich von der Herstellung im Labor ein Bild zu machen.

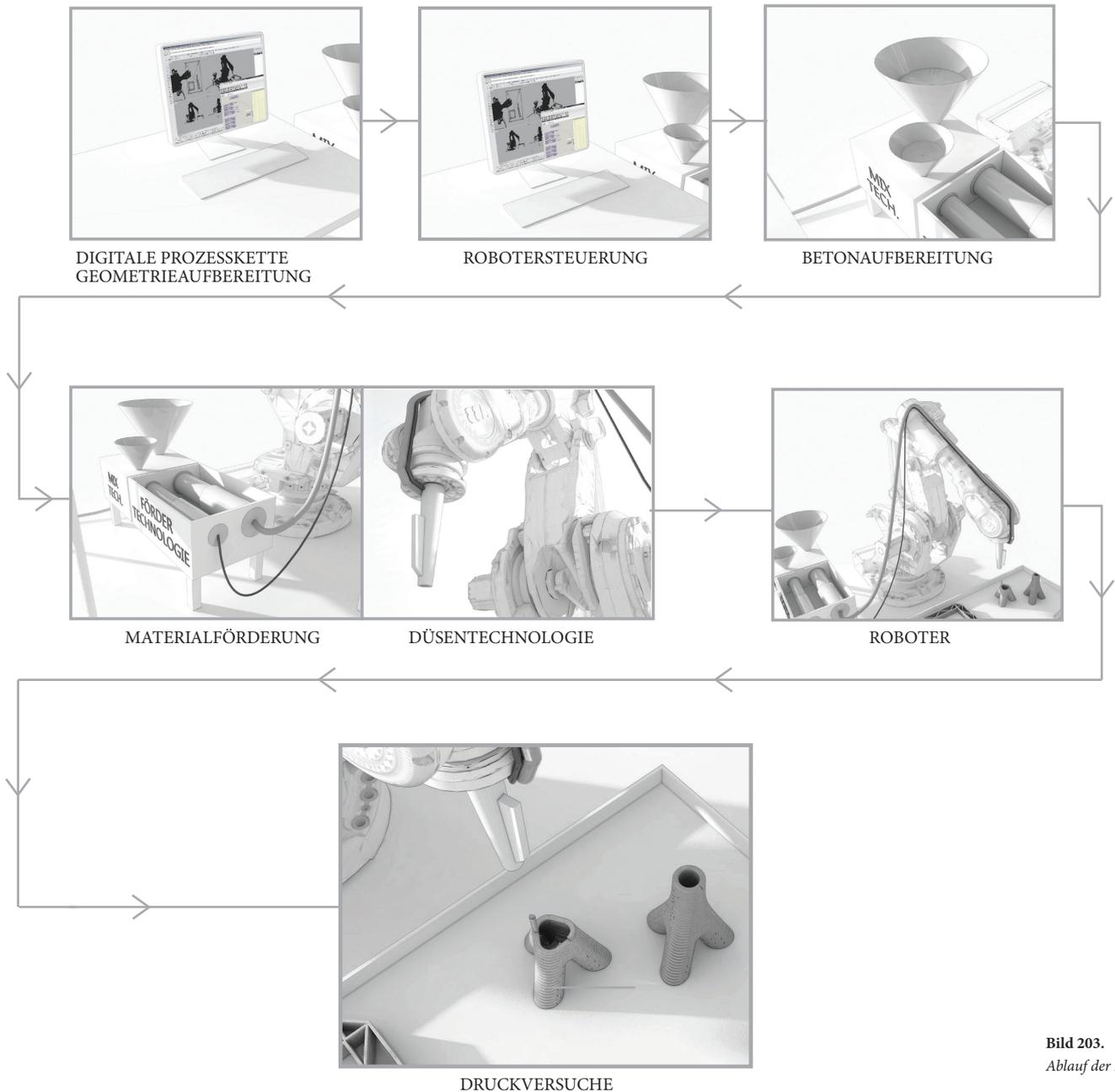


Bild 203.
Ablauf der Prozesskette



GEOMETRIEAUF-
BEREITUNG



ROBOTERSTEUERUNG



BETONAUFBEREITUNG



MATERIALFÖRDERUNG



DÜSENTECHNOLOGIE



ROBOTER



DRUCKVERSUCHE

- Vor dem Start benötigt man die Datei eines CAD Objektes.
- Die Geometrie des Bauteils musste dem Beton 3D Druck angepasst und die bereits gewonnenen Erkenntnisse und Regeln berücksichtigt werden.
- Das 3D Modell wurde in Layer zerlegt und in Leitlinien umgewandelt.
- Die Leitlinien mussten eine Zu- und Ausfahrt, sowie eine durchgehende Linie aufweisen.



Bild 204. Entwurf Betonknoten

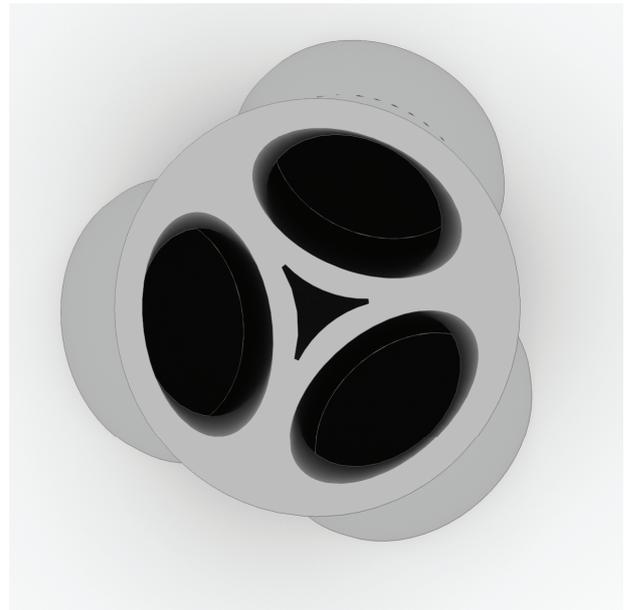


Bild 205. Entwurf Betonknoten

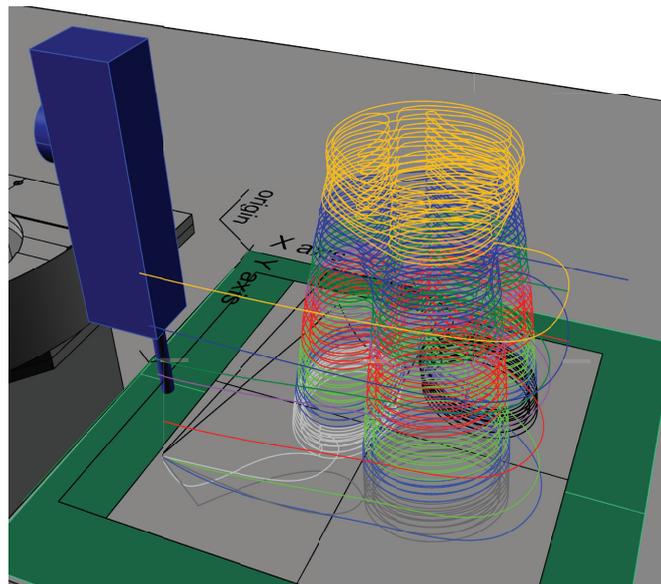


Bild 206. Konstruktion
der Druckbahnen

ERGEBNIS .MOD FILES

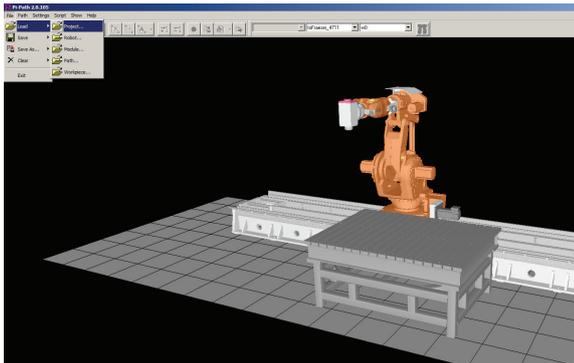


Bild 208. Kollisionskontrolle im PiPath

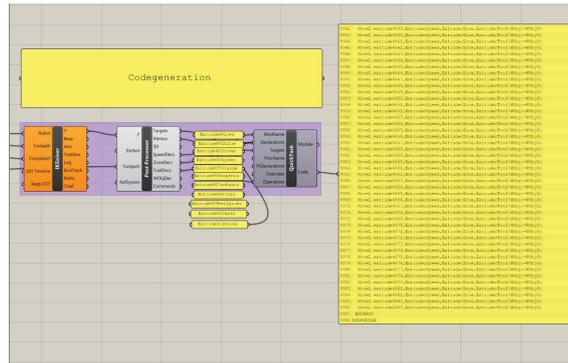


Bild 209. Generierung des Robotercodes

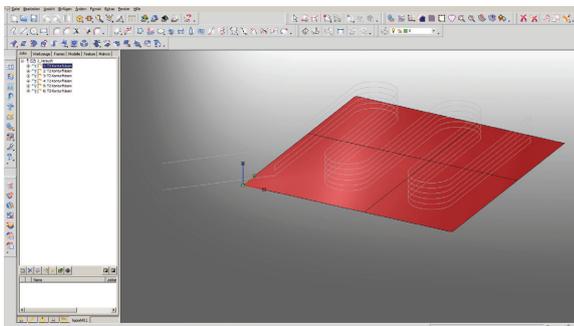


Bild 206. Fräsbahnen im HyperMill

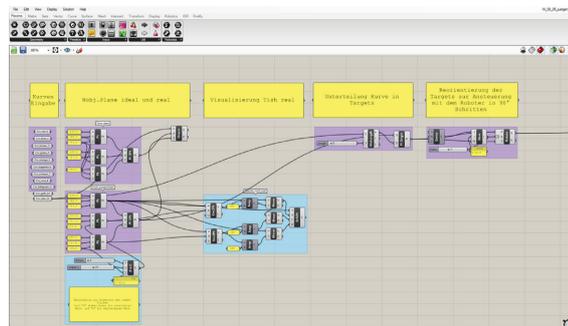


Bild 207. Robotercode mit Hal

FRÄSBAHNEN
(RHINO, ROBOT STUDIO, HYPERMILL, PiPATH)

**PROGRAMMIERUNG
IN ECHTZEIT**
(RHINO, GRASSHOPPER, HAL)

ROBOTERSTEUERUNG MITTELS:



GEOMETRIE-
AUFBEREITUNG



ROBOTERSTEUERUNG



BETONAUFBEREITUNG



MATERIALFÖRDERUNG



DÜSENTECHNOLOGIE



ROBOTER



DRUCKVERSUCHE



GEOMETRIEAUFBE-
REITUNG



ROBOTERSTEUERUNG



BETONAUFBEREITUNG



MATERIALFÖRDERUNG



DÜSENTECHNOLOGIE



ROBOTER



DRUCKVERSUCHE

In diesem Ablauf wurden sowohl manuelle als auch maschinelle Arbeitsschritte durchgeführt.

MANUELL

Händisch steuerte man die Dosierung des Druckmaterials, was stark von der Betonchemie beeinflusst wurde. Bereits kleinste Abweichungen des Mischverhältnisses führten zu verheerenden Auswirkungen auf die Materialförderung und das Drucksystem. Darüber hinaus waren klimatische Einflussfaktoren, wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit ausschlaggebend für die Konsistenz der Betonmischung.

Die Mischung enthielt fünf unterschiedliche Bestandteile.

- Zement
- Zuschlagstoffe (Gestein)
- Filler (Thixotropiermittel)
- Wasser
- Sika 3 (Verzögerer)

An der Düse konnte nach Bedarf ein Beschleuniger beigemischt werden.

- Sigunit-L BGB

Bild 210. Bestandteile des Druckmaterials



ZEMENT
Holcim Normo 4
CEM|42,5 N
Portlandzement

Bild 211.



GESTEIN
max. Korngröße 1mm

Bild 213.



THIXOTROPIERMITTEL
FILLER

Bild 215.



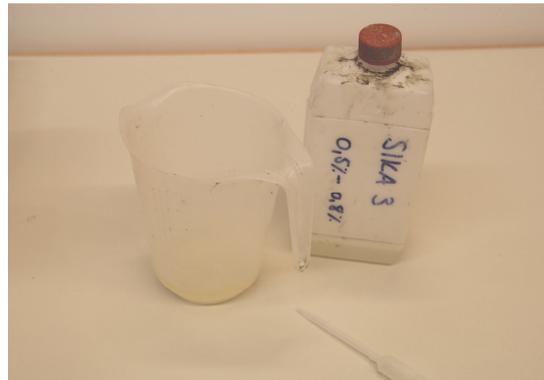
WASSER
(Leitungswasser)

Bild 212.



VERZÖGERER
SIKA 3
0,5 - 0,8%

Bild 214.



BESCHLEUNIGER
Sigunit-L BGB
SP 14-001/1

Bild 216.



GEOMETRIE-
AUFBEREITUNG



ROBOTERSTEUERUNG



BETONAUFBEREITUNG



MATERIALFÖRDERUNG



DÜSENTECHNOLOGIE



ROBOTER



DRUCKVERSUCHE



GEOMETRIE-
AUFBEREITUNG



ROBOTERSTEUERUNG



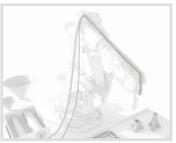
BETONAUFBEREITUNG



MATERIALFÖRDERUNG



DÜSENTECHNOLOGIE



ROBOTER



DRUCKVERSUCHE

MASCHINELLES MISCHEN

Das Mischen des Mörtels geschah über den VARIMIXER von BÄR. Das Handling dieser Maschine war recht simpel. Dieser Mixer hatte drei Bestandteile: die Rührmaschine und den abnehmbaren Mixer, sowie den Rühr-Knetkessel.



Bild 217. Varimixer von Bär



Bild 218. Varimixer von Bär

Den Mischprozess startete man mit dem Vermengen von Zement, Gestein und Filler. Dieser Prozess sollte 30 Sekunden dauern und eine Geschwindigkeit von 30% aufweisen.

Der nächste Schritt beinhaltete das Beigeben von Wasser und Beschleuniger. Vorerst wurde die Hälfte der Flüssigkeit eingerührt und 30 Sekunden durchgemischt.

Bild 219. Druckmaterial vor dem Mischen



Bild 220. Geschwindigkeitsanzeige des Mixers



Daraufhin wurde die restliche Flüssigkeit eingefüllt und mit 50% Geschwindigkeit, 90 Sekunden ver-rührt.

Die Wahl des richtigen Mixers war ausschlaggebend für die Konsistenz des Mörtels. Nicht jeder Mixer konnte das gesamte Material im Rühr-Knetkessel erreichen. Andere wiederum ließen unerwünschte Luftblasen im Mörtel entstehen. Mit den einzelnen Mixeraufsätzen konnte man Kneten, Rühren und Schlagen. Die besten Ergebnisse erzielte der Aufsatz *Schlagen*.



SCHLAGEN

RÜHREN

KNETEN

Bild 221. Mixxeraufsätze



Bild 222. Mörtelmischung nach dem Mischen. Material kann für die Druckversuche verwendet werden.

**MISCHUNG
IST FERTIG**



GEOMETRIEAUFBEREITUNG



ROBOTERSTEUERUNG



BETONAUFBEREITUNG



MATERIALFÖRDERUNG



DÜSENTECHNOLOGIE



ROBOTER



DRUCKVERSUCHE



GEOMETRIEAUF-
BEREITUNG

MiniShot

MiniShot ist ein computergesteuertes Drucksystem für die Realisierung von Spritzbetonversuchen.



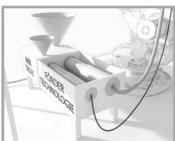
ROBOTERSTEUERUNG

Der Edelstahltrichter des Systems wurde mit dem bereits angerührten Beton aufgefüllt und mit Hilfe von Unterdruck in eine Druckkammer in Form eines Zylinders gesaugt. Durch mehrmaliges Wiederholen dieses Prozesses wurden unerwünschte Lufteinschlüsse im Beton vermieden. Ein Dreiwegeventil ermöglichte eine Regulierung der Austrittsrichtung. Somit gelang es nun auch, einen Druckschlauch anzuschließen, welcher als Verbindung zur Druckdüse fungierte. Das Material wurde daraufhin mittels des Druckzylinders durch den Schlauch gepresst und zur Düse befördert.



BETONAUFBEREITUNG

Die zweite Druckeinheit beinhaltet ein Beschleunigersystem, welches einen Betonbeschleuniger durch einen Druckzylinder und einen Druckschlauch zur Düse transportierte. Unmittelbar vor der Druckdüse wurde ein Zwischenstück, ein Adapterflansch, montiert. Dieser diente der Verbindung von Betonier- und Beschleunigerschlauch mit der Druckdüse. Um eine Vermischung des Beschleunigers mit dem Beton zu ermöglichen, wurde in die Düse ein Statikmischer eingesetzt.

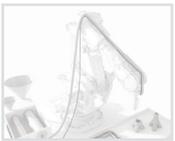
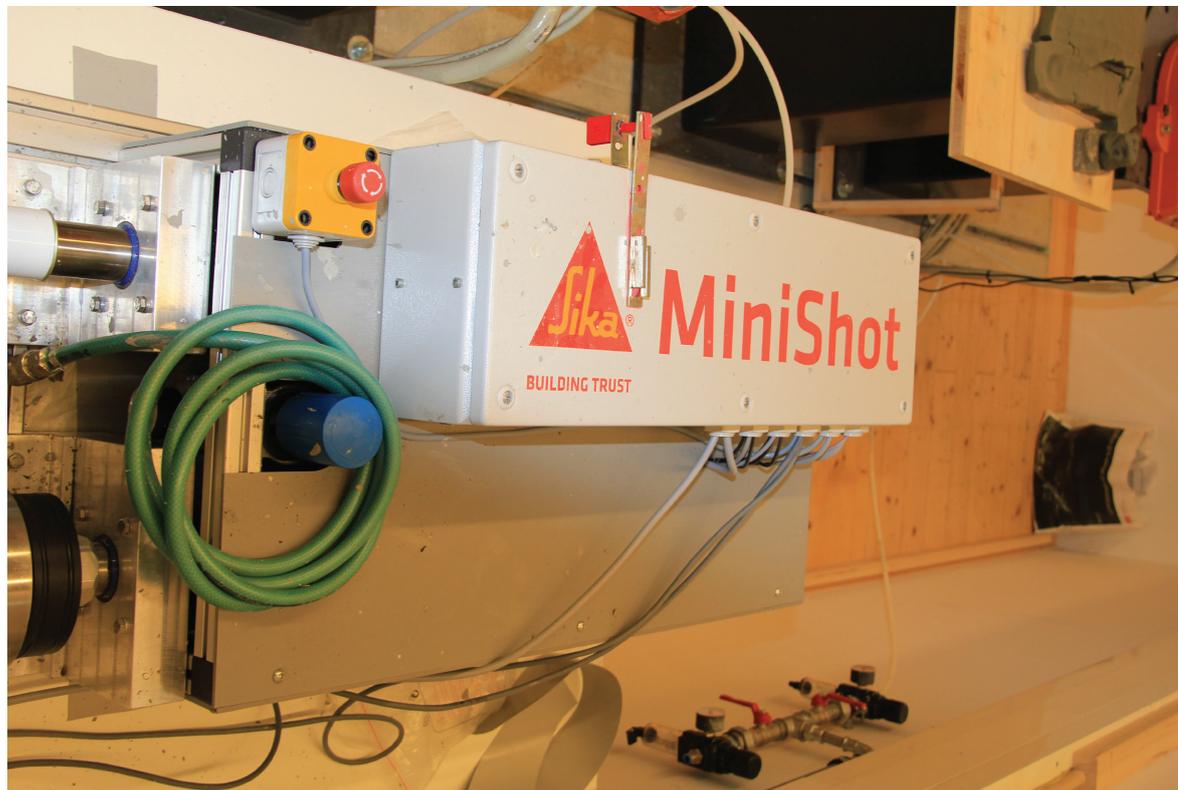


MATERIALFÖRDERUNG

Bild 224. MiniShot von der Sika AG



DÜSENTECHNOLOGIE



ROBOTER



DRUCKVERSUCHE



GEOMETRIEAUF-
BEREITUNG



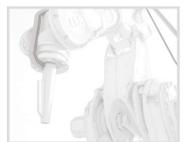
ROBOTERSTEUERUNG



BETONAUFBEREITUNG



MATERIALFÖRDERUNG



DÜSENTECHNOLOGIE



ROBOTER

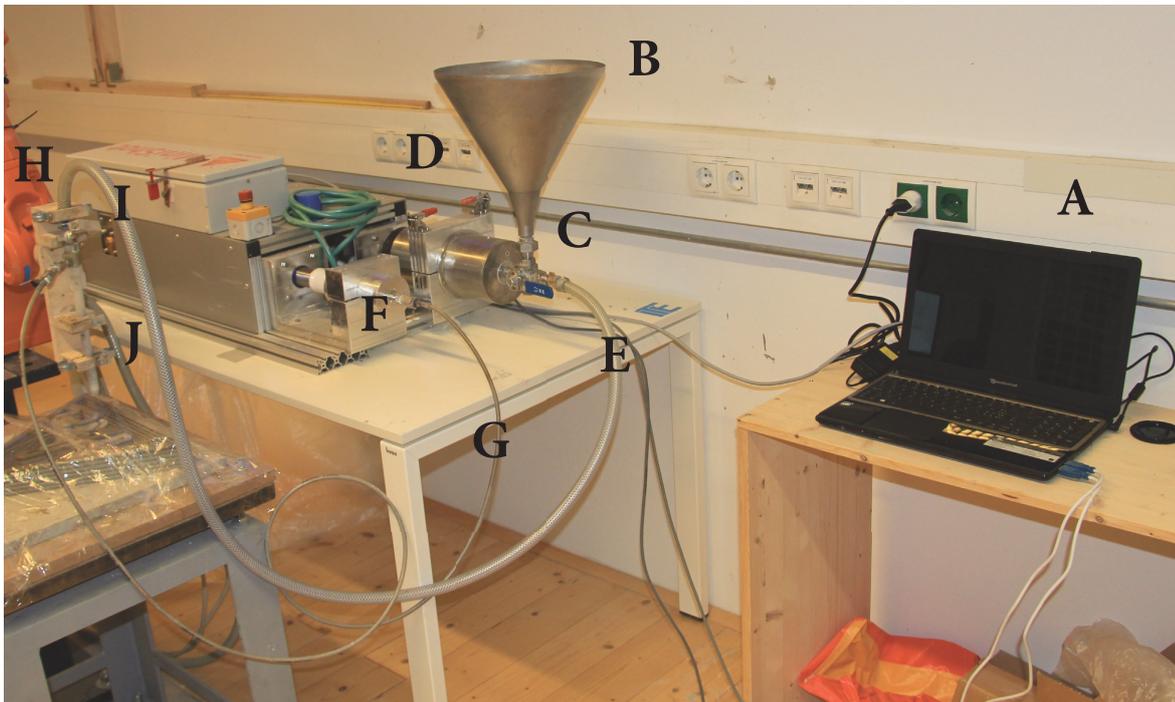


DRUCKVERSUCHE

Bestandteile für die MATERIALFÖRDERUNG:

- | | |
|--------------------------|-----------------------------------|
| A ... STEUERUNG MiniShot | F ... BESCHLEUNIGEREINHEIT |
| B ... FÜLLTRICHTER | G ... BESCHLEUNIGERSCHLAUCH |
| C ... DREI-WEGEVENTIL | H ... AUFSPANNUNG AM ROBOTERARM |
| D ... DRUCKEINHEIT | I ... ADAPTERFLANSCH |
| E ... DRUCKSCHLAUCH | J ... DRUCKDÜSE MIT STATIKMSICHER |

Bild 224. Material-Fördereinheit





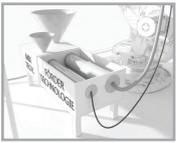
GEOMETRIEAUF-
BEREITUNG



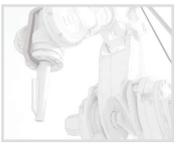
ROBOTERSTEUERUNG



BETONAUFBEREITUNG



MATERIALFÖRDERUNG



DÜSENTECHNOLOGIE



ROBOTER



DRUCKVERSUCHE

A . . . STEUERUNG MiniShot



Bild 226.



Bild 225. Steuerung der MiniShot

Die Steuerung der MiniShot Maschine basierte auf einer eigens für die MiniShot programmierten Software mit demselben Namen. Mit diesem Programm wurden sowohl Druckzylinder für den Mörtel, als auch Beschleunigerzylinder gesteuert.

Die Haupteinstellungen bezogen sich auf den Druckkolben. Es wurden die Geschwindigkeiten (g/min), der Anteil des Zements in Prozent und die Dichte der Mischung eingegeben. Die Beschleunigereinstellungen regulierten sich über den prozentuellen Anteil der Mörtelmischung. Die Bedienung war unkompliziert, da es nur vier Knöpfe für die Steuerung gab.

B . . . FÜLLTRICHTER und C . . . DREIWEGEVENTIL

Der Fülltrichter stellte die Zufuhreinheit des Materials dar. Hier füllte man die fertige Mischung ein, die anschließend in das Drucksystem/Druckkammer gesaugt wurde. Das gesamte System war aus Edelstahl gefertigt, um einer Oxidation des Materials durch die aggressiven Mörtelbestandteile entgegenzuwirken. Die Befestigung des Trichters geschah auf einem Dreiwegeventil, welches ein Steuern der Mörtelflussrichtung ermöglichte.

Fülltrichter - Druckkammer

Druckkammer - Druckschlauch

Fülltrichter - Druckschlauch - Druckkammer

Beim Umgang mit dem Ventil musste penibel darauf geachtet werden, dass die Stellung exakt eingehalten wurde. Ansonsten konnte Luft in das System gelangen, die beim Drucken zu unangenehmen Luftblasen führen würde. Um den erhärteten, unbrauchbaren Beton aus dem System zu entfernen, wurden Säurebäder zur Reinigung angewendet. Ein manuelles Säubern war mit hohem Aufwand verbunden. An den Verbindungsstellen wurden meist Teflonbänder zum Abdichten verwendet.

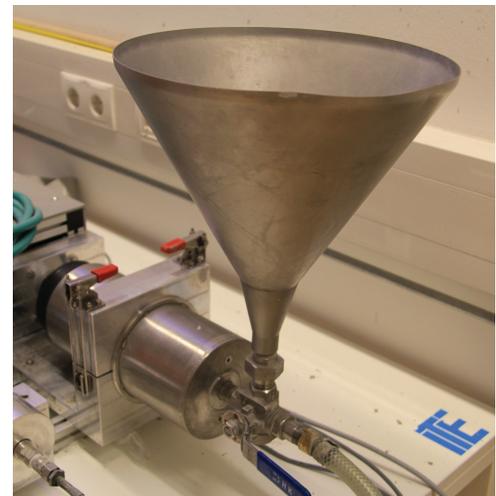
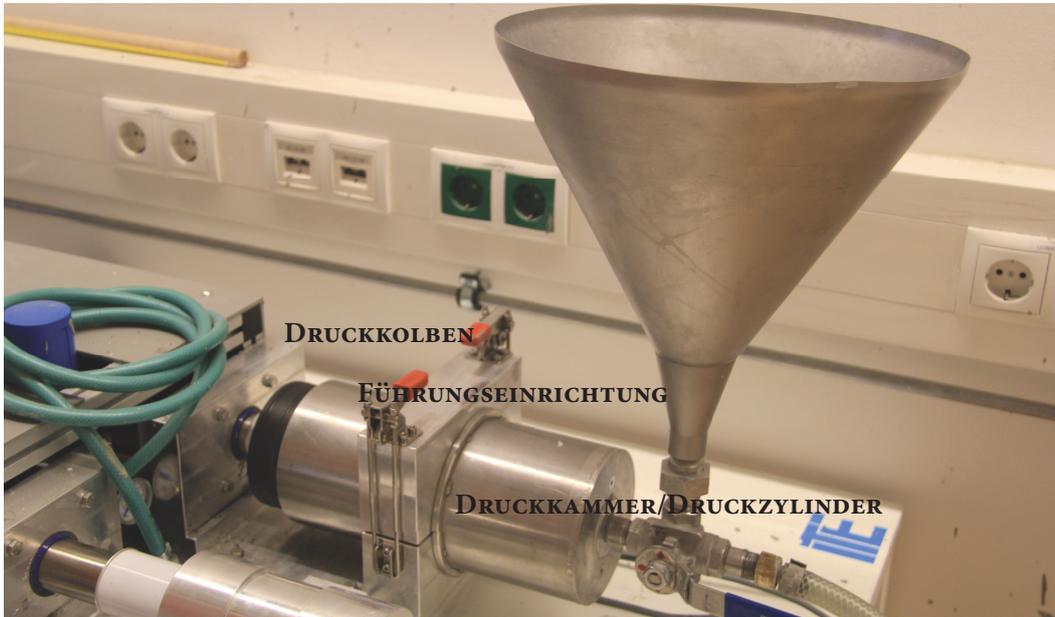


Bild 227. Fülltrichter

D... DRUCKEINHEIT

Bild 228.

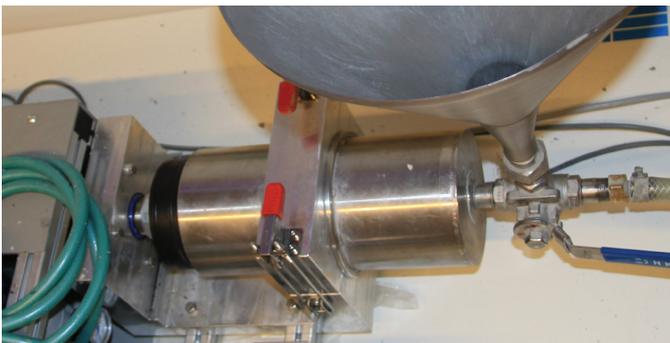


Die Druckeinheit bestand aus der Druckkammer, dem Druckkolben und der Führungseinrichtung. Die Druckkammer diente als Fassungsvermögen für das Druckmaterial. Sie wurde als Edelstahlzylinder mit zwei Öffnungen ausgeführt.

Der Druckkolben wurde als Fördermedium verwendet, um das Druckmaterial durch die Leitungen zu transportieren. Der Kolben bewegte sich hydraulisch und war somit exakt steuerbar. Die Kontaktflächen des Kolbens waren aus Hartgummi, um die Dichtwirkung zu verstärken. Darüber hinaus wurden die Kontaktflächen zusätzlich mit einem Gleit- oder Schmiermittel (Vaseline) versehen.

Die Führungseinrichtung ermöglichte eine definierte Befestigung des Druckzylinders an der Maschine. Zwischen der Druckkammer und dem Druckkolben durfte kein Widerstand auftreten. Der Zylinder wurde durch zwei idente Gegenstücke seiner selbst fixiert. Der Druck des Zylinders stieg bis 4500 mA an, bis das System als Vorsichtsmaßnahme stoppte. Am Anschlussgewinde zwischen dem Zylinder und dem Drei-Wegeventil wurde ein Teflonband für die Dichtheit befestigt.

Bild 229. Druckkolben, Führungseinrichtung und Druckkammer



Die Reinigung des Druckkolbens erfolgte für gewöhnlich mit einem Schwamm und heißem Wasser. Im Druckzylinder lagerte sich erhärtetes Material ab, weshalb meist Werkzeuge wie Drahtbürsten und Metallschwämme benutzt wurden. Bei sehr starker Verschmutzung empfahl die Firma Sika ein Säurebad.



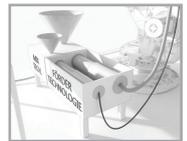
GEOMETRIEAUFBEREITUNG



ROBOTERSTEUERUNG



BETONAUFBEREITUNG



MATERIALFÖRDERUNG



DÜSENTECHNOLOGIE



ROBOTER



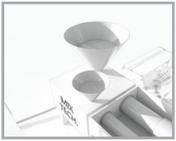
DRUCKVERSUCHE



GEOMETRIEAUFBEREITUNG



ROBOTERSTEUERUNG



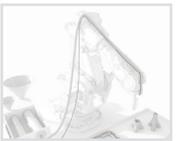
BETONAUFBEREITUNG



MATERIALFÖRDERUNG



DÜSENTECHNOLOGIE



ROBOTER



DRUCKVERSUCHE

E . . . DRUCKSCHLAUCH

Beim Druckschlauch handelte es sich um einen klassischen Kunststoff-Gewebeschlauch. An beiden Enden wurden Gewindeanschlüsse mittels Spannschellen befestigt. Ein Ende schraubte man auf das Dreiwegeventil und das andere Ende an den Adapterflansch. Gereinigt wurde der Schlauch mit heißem Wasser und Druckluft.

Bild 230. links,
Verbindung von
Drei-Wegeventil mit
Adapterflansch



Bild 231. rechts.
Befestigung des
Druckschlauchs am
Roboterarm



Bild 232.

F . . . BESCHLEUNIGEREINHEIT

Die Beschleunigereinheit bestand aus fünf Teilen:

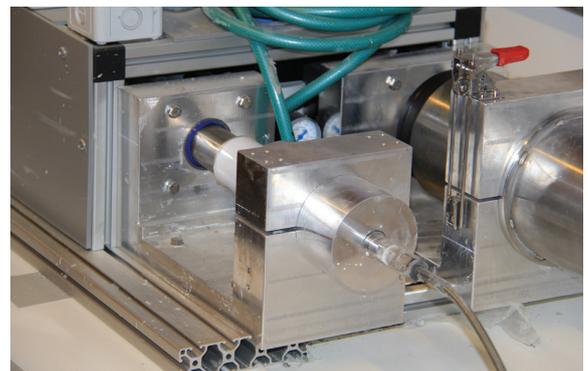
Der Druckkolben, die Beschleunigerkartusche, der Zylinder, die Zylinderbefestigung und das Adapter-Rücklaufventil.

Der Druckkolben funktionierte nach dem Prinzip der Druckeinheit. Er bewegte eine Kunststoffscheibe in der Beschleunigerkartusche und transportierte die Flüssigkeit durch den Beschleunigerschlauch zum Adapterflansch. Die Kartusche wurde manuell gefüllt und in den Zylinder eingesetzt. Dieser wurde abermals durch zwei geführte Gegenstücke gesteuert. Auf die Beschleunigerkartusche musste ein Adapter-Rücklaufventil geschraubt werden, um den Anschluss des Beschleunigerschlauches zu ermöglichen.

Bild 233. Beschleunigereinheit



Bild 234. Beschleunigereinheit



G... BESCHLEUNIGERSCHLAUCH

Der Beschleunigerschlauch ähnelte einem Hydraulikschlauch. Er übernahm die Verbindung von dem Adapter-Rücklaufventil und dem Adapterflansch. An beiden Enden des Schlauches wurden Steckverbindungen montiert, um ein schnelles Hantieren zu ermöglichen.

Die Reinigung des Schlauches war etwas mühsam, da der Verschluss durch den Beschleuniger sehr leicht verklebte. Somit wurde das Säubern mit einer Drahtbürste und Druckluft durchgeführt.

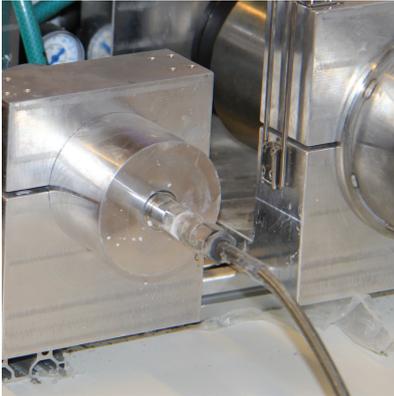


Bild 235. Anschluss des Beschleunigerschlauchs auf der Kartusche.



Bild 236. Verbindung zwischen Beschleunigereinheit und Druckdüse



Bild 237. Anschluss am Adapterflansch

H... AUFSPANNUNG AM ROBOTERARM IRB 6660

Für die Aufspannung der Druckdüse und des Adapterflansches wurden zwei unterschiedliche Systeme auf zwei verschiedenen Robotern entwickelt und gefertigt. Am Anschluss des IRB 6660 verwendete man eine 3D gedruckte Kunststoffführung. Die Befestigungspunkte der Führung waren exakt auf die Adapterplatte des Roboterarms abgestimmt und wurden mittels vier Zylinderkopfschrauben mit Innensechskant montiert. Für die Befestigung des Adapterflansches und der Druckdüse sorgten unkomplizierte Kunststoffkabelbinder. Dieses System hatte Verbesserungspotential, da der Druckschlauch nicht geführt werden konnte und somit die Position der Druckdüse beim Drucken und die Präzision variierte. Diese Erkenntnis wurde in den zweiten Versuchswochen am IRB 140 verbessert.

Bild 238. Befestigung der Druckdüse und des Adapterflansches am Roboterarm

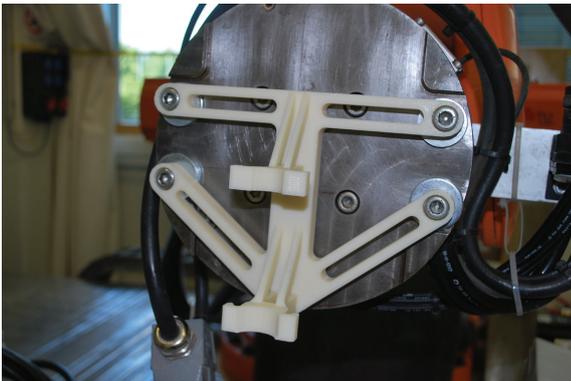
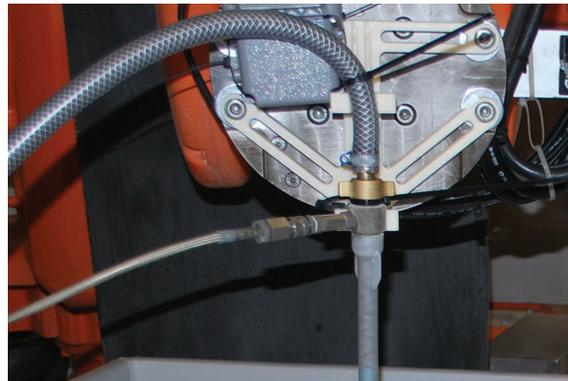


Bild 239. Fixierung durch Kabelbinder



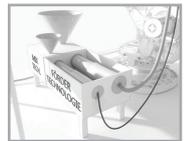
GEOMETRIEAUFBEREITUNG



ROBOTERSTEUERUNG



BETONAUFBEREITUNG



MATERIALFÖRDERUNG



DÜSENTECHNOLOGIE



ROBOTER



DRUCKVERSUCHE



GEOMETRIEAUFBEREITUNG



ROBOTERSTEUERUNG



BETONAUFBEREITUNG



MATERIALFÖRDERUNG



DÜSENTECHNOLOGIE



ROBOTER



DRUCKVERSUCHE

H...AUFSPANNUNG AM ROBOTERARM IRB 140

Die zweite Befestigung wurde aus Holz gefertigt. Hierbei handelte es sich um eine Befestigungseinheit mit vier Führungen. Es wurde sowohl der Schlauch, als auch die Druckdüse zweimal geführt. Die Befestigung und Definierung des Systems geschah mit vier Zylinderkopfschrauben mit Innensechskant. Eine Abstandplatte war für einen größeren Schutz vor Kollisionen sehr wichtig. Die Lage wird durch eine Bohrung definiert und durch drei lösbare Hilfsführungen gehalten. Die Druckdüse war im gesamten Zyklus präzise und maßgenau.



Bild 240. Befestigung des Druckschlauches und der Druckdüse am Roboterarm



Bild 241.

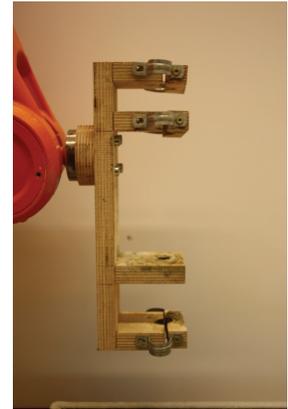


Bild 242. Eine definierte Bohrung und drei lösbare Hilfsführungen.

I...ADAPTERFLANSCH

Der Adapterflansch war einer der problematischsten Bestandteile der Materialförderung. In diesem Bauteil wurde das Druckmaterial (Mörtel) und der Beschleuniger vermengt. Der Flansch hatte drei Anschlussmöglichkeiten: Druckdüse, Druck- und Beschleunigerschlauch.

Das Drucken benötigte das richtige Mörtel-Beschleuniger Verhältnis, da die Mischung ansonsten zu schnell aushärtete und den Adapter verstopfte. Die Einspeisung des Beschleunigers in den Mörtel funktionierte aus der Mitte des Mörtelstranges. Dadurch wurde eine Ablagerung an den Randstellen verhindert.

Bild 243. Funktionsprinzip des Adapterflansches



Bild 244 -245.rechts, Einspritztechnologie des Beschleunigers in den Druckmörtel



J... DRUCKDÜSE

Im Laufe des Projektes entwickelten sich zwei unterschiedlich große Düsendurchmesser, einmal 5mm und einmal 10mm. Ein handelsübliches Produkt wurde gewählt, welches im Zweikomponentenkleberbereich Anwendung findet. Nach weiteren Forschungsmaßnahmen könnte eventuell eine gut durchdachte Düsen-gestaltung, einen Großteil der Nachbehandlung des Bauteils übernehmen.



Bild 246. Öffnung Druckdüse



Bild 247. Befestigung der Druckdüse auf dem Adapterflansch

J... STATIKMISCHER:

Ein weiteres Problem stellte die Durchmischung des Mörtels mit dem Beschleuniger dar. Die Mischung hatte beträchtliche Auswirkungen auf die Erstarrungsgeschwindigkeit und die Oberflächenstruktur. Aus diesem Grund wurde in der Druckdüse ein Statikmischer eingesetzt. Dieser kam aus dem Bereich des Zweikomponentenklebers und konnte in der Länge variiert werden.

Bild 248. Der Statikmischer konnte in der Länge variiert werden.



Bild 248.

Der Statikmischer in der Druckdüse



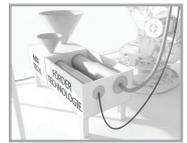
GEOMETRIEAUFBEREITUNG



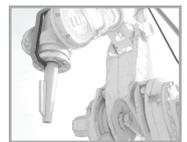
ROBOTERSTEUERUNG



BETONAUFBEREITUNG



MATERIALFÖRDERUNG



DÜSENTECHNOLOGIE



ROBOTER



DRUCKVERSUCHE

VERSUCHSABLAUF KONSTRUKTION DER PROZESSKETTE



GEOMETRIEAUF-
BEREITUNG



ROBOTERSTEUERUNG



BETONAUFBEREITUNG



MATERIALFÖRDERUNG



DÜSENTECHNOLOGIE



ROBOTER



DRUCKVERSUCHE

ROBOTER

Es wurden der Roboter IRB 6660 und der IRB 140 von ABB für die Versuche eingesetzt.

Der IRB 6660 diente hauptsächlich als Fräsroboter und konnte zusätzlich auf einer Linearachse verfahren. Sein Bearbeitungsraum betrug 6000 x 1500 x 1500mm.

Der IRB 140 gehörte zur Kategorie der kleineren Roboter und wurde für Pick and Place Arbeiten verwendet.



Bild 250. Fräsarbeiten im Roboter Design Labor.

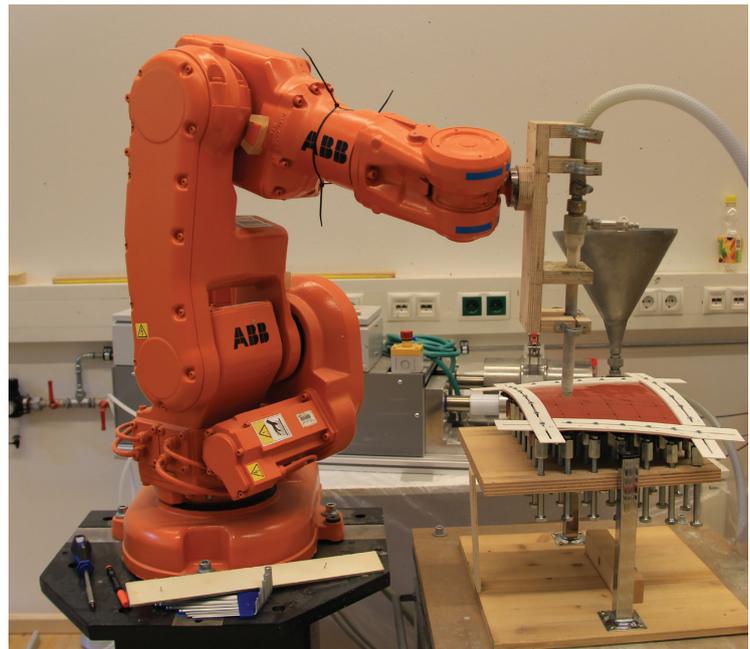


Bild 251. Beton 3D Druck Versuche im ABB Roboter Labor.

DRUCKVERSUCHE

Die Druckversuche definierten den Abschluss der Prozesskette. Anhand der Herstellung konnten Aussagen über den Erfolg der Planungsleistung getroffen werden. Die verschiedenen Parameter der Prozessglieder wurden schrittweise verändert und optimiert, in der Hoffnung die Qualität zu steigern. Die Abfolge der Versuchsblöcke in den Labors waren im Vorfeld erarbeitet.

Um den Druckprozess starten zu können mussten einige Adaptionen in den Labors vorgenommen werden. Im Roboter Design Labor fertigte man eine Wanne als Abdeckung für den Aufspanntisch an, da die Bestandteile des Mörtels mit metallischen Oberflächen sehr aggressiv reagierten. Zusätzlich wurden vier Holzplatten (40 x 40cm) mit Kunststoffplanen überzogen, um diese als vorgegebene Grundplatte zu verwenden.

Im ABB Roboter Labor wurde ein Aufspanntisch in horizontaler Lage aufgestellt und definiert. Die vorgefertigten Holzplatten aus dem Roboter Design Labor kamen auch hier zum Einsatz.

Bild 252. Beton 3D Druck von Geraden und Radien.

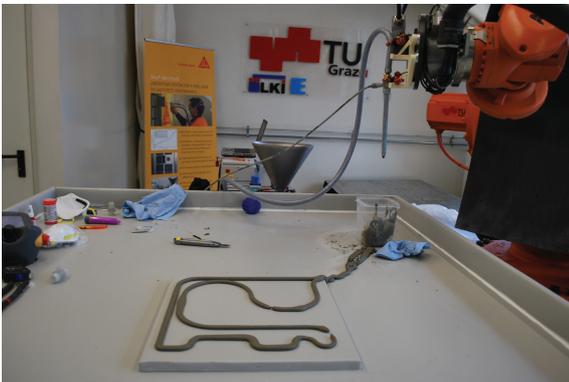


Bild 254. Drucken von elliptischen Formen



Bild 253. Drucken von Radien und Aufbauen von Schichten

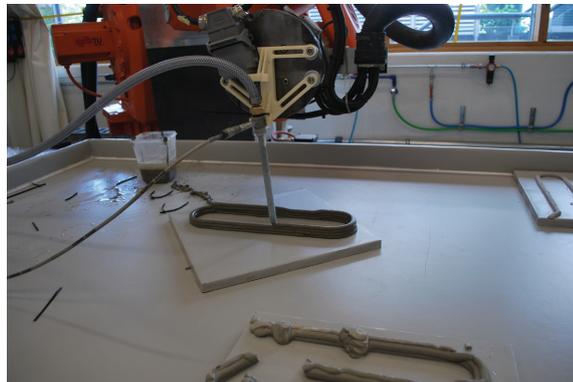
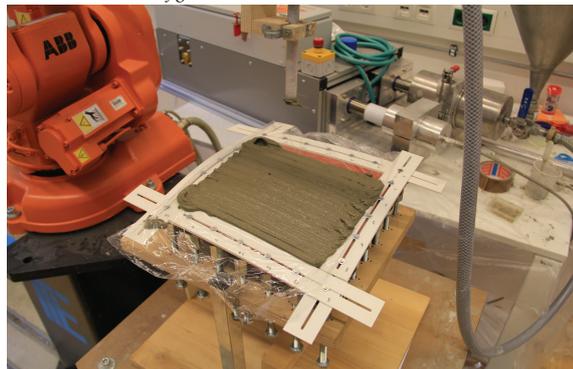


Bild 255. Drucken auf gekrümmten Flächen



GEOMETRIE-
AUFBEREITUNG



ROBOTERSTEUERUNG



BETONAUFBEREITUNG



MATERIALFÖRDERUNG



DÜSENTECHNOLOGIE



ROBOTER



DRUCKVERSUCHE

3. PRAKTISCHE UMSETZUNG VON COEBRO | BETON 3D DRUCKEN

3.1. PLANUNG DER DRUCKTECHNOLOGIE

- ZIELESETZUNG UND UMFANG DER TECHNOLOGIE
- 3D DRUCK - MASSSTABS - QUALITÄTS - DIAGRAMM
- AUSEINANDERSETZUNG MIT SPRITZBETON
- BETONCHEMIE
- SPRITZBETONVERSUCHE IM VERSUCHSSTOLLEN HAGERBACH (CH)
- PROJEKTPARTNERSCHAFT MIT DER SIKA AG SCHWEIZ
- ZEITPLAN
- MINISHOT - DRUCKTECHNOLOGIE

3.2. PLANUNG DER AUTOMATISIERUNGSEINHEIT

DEFINITION

- 3.2.1. PLANUNG DER VERSUCHSABLÄUFE UND PROTOTYPEN
 - ENTWURF UND AUFBEREITUNG DER CAD-DATEN FÜR VERSUCHSBLOCK I IM ROBOTER DESIGN LABOR (ITE)
 - ENTWURF UND AUFBEREITUNG DER CAD-DATEN FÜR VERSUCHSBLOCK II IM ABB ROBOTER LABOR (ITE)
- 3.2.2. ROBOTERSTEUERUNG
 - MITTELS FRÄSBAHNEN
 - MITTELS PROGRAMMIERUNG IN ECHTZEIT

3.3. VERSUCHSABLAUF_KONSTRUKTION DER PROZESSKETTE

ÜBERBLICK

- DIGITALE PROZESSKETTE - GEOMETRIEAUFBEREITUNG
- ROBOTERSTEUERUNG
- BETONAUFBEREITUNG
- MATERIALFÖRDERUNG | DÜSENTECHNOLOGIE
- ROBOTER
- DRUCKVERSUCHE

3.4. BETON 3D DRUCKEN | HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN

- VERSUCHSBLOCK I (ROBOTER DESIGN LABOR)
 - VERSUCHSREIHE I: ABFAHREN VON GERADEN UND RADIEN
 - VERSUCHSREIHE II: SCHICHTEN VON BAHNEN
 - VERSUCHSREIHE III: ABFAHREN VON RADIEN UND SCHICHTEN
 - VERSUCHSREIHE IV: DRUCKEN DES SIKA SCHRIFTZUGES
- MATERIALVERSUCHE
- VERSUCHSBLOCK II (ABB ROBOTER LABOR)
 - BETONKNOTEN
 - DRUCKEN AUF GEKRÜMMTE FLÄCHEN
 - SIKA SCHRIFTZUG

3.4. BETON 3D DRUCKEN HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN

- VERSUCHSBLOCK I (ROBOTER DESIGN LABOR)
 - VERSUCHSREIHE I: ABFAHREN VON GERADEN UND RADIIEN
 - VERSUCHSREIHE II: SCHICHTEN VON BAHNEN
 - VERSUCHSREIHE III: ABFAHREN VON RADIIEN UND SCHICHTEN
 - VERSUCHSREIHE IV: DRUCKEN DES SIKASCHRIFTZUGES

- MATERIALVERSUCHE

- VERSUCHSBLOCK II (ABB ROBOTER LABOR)
 - BETONKNOTEN
 - DRUCKEN AUF GEKRÜMMTE FLÄCHEN
 - SIKASCHRIFTZUG

START VERSUCHSBLOCK I: ROBOTER DESIGN LABOR

Im Zuge der manuell gesteuerten Versuche konnten erste Erkenntnisse hinsichtlich Rissverhalten und Aushärtungsprozess erzielt werden.

Die Bahnen wurden einzeln gedruckt, um das Verhalten eines losen Stranges zu erforschen. Man erkannte, dass die entstandene Hydratationsengerie beim Aushärten des Materials zu Spannungen führte, die Risse im Beton verursachten.

Bild 256. links. Manuelles Drucken von losen Strängen. Rissbildung ist markant.



Bild 257. rechts

Bild 258. links



Bild 259. rechts. Das Drucken im Verbund minimiert die Rissentwicklung.

ERKENNTNISSE: - Das Drucken im Verbund von mehreren Strängen übereinander oder nebeneinander und das luftdichte Verschließen des Druckmaterials mittels Frischhaltefolie konnte die Risse minimieren.

GEWÜNSCHTE VERSUCHSERGEBNISSE

- Konstante Vorschubgeschwindigkeit des Roboters bei Geraden und Winkeln.
- Konstante Druckleistung der MiniShot Maschine.
- Koordination und Kombination der Vorschubgeschwindigkeit des Roboters und der Druckgeschwindigkeit der MiniShot Maschine, in Abhängigkeit vom Querschnitt des Druckstranges.
- Ein effizientes Mischverhältnis von Mörtel und Beschleuniger.
- Verhalten der verschiedenen Düsendurchmesser überprüfen.

MATERIALMISCHUNG

| | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|------------|
| Mischungsverhältnis für 4500g: | 0,458 % - Addmixture (Verzögerer) | - 20,61 g |
| | 16,6 % - Aggregate (Gestein) | - 747,0 g |
| | 2,0 % - Additive (Filler) | - 90,0 g |
| | 57,26 % - Binder (Zement) | - 2576,6 g |
| | 23,68 % - Wasser | - 1065,7 g |
| | <hr/> | |
| | 100 % | - 4500 g |



Bild 260. links Dosierung der Mörtelbestandteile.

Bild 261. rechts. Mischen des Druckmaterials

Bild 262. links . Gießen
des Druckmaterials in den
Fülltrichter

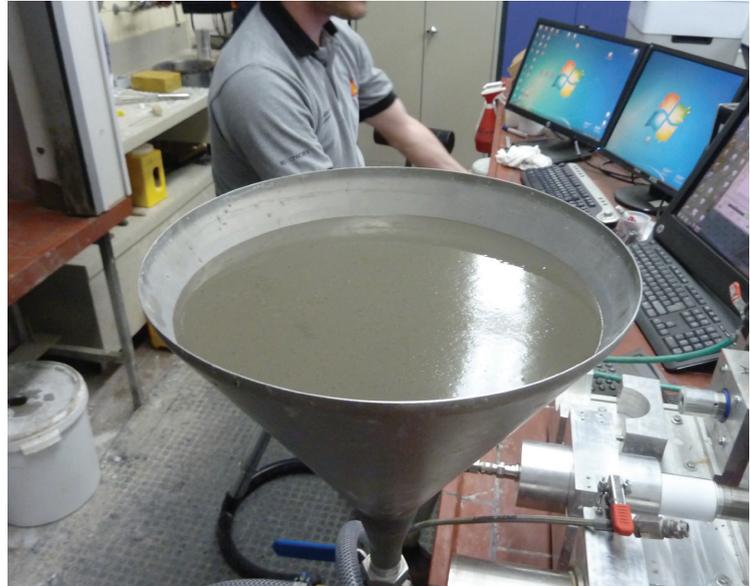


Bild 263. rechts

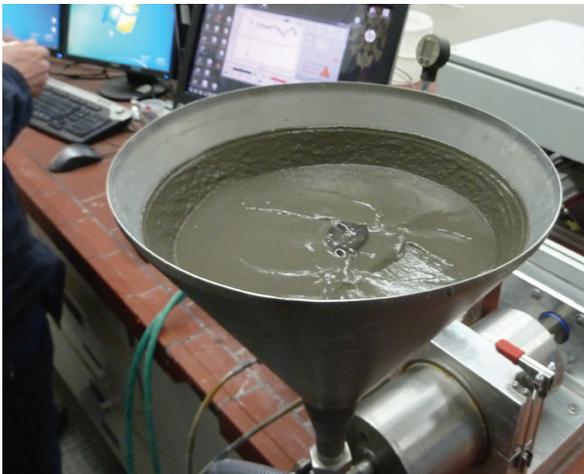


Bild 264. Mörtelmischung
wird durch Unterdruck in
die Druckkammer gesaugt.

Nach dem Mischvorgang wurde der Mörtel in den Fülltrichter geleert. Durch die Zugabe des Beschleunigers war die Mischung sehr flüssig und die Konsistenz ideal für die Förderung durch das Drucksystem.

Um den Mörtel in die Druckkammer zu saugen, musste der Druckkolben vollständig ausgefahren werden. Dieser Vorgang diente dem Füllen des gesamten Fassungsvermögens der Druckkammer und dem Entfernen von überflüssiger Luft aus der Kammer. Der Kolben zog das Material mit Hilfe von Unterdruck in die Kammer und stoppte an der Endposition. Die Einstellungen bezüglich Vorschubgeschwindigkeit des Kolbens waren in dieser Phase noch nicht notwendig.

Der Ablauf des Mischens, des Einfüllens und des Einsaugens wurde bei jedem der folgenden Versuche identisch wiederholt. Lediglich das Verhältnis der Mischungsbestandteile konnte variieren.

VERSUCHSREIHE I (ZWEI VERSUCHE): ABFAHREN VON GERADEN UND RADIIEN

Nach der Füllung der Druckkammer konnte das Drei-Wegeventil auf die Stellung *Druckkammer - Druckschlauch* positioniert und der Druckprozess begonnen werden. Der Robotercode wurde auf die Steuerung übertragen und geladen. Die gesamten Versuche starteten aus einer vordefinierten Ausgangsstellung. Der Mörtel wurde durch den Druckschlauch bis zum Adapterflansch in die Düse gepresst. In der Düse wurde der Mörtel vom Statikmischer vermengt und anschließend aus der Öffnung gedruckt. Mit dem Erreichen der Düse startete der Beschleuniger. Bereits nach einer kurzen Einwirkphase konnte an der Konsistenz des Druckmaterials die Zugabe des Beschleunigers erkannt werden. Der Roboter wurde gestartet.

DATEN VERSUCH I:

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM

VORSCHUB MÖRTEL: 397,2 G/MIN

BESCHLEUNIGERANTEIL: 2% DES MÖRTELS

VORSCHUB ROBOTER: 2,5 M/MIN

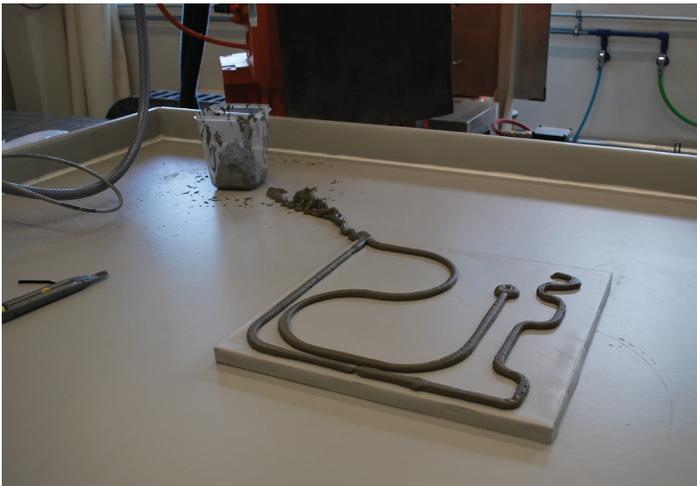


Bild 265 -267.
Drucken von Geraden und
Radien



ERKENNTNISSE AUS DEM VERSUCH I:

PRO UND CONTRA

- + Machbarkeit von Radien gegeben, jedoch Geometrieänderung
- + Geschwindigkeiten gut abgestimmt
- Förderstrom nicht konstant
- Luft einschließen
- Rissbildung beim Aushärten
- Beim Aushärten Frischhaltefolie zum Abdichten
- Breite zu Höhenverhältnis nicht gegeben

Breite 9,4 - 13,1 mm

Höhe 7,5 - 8,6mm

VERSUCHSREIHE I: ABFAHREN VON GERADEN UND RADIEN

DATEN VERSUCH II:

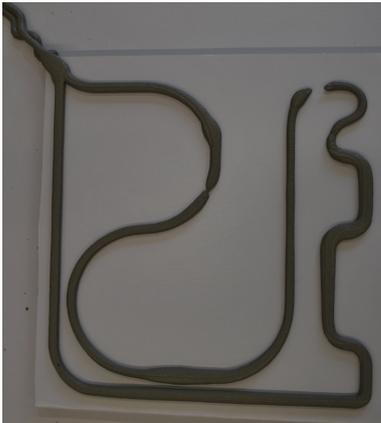
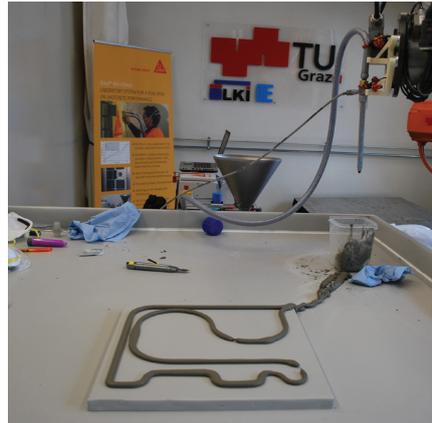
DÜSEN DURCHMESSER: 10MM

VORSCHUB MÖRTEL: 397,2 G/MIN

BESCHLEUNIGERANTEIL: 1% DES MÖRTELS

VORSCHUB ROBOTER: 2,5 M/MIN

Bild 268 -270.
Drucken von Geraden und
Radien



ERKENNTNISSE AUS DEM VERSUCH II:

PRO UND CONTRA

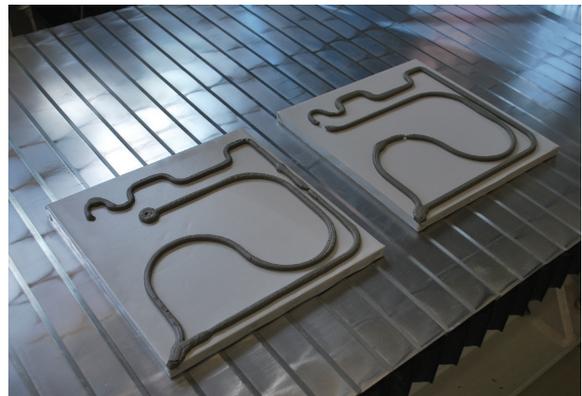
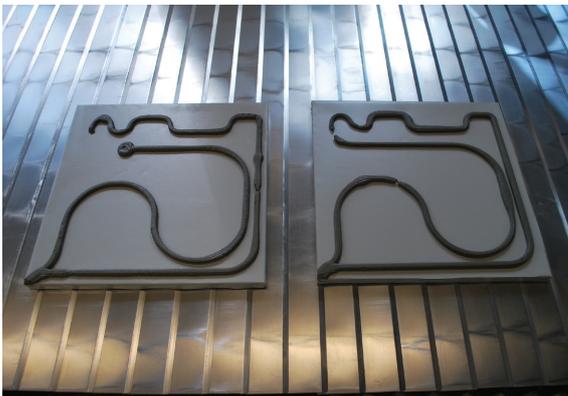
- + Verbesserte Rissbildung durch Frischhaltefolie
- Zu große Verformung des Druckstranges
- zu wenig Beschleuniger
- Luft einschüsse
- Förderstrom undefiniert
- Breite zu Höhenverhältnis nicht gegeben

Breite 8,8 - 19,2 mm

Höhe 7,0 - 8,5 mm

ERGEBNIS VERSUCHSREIHE I:

Bild 271-272. Vergleich der
ersten Versuchsreihe

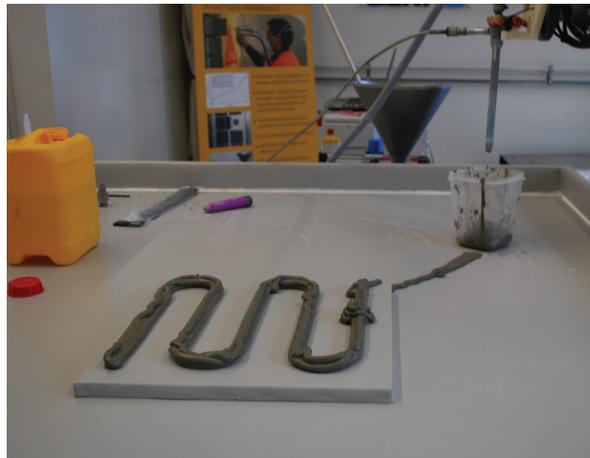


VERSUCHSREIHE II (ZWEI VERSUCHE): SCHICHTEN VON BAHNEN

Bild 273-275. *Gescheiterter Versuch einer Stapelung von Schichten*

DATEN VERSUCH I:

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM
VORSCHUB MÖRTEL: 397,2 G/MIN
BESCHLEUNIGERANTEIL: 2,5% DES MÖRTELS
VORSCHUB ROBOTER: 2,5 M/MIN



ERKENNTNISSE AUS DEM VERSUCH I:

PRO UND CONTRA

- + Förderstrom konstant
- + Verbund zwischen den Schichten sehr gut
- + Nach dem Aushärten im Querschnitt keine einzelnen Stränge erkennbar
- + Keine Risse ersichtlich
- + Keine Lufteinschlüsse
- Stapelung nicht möglich
- Düsenbefestigung schlecht, somit unterschiedliche Roboterbahnen
- Zustellhöhen zu hoch. Druckstrang im Querschnitt als Kreis ausgeführt. Folge: Keine Stapelung der Schichten möglich
- Layer fallen aufgrund der abgerundeten Geometrie des Druckstranges herunter. Folge: Druckstrang abziehen, um ebene Auflagerfläche zu erzielen
- Breite zu Höhenverhältnis nicht gegeben

VERSUCHSREIHE II: SCHICHTEN VON BAHNEN

DATEN VERSUCH II:

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM

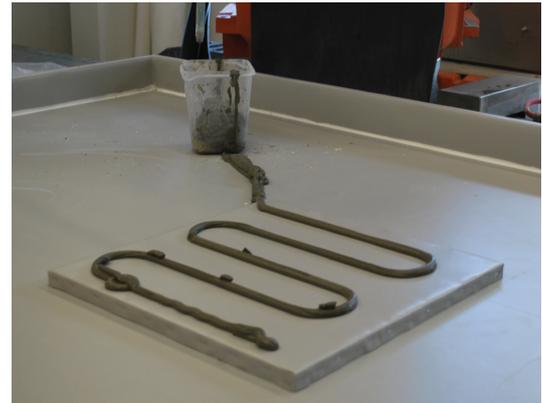
VORSCHUB MÖRTEL: 397,2 G/MIN

BESCHLEUNIGERANTEIL: 3 % DES MÖRTELS

VORSCHUB ROBOTER: 2,5 M/MIN

ZUSTELLHÖHE BEIM SCHICHTEN: 8MM

Bild 276-277.



ERKENNTNISSE AUS DEM VERSUCH II:

Dieselben Ergebnisse, die Versuch I hervorbrachte. Zusätzlich noch:

- Zu wenig Material
- Im nächsten Versuch muss Zustellhöhe um 1mm verringert werden
- Breite zu Höhenverhältnis nicht gegeben

Breite 11 - 12,6 mm

Höhe 8 - 9,1 mm

ERGEBNIS VERSUCHSREIHE II:

Bild 268-269.

*Gegenüberstellung der
entstanden Ergebnisse aus
Versuchsreihe II*



DOKUMENTATION



Bild 280.

MESSEN DER UNTERSCHIEDLICHEN DRUCKBREITEN

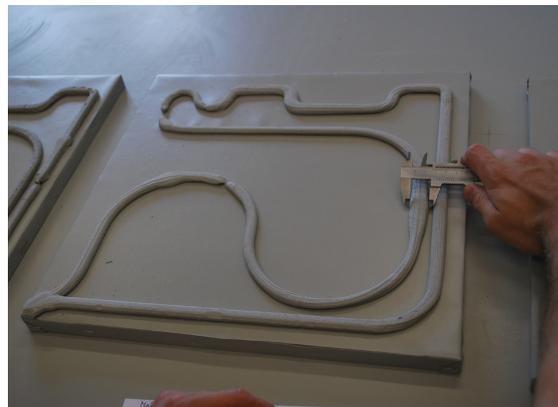
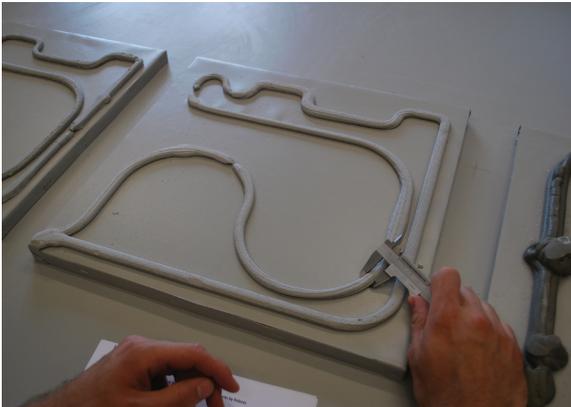


Bild 281-282

NAHEZU KEINE RISSBILDUNG



Bild 283-284.

VERBINDUNG ZWISCHEN DEN SCHICHTEN , KEINE FREISTEHENDEN SCHICHTEN SICHTBAR



Bild 285-286.

VERSUCHSREIHE III (DREI VERSUCHE): ABFAHREN VON RADIIEN UND SCHICHTEN

DATEN VERSUCH I:

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM

VORSCHUB MÖRTEL: 397,2 G/MIN

BESCHLEUNIGERANTEIL: 3% DES MÖRTELS

VORSCHUB ROBOTER: 2,5 M/MIN

DIE ZUSTELLHÖHE PRO SCHICHT NIMMT UM 0,5MM AB
(BASISLAYER 8MM HÖHE)

STATIKMISCHER AUF DREI UMLENKUNGEN VERKÜRZT

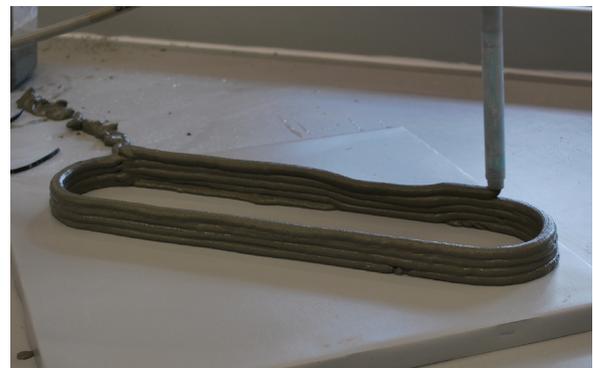


Bild 287-291. *Aufbauen der Schichten und Versagen der Stabilität*

ERKENNTNISSE AUS DEM VERSUCH I:

PRO UND CONTRA

- + Förderstrom konstant
- + Düse zieht Druckbahn ab
- + Stapelung von fünf Schichten möglich
- + Untere Layer konnten Gewichtskraft der darüberliegenden Schichten aufnehmen
- + Keine Rissbildung nach 20 Stunden
- Düsenbefestigung schlecht, somit unterschiedliche Roboterbahnen
- Höhenverteilung der Schichten undefiniert
- Beschleuniger sollte gesteigert werden
- Mörtelmsichung sehr dickflüssig, Transport durch Leitungen schwierig
- Aussteifung zwischen den Schichten oder doppelte Wandstärken wären sinnvoll für die Stabilität

VERSUCHSREIHE III: ABFAHREN VON RADIEN UND SCHICHTEN

DATEN VERSUCH II:

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM
VORSCHUB MÖRTEL: 237,6 G/MIN
BESCHLEUNIGERANTEIL: 5% DES MÖRTELS
VORSCHUB ROBOTER: 1,5 M/MIN
DIE ZUSTELHÖHE PRO SCHICHT NIMMT UM 0,5MM AB
(BASISLAYER 8MM HÖHE)
STATIKMISCHER AUF DREI UMLENKUNGEN VERKÜRZT

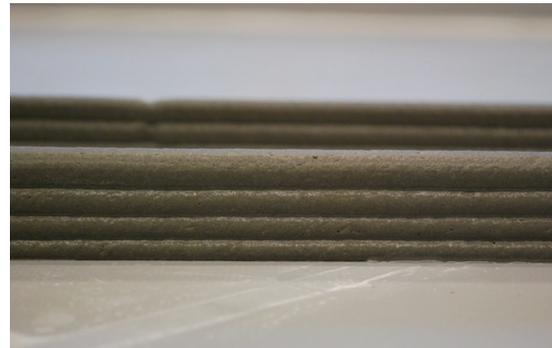


Bild 292-296. Stapelung von vier Layern und Betrachtung der jeweiligen Verformung

ERKENNTNISSE AUS DEM VERSUCH II:

PRO UND CONTRA

- + 10g Wasser wurden der Mischung zusätzlich beigemischt - besserer Transport
- + Stapelung von vier Schichten möglich
- + Keine Rissbildung
- + Zustand nach 20 Stunden
 - layer 1 u. 2 = 6mm
 - layer 3 = 6,5mm
 - layer 4 = 8,7mm
- Untere Schichten verformten sich zu stark
- Höhenverteilung der Schichten undefiniert
- Beschleuniger sollte gesteigert werden
- Sehr starke Unterschiede im Querschnitt
 - Basislayer = 17,4mm
 - höchster Layer = 11,4mm

VERSUCHSREIHE III: ABFAHREN VON RADIIEN UND SCHICHTEN

DATEN VERSUCH III:

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM

VORSCHUB MÖRTEL: 237,6 G/MIN

BESCHLEUNIGERANTEIL: 5,5% DES MÖRTELS

VORSCHUB ROBOTER: 1,5 M/MIN

DIE ZUSTELLHÖHE PRO SCHICHT NIMMT UM 0,5MM AB

(BASISLAYER 8MM HÖHE)

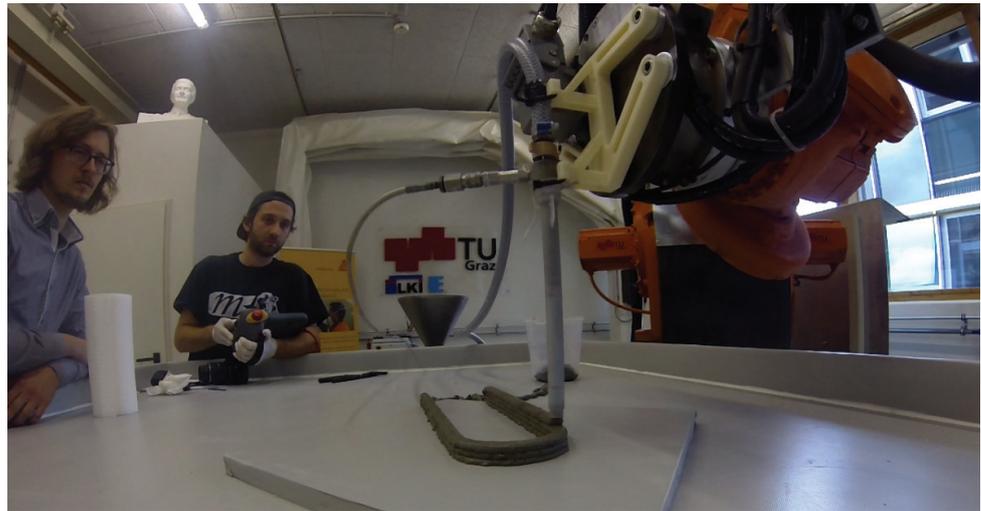


Bild 298-300. Drucken
ohne Statikmischer

ERKENNTNISSE AUS DEM VERSUCH III:

- Einsetzen des Statikmischer vergessen
- Bahnen bekamen Wellen, da Mörtel und Beschleuniger nicht durchmischt wurden

VERSUCHSREIHE IV (EIN VERSUCH): SIKA SCHRIFTZUG

DATEN VERSUCH I: DÜSEN DURCHMESSER: 10MM
 VORSCHUB MÖRTEL: 237,6 G/MIN
 BESCHLEUNIGERANTEIL: 5-10% DES MÖRTELS
 VORSCHUB ROBOTER: 1,8 M/MIN
 DIE ZUSTELLHÖHE PRO SCHICHT NIMMT UM 0,5MM AB (BASISLAYER 10MM HÖHE)
 STATIKMISCHER MIT DREI UMLENKUNGEN
 MÖRTEL UM 3G WASSER UND 0,2G VERZÖGERER VERMEHRT

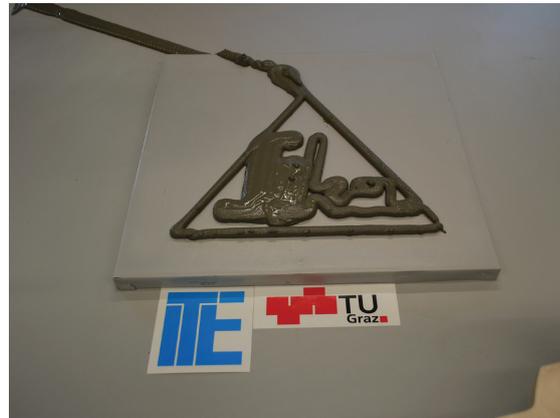
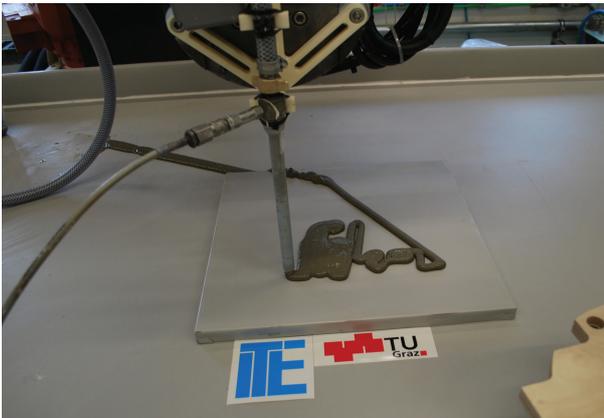


Bild 301-302 . Problematik bei der Herstellung des Sika Logos

ERKENNTNISSE AUS DEM VERSUCH I:

- + Transporteigenschaften des Mörtels besser
- Mörtel zu flüssig, um exakte Bahnen zu drucken
- Beschleunigeranschluss am Adapterflansch beschädigt
- Düsenöffnung von 10mm zu groß für diesen Schriftzug. Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit des Roboters notwendig
- Eventuell zu viel Beschleuniger
- Düse verstopft ständig

RÉSUMÉ VON VERSUCHSBLOCK I

Die Machbarkeit des Beton 3D Drucks, sowie das Abfahren von Geometrien und Stapeln von Layern wurde nachgewiesen. Sehr viele Einflussfaktoren wirkten gleichzeitig aufeinander und beeinflussten die Drucktechnologie. Der Einfluss von Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Mörtelmischung war ein Kriterium, das keine exakten Aussagen erlaubte. Bei identer Mörtelmischung war der Transport des Druckmaterials sehr unterschiedlich, was den Druckprozess erschwerte. Es war nötig, die Forschung im Bereich der Mischung zu vertiefen. Die Zustellung der Layerhöhen mussten exakt definiert werden, um ein Abziehen der Bahnen zu ermöglichen. Nur durch das Glätten der Bahnen konnten die nachfolgenden Stränge exakt gesetzt werden. Die Kombination von Mörtel und Beschleuniger war eine der größten Herausforderungen. Der Grat zwischen zu flüssiger Mischung und verstopfter Düse war sehr schmal und ließ keine Prozesssicherheit zu.

MATERIALVERSUCHE:

Zu Beginn des Versuchsblocks II wurde eine vertiefte Forschung im Bereich des Mischungsverhältnisses durchgeführt, um die Prozesssicherheit zu steigern. Die Hauptproblematik stellte der zu hohe Druck und das Verstopfen der Düse beim Drucken dar. Deshalb wurde die Mischung aus einer flüssigeren Konsistenz erzeugt, die das Stapeln von Schichten gerade noch ermöglichte.

Bei diesen Versuchen wurde die Druckdüse manuell gesteuert, um möglichst viele Mischungen prüfen zu können.

Durch die Änderung von Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit konnte eine unterschiedliche Qualität beim Fließverhalten des Mörtels bemerkt werden. Die unterschiedlichen Temperaturen wurden jedoch nicht berücksichtigt. Es wurden sechs unterschiedliche Mischungen durchgeführt und die Kriterien erfasst. Jede Mörtelmischung wurde mit 3% Beschleuniger getestet. (Betonchemie siehe S. 118-119.)

Mischung 1: (zu flüssig)

| | | |
|--------------|----------|--------|
| - Addmixture | 9,16g | 0,458% |
| - Aggregate | 332,33g | 16,61% |
| - Additive | 40g | 2% |
| - Binder | 1145,19g | 57,26% |
| - Wasser | 473,64g | 23,68% |

Mischung 3: (Konsistenz zu dickflüssig zum Drucken)

| | | |
|--------------|----------|--------|
| - Addmixture | 4,275g | 0,21% |
| - Aggregate | 338,6g | 16,93% |
| - Additive | 40,8g | 2,04% |
| - Binder | 1168,04g | 58,4% |
| - Wasser | 448,8g | 22,44% |

Mischung 2: (nicht pumpbar)

| | | |
|--------------|----------|--------|
| - Addmixture | 9,16g | 0,458% |
| - Aggregate | 332,33g | 16,61% |
| - Additive | 40g | 2% |
| - Binder | 1145,19g | 57,26% |
| - Wasser | 440g | 22% |

Mischung 4: (schlechte Frühstandsfestigkeit)

| | | |
|--------------|----------|--------|
| - Addmixture | 9,16g | 0,458% |
| - Aggregate | 332,33g | 16,61% |
| - Additive | 40g | 2% |
| - Binder | 1145,19g | 57,26% |
| - Wasser | 460g | 23% |

Bild 303-304. Materialversuche mit unterschiedlichen Mörtelmischungen und Düsenöffnungen



Mischung 5: (zu flüssig, kein definierter Druckstrang)

| | | |
|--------------|----------|--------|
| - Addmixture | 9,16g | 0,458% |
| - Aggregate | 332,33g | 16,61% |
| - Additive | 40g | 2% |
| - Binder | 1145,19g | 57,26% |
| - Wasser | 500g | 25% |

Mischung 6: (ideal)

| | | |
|--------------|----------|--------|
| - Addmixture | 9,3g | 0,46% |
| - Aggregate | 332,33g | 16,61% |
| - Additive | 40g | 2% |
| - Binder | 1145,19g | 57,26% |
| - Wasser | 480g | 24% |

BESTE MISCHUNG:

- perfekte Konsistenz
- vernünftiger Transport durch Leitungen
- nach fünf Wiederholungen immer gleiche Mischung
- Hohe Frühstandsfestigkeit, Stapelung gut möglich

DIE REZEPTUR DER MISCHUNG 6 WURDE FÜR DIE HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN IM VERSUCHS-
BLOCK II VERWENDET UND AUF DIE GEEIGNETE DRUCKMASSE VON 4000 GRAMM SKALIERT:

Mischung für Prototyp:

| | | |
|--------------|---------|--------|
| - Addmixture | 18,6g | 0,46% |
| - Aggregate | 664,7g | 16,61% |
| - Additive | 80g | 2% |
| - Binder | 2290,2g | 57,26% |
| - Wasser | 960g | 24% |

START VERSUCHSBLOCK II: ABB ROBOTERLABOR

Die Ergebnisse aus dem Versuchsblock I und den Materialversuchen wurden gesammelt, dokumentiert und in die Aufbereitung der CAD Daten für den Versuchsblock II integriert.

Der Versuchsblock II bestand aus vier Versuchesreihen: Betonknoten, Drucken auf gekrümmte Flächen (geschlossene Strukturen), Drucken auf gekrümmte Flächen (offene Strukturen) und Sika Schriftzug.

BETONKNOTEN

Im Laufe des Herstellungsprozesses konnte eine ständige Verbesserung der Pumpbarkeit, des Mischungsverhältnisses und der Druckqualität erzielt werden. Der Betonknoten wurde in acht Arbeitsschritten erstellt. Aufgrund von Auskragungen wurden Parallelbahnen gedruckt. Jede Druckbahn hatte eine Zu- und Ausfahrt. Anhand der einzelnen Druckprozesse konnten die entstandenen Probleme und Verbesserungen abgelesen werden.

DREI ELLIPTISCHE BASISLAYER:

(VERSUCH I)

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM
VORSCHUB MÖRTEL: 237,6 G/MIN
BESCHLEUNIGERANTEIL: 3% DES MÖRTELS
VORSCHUB ROBOTER: 50 MM/S; 75%
DIE ZUSTELLHÖHE PRO SCHICHT NIMMT UM
0,5MM AB (BASISLAYER 8MM HÖHE)
SCHICHTEN: 6
SCHLECHTES WETTER

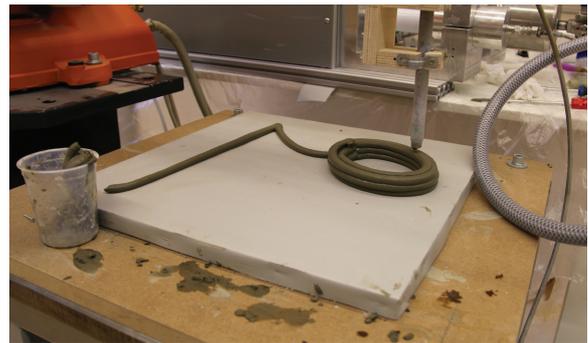


Bild 305-307. Zufahrt und Konsistenz des ersten elliptischen Basislayers

ERKENNTNISSE AUS DEM VERSUCH I:

- Luft einschüsse
- Schlecht pumbar
- Beobachtungen zeigten, dass an Tagen mit schönem Wetter ein optimales Pumpverhalten erzielt wurde und an regnerischen Tagen eine zu dickflüssige Mischung erzeugt wurde.

DREI ELLIPTISCHE BASISLAYER:

(VERSUCH II)

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM
VORSCHUB MÖRTEL: 237,6 G/MIN
BESCHLEUNIGERANTEIL: 3% DES MÖRTELS
VORSCHUB ROBOTER: 50 MM/S; 75%
DIE ZUSTELLHÖHE PRO SCHICHT NIMMT UM
0,5MM AB (BASISLAYER 8MM HÖHE)
SCHICHTEN: 6
SCHÖNES WETTER

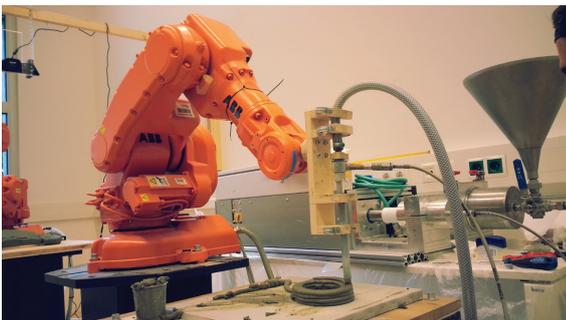


Bild 308-312. Entwicklung der Basislayer

ERKENNTNISSE AUS DEM VERSUCH II:

- immer noch Lufteinschlüsse
- + gut pumbar - Mischung flüssiger
- + Ich bekam ein Gefühl für die nötige Konsistenz des Druckmaterials

BETON 3D DRUCKEN
HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN
VERSUCHSBLOCK II
BETONKNOTEN

DREI ELLIPTISCHE BASISLAYER:

(VERSUCH III)

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM

VORSCHUB MÖRTEL: 237,6 G/MIN

BESCHLEUNIGERANTEIL: 3% DES MÖRTELS

VORSCHUB ROBOTER: 50 MM/S; 75%

DIE ZUSTELLHÖHE PRO SCHICHT NIMMT UM
0,5MM AB (BASISLAYER 8MM HÖHE)

SCHICHTEN: 6

SCHÖNES WETTER



Bild 313-319. Ergebnis der drei Basislayer



Bild 320-325. Darstellung der Oberflächenbeschaffenheit und Auskrugung der einzelnen Druckschichten.



ERKENNTNISSE AUS DEM VERSUCH III:

PRO UND CONTRA

- + Auskrugung möglich, Überstände waren sichtbar
- + gut pumpbar
- + - Luft einschließen; das Druckmaterial konnte jedoch Fehler korrigieren
- Geometrie wich sehr stark von gewünschter Form ab; Material breitete sich zu stark aus
- Druckmaterial zu flüssig; eventuell Beschleuniger reduzieren
- Durch Zu- und Ausfahrt der Bahnen wirkten die Ellipsen beschädigt
- Durch hohen Wasseranteil entstanden Risse beim Aushärten

BETON 3D DRUCKEN
HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN
VERSUCHSBLOCK II
BETONKNOTEN

VERBINDUNG DER ELLIPSEN

(VERSUCH I)

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM

VORSCHUB MÖRTEL: 300 G/MIN

BESCHLEUNIGERANTEIL: OHNE BESCHLEUNIGER

VORSCHUB ROBOTER: 50 MM/S; 80%

DIE ZUSTELLHÖHE PRO SCHICHT: 7,5 UND 8MM

SCHICHTEN: 3

SCHÖNES WETTER



Bild 326-330. Interessanter Druckverlauf beim Verbinden der Basislayer

ERKENNTNISSE AUS DEM VERSUCH I:

PRO UND CONTRA

- + Verhalten des Druckmaterials ohne Beschleuniger besser; Standfestigkeit stieg an
- + Definierter Druckstrang; Geometrie sehr stabil
- + Gut pumpbar; Wasseranteil um 10g und Verzögerer um 1g erhöht
- + Parallelbahnen stabilisierten das System
- + Setzen der Bahnen funktionierte sehr gut
- Materialsprung zwischen Ellipsenbeinen und Verbindungsschicht erkennbar - der Beschleuniger war dafür verantwortlich

BETON 3D DRUCKEN
HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN
VERSUCHSBLOCK II
BETONKNOTEN



Bild 331.

BETON 3D DRUCKEN
HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN
VERSUCHSBLOCK II
BETONKNOTEN

**HERSTELLUNG DER VERJÜNGUNGSLAYER
(VERSUCH I)**

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM

VORSCHUB MÖRTEL: 300 G/MIN

BESCHLEUNIGERANTEIL: OHNE BESCHLEUNIGER

VORSCHUB ROBOTER: 50 MM/S; 80%

DIE ZUSTELLHÖHE PRO SCHICHT: 7,5 UND 8MM

SCHICHTEN: 2

+ 10 G WASSER UND 1G VERZÖGERER



Bild 332-335. Beschädigung der Druckbahnen durch Lufteinschlüsse in der Mörtelmischung

ERKENNTNISSE AUS DEM VERSUCH I:

PRO UND CONTRA

- + Druckgeschwindigkeit wurde auf 300g/min gesteigert
- + Definierter Durckstrang; Geometrie war sehr stabil
- + gut pumpbar
- + Verhalten des Mörtels war mit Verbindungslayer ident
- Lufteinschlüsse ließen im Druckmaterial einen Krater entstehen
- Versuch wurde abgebrochen
- Druck wurde entfernt.

HERSTELLUNG DER VERJÜNGUNGSLAYER

(VERSUCH II)

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM

VORSCHUB MÖRTEL: 300 G/MIN

BESCHLEUNIGERANTEIL: OHNE BESCHLEUNIGER

VORSCHUB ROBOTER: 50 MM/S; 80%

DIE ZUSTELLHÖHE PRO SCHICHT: 7,5 UND 8MM

SCHICHTEN: 5 | +10 G WASSER +1G VERZÖGERER



Die Wiederholung der Druckversuche benötigte eine längere Offenzeit des Druckmaterials. Aus diesem Grund wurde dem Mörtel intuitiv Wasser und Verzögerer beigemischt. Diese Handlung heißt in den nächsten Versuchen: *JE NACH GEFÜHL GESTEIGERT*.



Bild 336-340. Verjüngung der Struktur ist erkennbar

ERKENNTNISSE AUS DEM VERSUCH II:

PRO UND CONTRA

- + Definierter Druckstrang; Geometrie war sehr stabil
- + gut pumpbar
- + untere Schichten wurden durch Gewicht der darüberliegenden Schichten nicht verformt
- +/- Luft einschließen; das Druckmaterial konnte jedoch Fehler korrigieren
- Sechs Schichten wären für die Ausführung des Druckstranges besser gewesen
- Vergrößerung des Druckkammervolumens wäre von Vorteil

BETON 3D DRUCKEN
HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN
VERSUCHSBLOCK II
BETONKNOTEN

**HERSTELLUNG DER VERJÜNGUNGSLAYER
(VERSUCH III)**

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM

VORSCHUB MÖRTEL: 300 G/MIN

BESCHLEUNIGERANTEIL: OHNE BESCHLEUNIGER

VORSCHUB ROBOTER: 50 MM/S; 80%

DIE ZUSTELLHÖHE PRO SCHICHT: 7,5 UND 8MM

SCHICHTEN: 6

+ 10 G WASSER UND 1G VERZÖGERER

(JE NACH GEFÜHL GESTEIGERT)

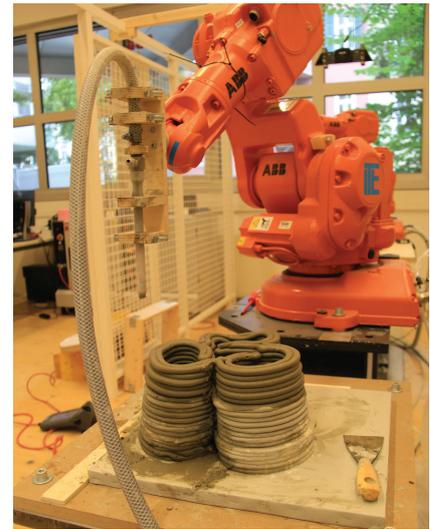


Bild 341-345. Fehlstellen werden durch folgende Druckbahnen korrigiert.

ERKENNTNISSE AUS DEM VERSUCH III:

PRO UND CONTRA

- + Auskragungen bis 3mm möglich
- + Auftragen von sechs Schichten kein Problem; maximal auf acht Schichten steigerbar
- Zustellung vereinzelt zu hoch, darum war das Glätten der Deckschicht ungenügend und das Setzen der Druckstränge undefiniert. Eventuell die Zustellhöhe auf konstante 7,2 mm minimieren.

HERSTELLUNG DER VERJÜNGUNGSLAYER
(VERSUCH IV)

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM

VORSCHUB MÖRTEL: 300 G/MIN

BESCHLEUNIGERANTEIL: OHNE BESCHLEUNIGER

VORSCHUB ROBOTER: 50 MM/S, 80%

DIE ZUSTELHÖHE PRO SCHICHT: 7,2MM

SCHICHTEN: 4 UND 6

+ 10 G WASSER UND 1G VERZÖGERER

(JE NACH GEFÜHL GESTEIGERT)

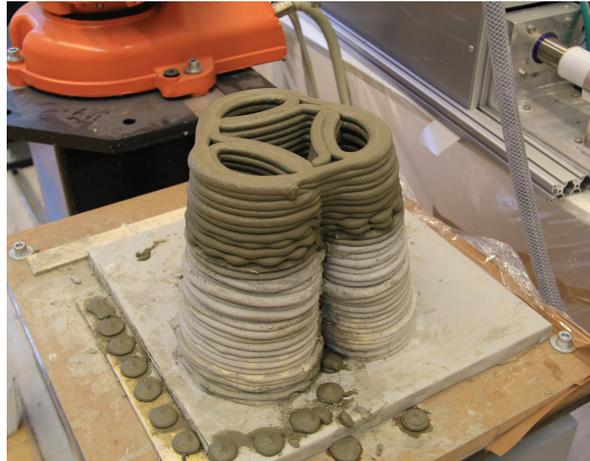


Bild 346-350.

BETON 3D DRUCKEN
HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN
VERSUCHSBLOCK II
BETONKNOTEN



VERSUCH 9 SCHICHTEN

VERSUCH 8 SCHICHTEN



Bild 351-353. Unterschiedliche Struktur der Druckbahnen durch fehlende Befestigung der Druckkammer

ERKENNTNISSE AUS DEM VERSUCH IV: 8 SCHICHTEN:

- Die Befestigung der Führungseinrichtung an der Druckeinheit wurde nicht geschlossen und darum wurde die Bewegung des Druckzylinders beeinflusst.
- Der Druckkolben bewegte sich immer ruckartig
- Blasenartiges Verhalten des Druckmaterials

ERKENNTNIS VERSUCH IV: 9 SCHICHTEN:

- + Drucken funktionierte sehr gut
- + Verbindung zwischen den Schichten und Stabilität perfekt
- + Keine Verformung der unteren Druckbahnen

SCHLISSUNG ZU EINEM KREIS (STEP BY STEP):

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM

VORSCHUB MÖRTEL: 300 G/MIN

VORSCHUB ROBOTER: 50 MM/S; 80%

DIE ZUSTELLHÖHE PRO SCHICHT: 7,2MM

SCHICHTEN: 8

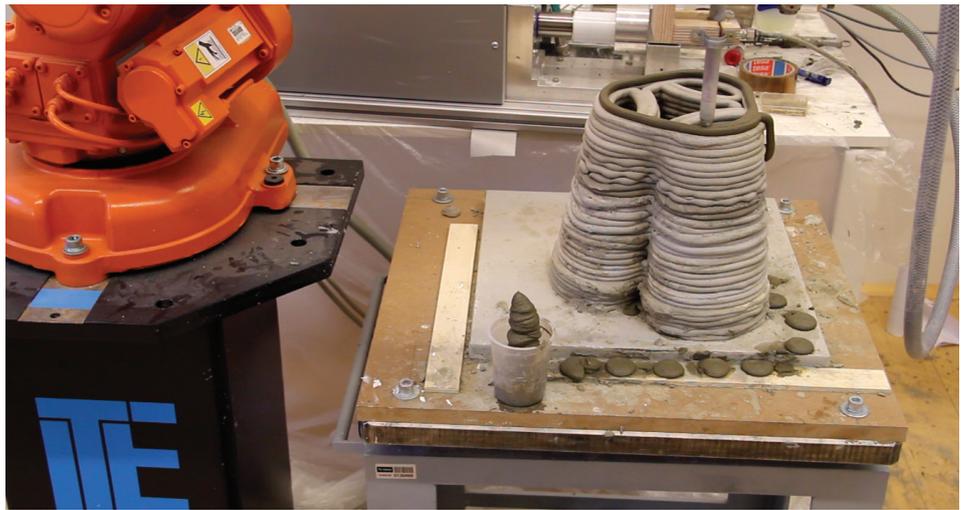
+ 10 G WASSER UND 1G VERZÖGERER (JE NACH GEFÜHL GESTEIGERT)

BESCHLEUNIGERANTEIL: OHNE BESCHLEUNIGER



Bild 354-356. Entwicklung des Druckmaterials beim Schließen des Betonknotens zu einer Kreisform

BETON 3D DRUCKEN
HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN
VERSUCHSBLOCK II
BETONKNOTEN



*Bild 357-359. Entwicklung
des Druckmaterials beim
Schließen des Betonknotens
zu einer Kreisform*

BETON 3D DRUCKEN
HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN
VERSUCHSBLOCK II
BETONKNOTEN



Bild 360-362. Entwicklung des Druckmaterials beim Schließen des Betonknotens zu einer Kreisform

BETON 3D DRUCKEN
HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN
VERSUCHSBLOCK II
BETONKNOTEN



Bild 363-367. Betrachtung der verschiedenen Druckbahnen nach dem Aushärtungsprozess

ERKENNTNISSE AUS DER KREISSCHLISSUNG:

- + Prototyp endete mit einer Kreisform, gewünschtes Ziel wurde erreicht
- + Drucken funktionierte sehr gut
- + Verbindung zwischen den Schichten und die Stabilität perfekt
- + Keine Verformung der unteren Druckbahnen
- + Spannende Geometrie im Kern
- + Acht Schichten durchaus möglich
- + Keine Rissbildung



Bild 357a. Vollendung des
Betonknotens

RÉSUMÉ BETONKNOTEN:

Die robotergesteuerte Fertigung eines Betonknotens wurde nachgewiesen. Der Herstellungsprozess war sehr zeitaufwändig und bestand aus mehreren Versuchen. Anhand des gefertigten Prototyps konnten die einzelnen Probleme des Materials, des Druckverhaltens, der Aufbereitung der CAD-Linien und des Fortschritts abgelesen werden. Trotz der positiven Realisierung muss man anmerken, dass sich diese Technologie noch in der Entwicklung befindet und nach intensiver Verbesserung strebt. Es herrschte leider keine Prozesssicherheit.

BETON 3D DRUCKEN
HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN
VERSUCHSBLOCK II
BETONKNOTEN

Bild 357b, links.
Herstellung eines Gipsmodells im Maßstab 1:1 für eine Stützenauflager der Sagrada Familia



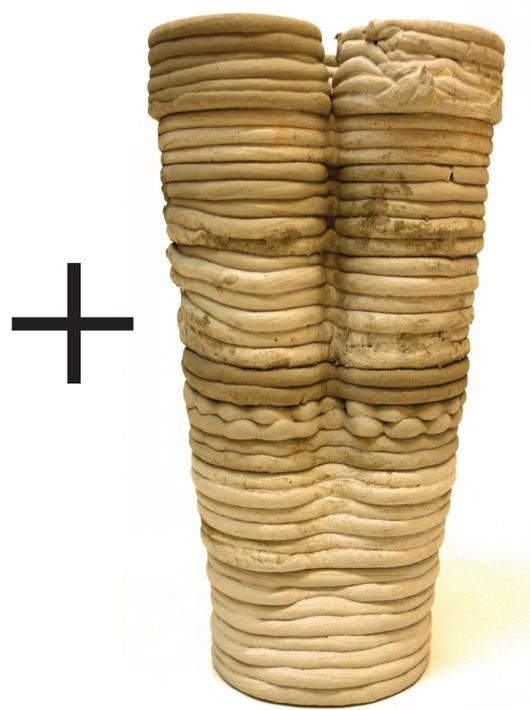
Bild 357c, rechts.
3D Druck Betonknoten



Bild 357d, links.
Stützenauflager im MuCEM in Marseille



Bild 357e, rechts.
3D Druck Betonknoten



BETON 3D DRUCKEN
HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN
VERSUCHSBLOCK II
BETONKNOTEN

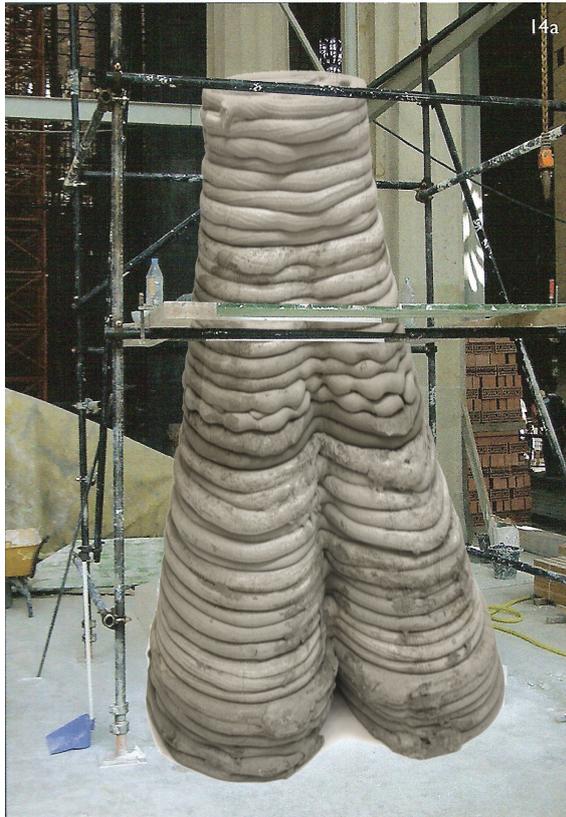


Bild 357f
Fotomontage bei der Verwendung des Betonknotens als Auflagerstütze



Bild 357g.
Fotomontage bei der Verwendung des Betonknotens als Auflagerstütze



BETON 3D DRUCKEN
HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN
VERSUCHSBLOCK II
BETONIEREN AUF GEKRÜMMTEN FLÄCHEN

DRUCKEN AUF GEKRÜMMTEN FLÄCHEN (GESCHLOSSEN)

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM

VORSCHUB MÖRTEL: 300 G/MIN

BESCHLEUNIGERANTEIL: OHNE BESCHLEUNIGER

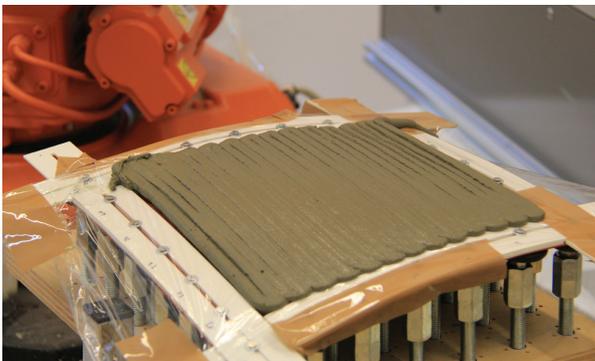
VORSCHUB ROBOTER: 50 MM/S; 80%

DIE ZUSTELLHÖHE PRO SCHICHT: 7,2MM

SCHICHTEN: 1 (LAMINIEREN)

+ 10 G WASSER UND 1G VERZÖGERER

(JE NACH GEFÜHL GESTEIGERT)



*Bild 369-375. flächiges
Drucken auf doppelt
gekrümmten Flächen
(geschlossene Struktur)*

DRUCKEN AUF GEKRÜMMTE FLÄCHEN (OFFEN)

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM

VORSCHUB MÖRTEL: 300 G/MIN

BESCHLEUNIGERANTEIL: OHNE BESCHLEUNIGER

VORSCHUB ROBOTER: 50 MM/S; 80%

DIE ZUSTELHÖHE PRO SCHICHT: 7,2MM

SCHICHTEN: 1 (LAMINIEREN)

+ 10 G WASSER UND 1G VERZÖGERER

(JE NACH GEFÜHL GESTEIGERT)



Bild 376-380. flächiges
Drucken auf doppelt ge-
krümmten Flächen (offene
Struktur)

ERKENNTNISSE BEIM DRUCKEN VON GEKRÜMMTEN FLÄCHEN:

- + Machbarkeit gegeben, Ergebnis sehr positiv
- + Funktioniert wie Laminierverfahren
- + Konstante Höhe
- + Verbindung der einzelnen Stränge gegeben
- eventuell die Druckgeschwindigkeit etwas drosseln oder Vorschub steigern

RÉSUMÉ: DRUCKEN AUF GEKRÜMMTE FLÄCHEN:

Das Drucken oder Laminieren auf gekrümmte Flächen konnte mit der Technologie von COEBRO sehr gute Ergebnisse erzielen. Durch intensive Diskussionen mit den Mitarbeitern des Instituts für Tragwerksentwurf entstand die spontane Idee, Beton auf gekrümmte Formen zu drucken. Ein verstellbarer Schaltisch wurde adaptiert und diente als Tragstruktur für die Druckversuche, um eine doppelt gekrümmte Geometrie zu erstellen.

Die Herstellung von geschlossenen und offenen Schalen konnte einwandfrei und mit ansprechender Qualität durchgeführt werden.

Auf Basis dieser Druckversuche wurde die Erkenntnis gewonnen, dass durch das flächige Auftragen des Druckmaterials, die Anforderungen an die Mörtel Eigenschaften gesenkt wurden. Eine geringere Frühstandsfestigkeit und eine flüssigere Mörtelmischung wäre durchaus akzeptabel.

Nichtsdestotrotz ist diese Technologie stets mit der aufwendigen Fabrikation einer Unterkonstruktion verbunden und kann somit nicht eindeutig zum Bereich des Beton 3D Drucks gezählt werden.

MÖGLICHE WEITERENTWICKLUNG FÜR ANWENDUNGEN IM GROSSEN MASSSTAB:



Bild 380a. Utopische Fotomontage einer Anwendung von Beton 3D Druck für Schalenträgerwerke.

BETON 3D DRUCKEN
HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN
VERSUCHSBLOCK II
BETONIEREN AUF GEKRÜMMTEN FLÄCHEN

SIKA SCHRIFTZUG

Die Herstellung des Sika Logos wurde schon im Versuchsblock I getestet. Zu diesem Zeitpunkt war die Forschung noch nicht ausgereift, weshalb am Ende des Versuchsblocks II nochmals dasselbe Experiment durchgeführt wurde. Die erlangten Erkenntnisse forderten die Veränderung und die Verbesserung einiger Parameter.

DÜSEN DURCHMESSER: 10MM

VORSCHUB MÖRTEL: 350 G/MIN

BESCHLEUNIGERANTEIL: OHNE BESCHLEUNIGER

VORSCHUB ROBOTER: 50 MM/S; 85%

DIE ZUSTELLHÖHE PRO SCHICHT: 7,2MM

SCHICHTEN: 1 _ 6 UND 7

+ 10 G WASSER UND 1G VERZÖGERER

(JE NACH GEFÜHL GESTEIGERT)

ERSTER VERSUCH (7 Schichten)



Bild 381. Versagen der Stabilität

ERKENNTNISSE AUS DEM ERSTEN VERSUCH DES SIKA SCHRIFTZUGS

- + Machbarkeit gegeben, leider fiel der Schriftzug aufgrund von Vibrationen in sich zusammen
- + Geschwindigkeiten perfekt; für die Herstellung von eng aneinander liegenden Bahnen musste die Geschwindigkeit gesteigert werden
- + Konstante Höhe
- + Verbindung der einzelnen Stränge gegeben
- + Ideales Druckverhalten
- Formstabilität hatte Verbesserungspotential; das Sika Logo musste jedoch auf diese Weise gedruckt werden

ZWEITER VERSUCH (6 Schichten)



Bild 382. Sika Schriftzug



Bild 383.

BETON 3D DRUCKEN
HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN
VERSUCHSBLOCK II
SIKA SCHRIFTZUG

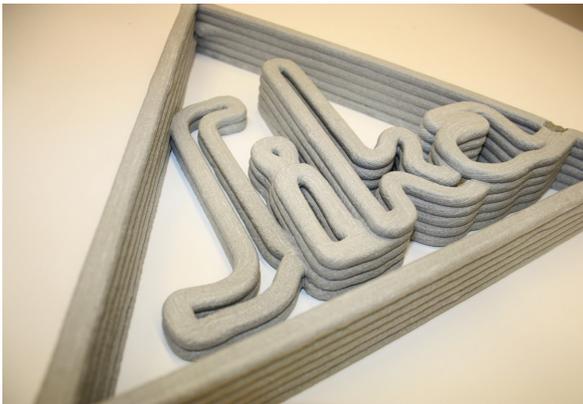
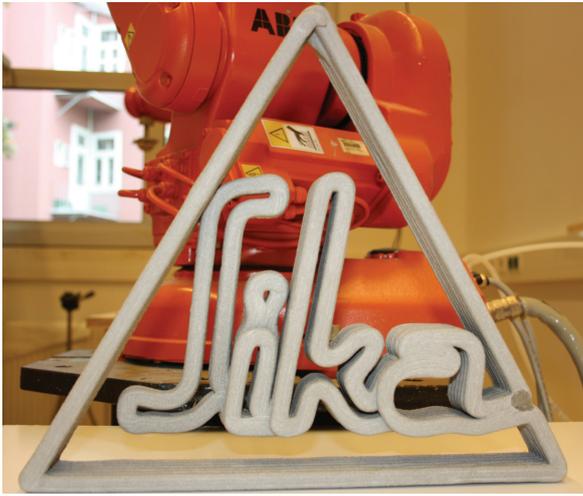


Bild 384-386. Ausgehärtetes Sika Logo

ERKENNTNISSE AU DEM ZWETEN VERSUCH DES SIKA SCHRIFTZUGS

- + Gleich gute Ergebnisse wie beim ersten Versuch
- + Sechs Schichten waren für die Stabilität besser
- + Keine Rissbildung nach dem Aushärten
- + Gute Oberflächenqualität
- + Zweifelsohne die beste Mischung der gesamten Versuche

BETON 3D DRUCKEN
HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN
VERSUCHSBLOCK II
SIKA SCHRIFTZUG

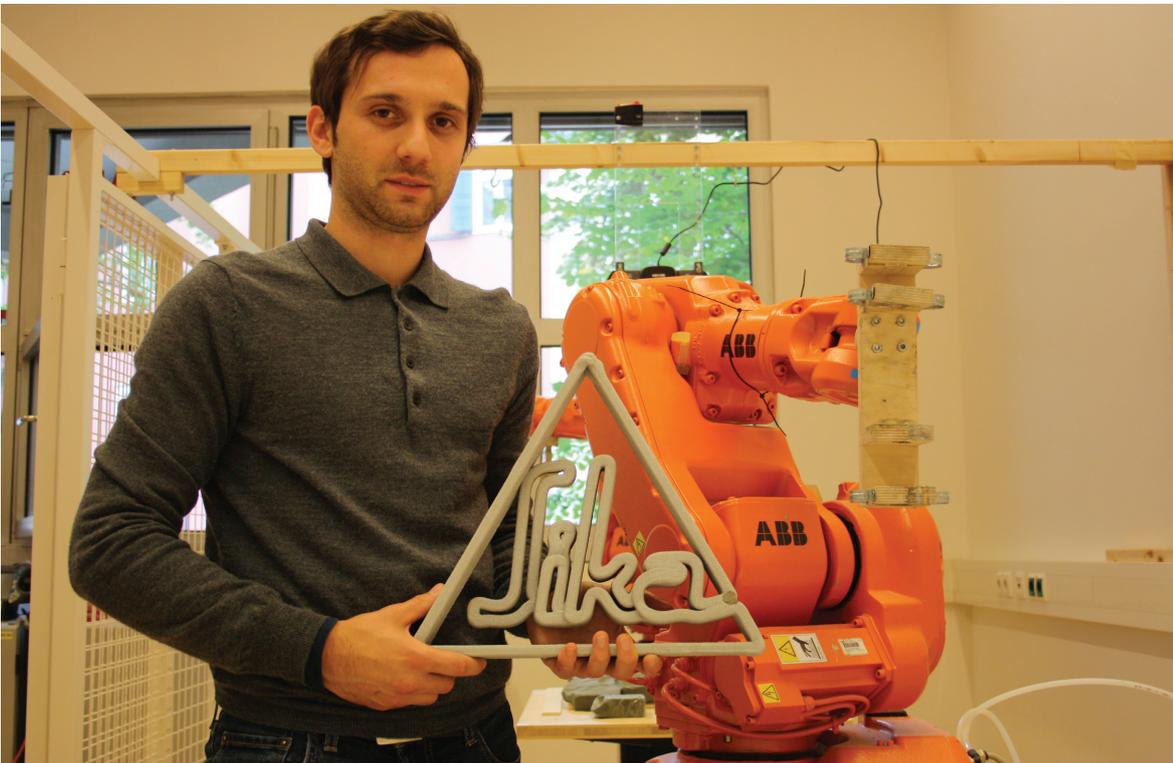


Bild 387-389. Sika Logo

5. RÉSUMÉ UND AUSBLICK

- TECHNISCH

- ARCHITEKTONISCH

RESÜMEE UND AUSBLICK: TECHNISCH

Bild 390-392. Beton 3D
Druckversuche, COEBRO

Durch die digitale Planung und additive Herstellungstechniken konnte das Spektrum des Entwurfs von Betonsonderbauteilen erweitert werden. Diese Technologie brachte jedoch einige Fragen und Aufgaben mit sich die gelöst werden sollten, damit sie in der praktischen Nutzung angewendet werden können, um das herkömmliche Betonierverfahren zu unterstützen.

Die Umsetzung der Prototypen war sehr erfolgreich, obwohl sich durch die Kombination der verschiedenen Parameter keine Prozesssicherheit ergab.

Die Versuche zeigten, dass die richtige Wahl der Mörtelmischung für die Pumpbarkeit durch den Schlauch und die Frühstandsfestigkeit des schichtweise gedruckten Bauteils ausschlaggebend war.

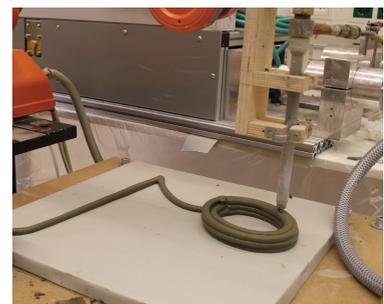
Wurde der Anteil des Beschleunigers nicht auf ein Minimum reduziert erstarrte die Masse in der Düse zu schnell. Das gedruckte Material war jedoch zu flüssig, um eine definierte Form zu bilden. Das beste Druckverhalten konnte allerdings ohne Betonbeschleuniger erzielt werden.

Durch die richtige Zusammensetzung der Mörtelbestandteile konnte mittels des Drucksystems der gewünschte Prototyp an der richtigen Stelle, mit den geforderten Eigenschaften, umgesetzt werden.

Die Qualität des Druckmaterials war so außergewöhnlich, dass sogar Fehlstellen, die durch Lufteinschlüsse hervorgerufen wurden, ausgebessert werden konnten. Die Abstimmung zwischen Vorschubgeschwindigkeit des Roboters und Druckgeschwindigkeit der MiniShot Maschine war für den Projekterfolg entscheidend.

Durch die Druckversuche stellte sich heraus, dass die Robotersteuerung mit dem Programm Hal für diese Anwendung, die beste Lösung war.

Ausschlaggebend für die Formstabilität und die Druckumsetzung waren durchgehende Parallelbahnen, die mit der Düse glatt gedrückt wurden.





Um sich den Abläufen des 3D Drucks anzunähern und das System zu verbessern, sollte der automatisierte Fertigungsablauf gesteigert werden, indem die Dosierung und die Aufbereitung der einzelnen Mörtelkomponenten in die Prozesskette integriert werden.

In Zukunft sollte eine Programmierung erstellt werden, die eine parallele Steuerung der Druckeinheit und des Roboters reibungslos ermöglicht. Zum Beispiel für Stop & Go Anwendungen des Druckstranges, durch die sich eine Zu- und Ausfahrt beim Drucken erübrigt.

Bild 393-396. Beton 3D
Druckversuche, COEBRO



Da die Säuberung der Maschinen mit hohem Zeitaufwand verbunden war, sollte über eine Automatisierung oder Vereinfachung der Anlagenreinigung nachgedacht werden. Eine Optimierung des Fassungsvermögens der Druckkammer wäre von Nöten, damit in Zukunft nicht nur die Herstellung von kleinen, sondern auch von großen Bauteilen erreicht werden kann.

Zusätzlich stellte die Ansammlung von Luft in der Mörtelmischung ein großes Problem dar, das anhand von Druckausgleichskammern gelöst werden könnte.



Im Bereich der Betonchemie muss noch genauer geforscht werden, da die Mörtelkomponenten, der Beschleuniger, die Temperatur und der Luftdruck großen Einfluss auf die Maßgenauigkeit, die Festigkeit und die Rissbildung haben.

Statische Versuche sollen die Festigkeitseigenschaften der Prototypen genauer definieren, um Aussagen über die Notwendigkeit der Zugabe von Fasern oder anderen Bewehrungen zu treffen.



Man sollte sich bereits im Entwurfsprozess Gedanken über die Positionierung der Druckbahnen in Abhängigkeit der Formstabilität machen. Mit Hilfe von anderen Errungenschaften im Bereich der automatisierten Fertigung, sollte eine Optimierung der Oberfläche und Maßgenauigkeit erreicht werden. Ein 3D Scanner könnte die realisierten Druckbahnen in Echtzeit erfassen, Fehler erkennen und mittels eines zweiten Roboterarms ausbessern.

RESÜMEE UND AUSBLICK: ARCHITEKTONISCH

Die Auflistung der präsentierten Versuchsreihen und Prototypen, zeigte das vertikale Auftragen von Schichten und das Laminieren von Flächen, die exemplarisch für die Möglichkeiten und das Potential des Beton 3D Drucks standen. Dabei wurde der Baustoff gemäß seiner Materialeigenschaften effizient und nachhaltig eingesetzt. Der Begriff *nachhaltig* bezieht sich auf die Minimierung der Vorlaufzeiten für die Planung, auf den Verzicht von Schalungssystemen und auf die Einsparung von Transportwegen.

Diese Tatsache muss in Zukunft zu einem Undenken im Bereich ressourcenschonender Formen führen und neue Themen, wie zum Beispiel zukunftsreiche Geometrien spruchreif machen. Im Forschungsgebiet der Wandsysteme könnten durch eine Auflösung der Strukturen bauphysikalische Eigenschaften verbessert und nachhaltig eingesetzt werden, ohne Stabilität einzubüßen.

Die erzielten Ergebnisse der Beton- und Oberflächenqualität von COEBRO sind durchaus mit etablierten Beton oder Keramik 3D Druckverfahren, wie das Concrete Printing Projekt der University von Loughborough (siehe S.46), 3D Printed Concrete Castle Projekt von Andrey Rudenko (siehe S. 50) und das Building Bytes-3D Printed Bricks Projekt von Brian Peters (siehe S.28) vergleichbar.

COEBRO



Bild 397. links, COEBRO

CONCRETE PRINTING



Bild 398. rechts, Concrete Printing, University von Loughborough

3D PRINTED CONCRETE CASTLE



Bild 399. links, 3D Printed Concrete Castle

BUILDING BYTES

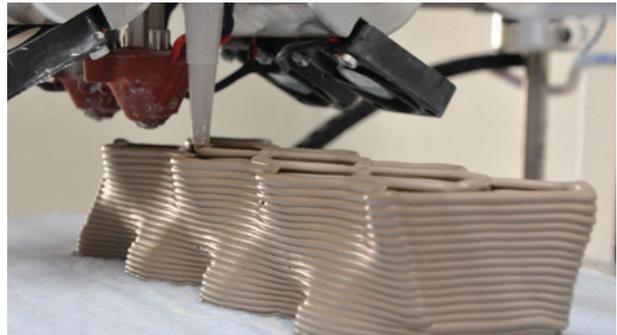


Bild 400. rechts, Building Bytes

Das markante Erscheinungsbild der einzelnen Extrusionsschichten ist in COEBRO, sowie in den eben erwähnten Beispielen gleich. Somit lässt sich behaupten, dass auch ähnliche Druckresultate hinsichtlich der Maßgenauigkeit erreicht werden. Darüber hinaus scheint die Größe der Druckbahnen und der Verbund zwischen den Schichten annähernd ident.

Im Bereich der Düsenteknologie ist ein deutlicher Unterschied wahrnehmbar. Die Universität von Loughborough setzt sich mit Stop and Go Mechanismen auseinander, die ein Anhalten und Absetzen des Druckstranges ermöglichen. Durch die Optimierung der Düsenteknologie soll eine Verbesserung der Maßgenauigkeit und des Erscheinungsbildes von COEBRO erarbeitet werden.

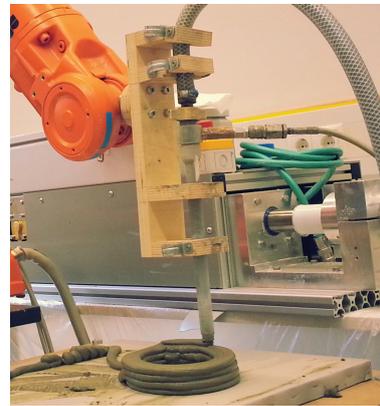
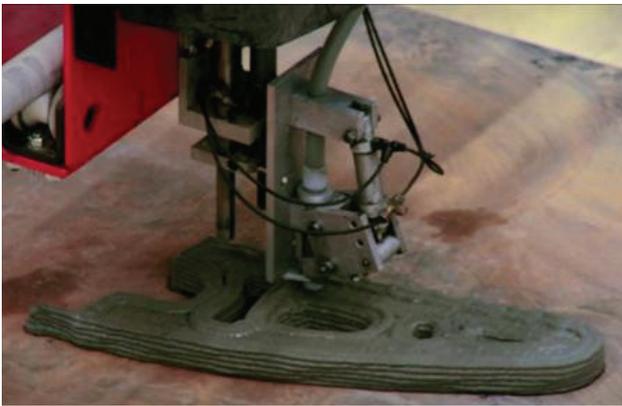


Bild 401. links, Druckdüse Concrete Printing, University of Loughborough

Bild 401. rechts, Druckdüse COEBRO

Die effektiven Festigkeiten und Eigenschaften des erstarrten Druckmaterials von COEBRO können nicht mit den anderen Projekten verglichen werden, da meine Masterarbeit Belastungstests nicht beinhaltet. Der nächste Schritt für eine zukünftige Weiterentwicklung muss eine gezielte Studie über das mechanische Verhalten des Materialsystems beinhalten.

Ob eine derartige Bauweise den direkten Sprung in die Wirtschaft schafft, hängt stark von einer künftigen, intensiven Forschung im Bereich des Druckmaterials, der Drucktechnologie, der Festigkeitseigenschaften und der Oberflächenqualität ab. Es gibt jedoch die Möglichkeit den Beton 3D Druck in der Herstellung von speziellen Betongeometrien, als vorgefertigte Tragstrukturen oder als verlorene Schalungen einzusetzen. Die Verwendung dieser Technologie soll den gesamten Fertigungsprozess von Betonsonderbauteilen vereinfachen, verlangt aber einer Nachbehandlung der Oberfläche.

Auch stellt sich die Frage, ob diese Technologie auf langen Zeitraum gesehen den Bedarf der Wirtschaft hinsichtlich der Effizienz decken kann. Das Ziel sollte auf jedenfall eine ökologische und ökonomische Massenproduktion trotz individueller Maßanfertigung sein.

QUELLENVERZEICHNIS:

BÜCHER:

- Bell-Cokcan, Sigrid/Braumann, Johannes: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design. ROB|ARCH, Wien 2012
- Corbusier, Le: Städtebau 1979 (Wiedergabe der 1.Auflage 1929), Stuttgart, S. 253
- Fastermann, Petra: Eine Zukunftstechnologie-Kompakt erklärt. 3D-Druck/Rapid Prototyping, Berlin-Heidelberg 2012
- Glynn/Sheil: Making Digital Architecture. FABRICATE: London 2011
- Gramazio/Kohler/Langenberg: Negotiating Design & Making. FABRICATE: , Zürich 2014
- Höfler/Schlumpf/Jahn: Sika Spritzbeton Handbuch. Sika Schweiz AG, Zürich 2012
- Iwamoto, Lisa: Architectural and Material Techniques. Digital Fabrications, New York 2009, S. 6
- Müller, Lars: Digital Materiality in Architecture. Gramazio & Kohler , 2008
- Rühle, Herrmann : Räumliche Tragwerke, Konstruktion und Ausführung. Bd. 1. Berlin 1969

AUFSÄTZE, PUBLIKATIONEN, BROSCHÜREN:

- dezeen magazine: Venice Biennale Theme `Common Ground` Zaha Hadid Architects, <<http://www.dezeen.com/2012/08/18/arum-by-zaha-hadid-architects-at-venice-architecture-biennale-2012-2/>>,in: <<http://www.dezeen.com/>>, 22. September 2014
- Dini, Enrico: D-Shape, <http://www.d-shape.com/d_shape_presentation.pdf>, in: <<http://www.d-shape.com/>>, 25. September 2014
- El Ahwany, Claudia: Vom Wasser inspiriert, mit Beton realisiert. BauPortal. Horb a.N., 10/2012, S. 28-29
- Gotzner, Peter: Drohnen spinnen selbstständig Netze, <<http://www.spiegel.de/netzwelt/gadgets/robotik-fliegen-de-spinnen-drohnen-spannen-seile-a-932890.html>>, in: <<http://www.spiegel.de/>>, 22. September 2014
- Khoshnevisk, Bodiford u.a.: Luna Contour Crafting - A Novel Technique for ISRU-Based Habitat Development, University of Southern California-NASA-University of Alabama-Morgan Research Corporation. 2005
- Khoshnevisk, Carlson u.a.: Contour Crafting Simulation Plan for Luna Settlement Infrastructure Buildup, <<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784412190.155>>, in: <<http://ascelibrary.org/>>, Oktober 2012
- Le/Austin/Lim u.a.: Hardened properties of high-performance printing concrete, Department of Civil and Buidlung Engineering Loughborough Universitiy 2011

TABELLEN:

- 1.Tabelle: Höfler/Schlumpf/Jahn: Sika Spritzbeton Handbuch, Sika Schweiz AG, Zürich 2012. S. 17
- 2.Tabelle: Höfler/Schlumpf/Jahn: Sika Spritzbeton Handbuch, Sika Schweiz AG, Zürich 2012. S. 18
- 3.Tabelle: Höfler/Schlumpf/Jahn: Sika Spritzbeton Handbuch, Sika Schweiz AG, Zürich 2012. S. 21
- 4.Tabelle: Jürgen Holl, Graz, 8. Mai 2014
- 5.Tabelle: Jürgen Holl, Graz, 8. Mai 2014

ONLINE:

- 3D Printer Plans, (16.04.2014): Chinese release ew mages of 3D printed houses, <<http://3dprinterplans.info/tag/shanghai-winsun-deco-ration-design-engineering-company/>>, in: <<http://3dprinterplans.info/>>, 25. September 2014
- acrch2o: ICD/ITKE Research Pavilion 2012, <<http://arch2o.com/icditke-research-pavilion-2012/>>, in: <<http://www.arch2o.com/>> , 22. September 2014
- EOS: Für Technologie-Interessierte: <http://www.eos.info/additive_fertigung/fuer_technologie_interessierte>, in: <<http://www.eos.info/>>, 21. September 2014
- FABLAB LUZERN: HEISSDRAHT-SCHNEIDGERÄT, CNC-GESTEUERT, <<http://luzern.fablab.ch/heissdraht-schneidegerat-cnc-ge-steuert/>>, in: <<http://luzern.fablab.ch/>>, 21. September 2014
- FABRICATE: Conference, <April 2011: <http://www.fabricate2011.org/about-fabricate/>>, in: <<http://www.fabricate2011.org/>>, 19. Sep-tember 2014
- itke: Forschungspavillon ICD/ITKE 2012, <<http://www.itke.uni-stuttgart.de/entwicklung.php?id=30>>, in: <<http://www.itke.uni-stutt-gart.de/index.php?lang=de>>, 22. September 2014
- Khoshnevisk, Behrokh: 3D printer can build a house in 20 hours. August 2012, <<http://www.youtube.com/watch?v=ehnzfGP6sq4>>, TE Marco Evers: Häuser aus dem Drucker, Der Spiegel, August 2004 DxOjai, 24. September 2014
- ROBOFOLD: Prozess, <<http://www.robofold.com/make/process>>, in: <<http://www.robofold.com/>> 22. September 2014
- Varias, Lambert: 3D Printed Concrete Mini Castle: Disneyland Minnesota, <<http://technabob.com/blog/2014/08/27/3d-printed-concre-te-mini-castle/>>, in: <<http://technabob.com/>>, 24. September 2014
- Westphal, Chris: Drohnen werden zu Spinnen der Luft, <<http://www.drohnen.de/707/forschung-und-video-drohnen-werden-zu-spin-nen-der-luft/>>, in: <<http://www.drohnen.de/>>, 22. September 2014
- Zara, Janelle: Eine blühende Hommage an Frei Otto: Zaha Hadids Installation für die Architekturbienale Venedig - See more at: <<http://de.blouinartinfo.com/news/story/820389/eine-bluhende-hommage-an-frei-otto-zaha-hadids-installation#sthash.ZFcXvq7W.dpuf>> <http://de.blouinartinfo.com/news/story/820389/eine-bluhende-hommage-an-frei-otto-zaha-hadids-installation>>, in: <<http://de.blouinar-tinfo.com/>>, 22. September 2014

INTERVIEWS:

- Interview mit Mario Carpo, geführt von Matthias Kohler, Making Digital Architecture. Fabricate, 2011
- Interview mit Markus Jahn, geführt von Jürgen Holl, Graz, Mai 2014
- Interview mit Felix Amtsberg, geführt von Jürgen Holl, Graz, 9. September 2014
- Interview mit Kruno Stephan Thaleck, geführt von Jürgen Holl, C³ Atelier Wien, Jänner 2012

PLÄNE:

- Plan 1. Jürgen Holl, ITE Graz, 7. Mai 2014
- Plan 2. Jürgen Holl, Graz, 22. Mai 2014
- Plan 3. Jürgen Holl, Graz, 22. Mai 2014

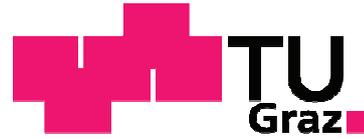
BILDERVERZEICHNIS:

- Bild 0. Krömer, Gerhard: Hundertwasser Architektur, Gehasst-Gebaut-Geliebt, Kunsthaus Wien, 2014
 Bild 1. „Los Manantiales“. Restaurant at Xochimilco, Candelá/Alvarez Ordóñez/Alvarez Ordóñez, 14th International Architecture Exhibition-fundamentals, Venice, 2014
 Bild 2. Rühle, Herrmann : Räumliche Tragwerke, Konstruktion und Ausführung, Bd. 1. Berlin 1969, S. 177
 Bild 3. Höfler/Schlumpf/Jahn: Sika Spritzbeton Handbuch, Sika Schweiz AG, Zürich 2012, S.1
 Bild 4. Jürgen Holl, Versuchsstollen Hagerbach, Jänner 2014
 Bild 5-6. <http://www.herz-zu-herz.ch/Wohnstock.html>
 Bild 7. http://gdb.rferl.org/AB785A96-DCDC-4109-BEA2-4C368D8FD9B7_mw1024_s_n.jpg
 Bild 8. <http://www.xsead.cmu.edu/uploads/media/path/379/iris-van-herpen-capriole-collection-wired-design.jpg>
 Bild 9. <http://cdn.shopify.com/s/files/1/0354/6605/files/3dprintedarchitecturalmodel.jpg?2545>
 Bild 10. links, http://www.digitalcrafting.dk/wp-content/uploads/2010/11/IMG_6232_.jpg
 Bild 11. <http://www.fabricate2011.org/speaker-asbj%C3%B8rn-s%C3%B8ndergaard/>
 Bild 12. http://fluxstructures.net/_images/_hovedbilleder/_01a-forside.gif
 Bild 13. http://urbano.com/news/wp-content/uploads/2009/07/BW_001.jpg
 Bild 14. <http://www.storefrontnews.org/images/event/big/146.jpg/>
 Bild 15. Iwamoto, Lisa: Architectural and Material Techniques. Digital Fabrications, New York 2009, S. 94
 Bild 16. http://www.jakehaggmark.com/images/voute/VOUTE_PER_04_BC.jpg
 Bild 17. <http://www.evolous.com/wp-content/uploads/2012/07/La-Vo%C3%B8te-de-LeFevre-Installation-5.jpg>
 Bild 18. <http://cdn.archinect.net/images/650x/zp/zphr3y03anknt5rb.jpg>
 Bild 19. <http://www.matterdesignstudio.com/periscope/>
 Bild 20. <http://www.matterdesignstudio.com/periscope/>
 Bild 21-25. <http://www.matterdesignstudio.com/periscope/>
 Bild 27. <http://2.bp.blogspot.com/-MwPSPBaQOA/UNXUMLhpLEI/AAAAAAAAAAdg/UHT99qF4oGU/s1600/Originala.jpg>
 Bild 28-29. <http://www.block.arch.ethz.ch/brg/teaching/msc2-studio-at-hyperbody-tu-delft>
 Bild 30. http://static.dezeen.com/uploads/2012/10/dezeen_Building-Bytes-by-Brian-Peters-1.jpg
 Bild 31. http://static.dezeen.com/uploads/2012/10/dezeen_Building-Bytes-by-Brian-Peters-5.jpg
 Bild 32. <http://media-cache-ec0.pinimg.com/736x/9a/6b/f9/9a6bf9249dadaa333b1bb8ff76a97155.jpg>
 Bild 33. http://static.dezeen.com/uploads/2012/10/dezeen_Building-Bytes-by-Brian-Peters-4.jpg
 Bild 34. <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/221.html>
 Bild 35. http://www.park-books.com/files/images/press/TheRoboticTouch_p399_MeshMould.jpg
 Bild 36. http://i.vimeocdn.com/video/45444295_640.jpg
 Bild 37. <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/221.html>
 Bild 38. http://www.architectmagazine.com/Images/1821925596_RD Awards_Archolab_Morphfaux_00_HERO_tcm20-1971914.jpg?Text=click%2520to%2520close
 Bild 39. http://archolab.com/wp-content/uploads/2013/02/01_Morphfaux_Header.jpg
 Bild 40. http://archolab.com/wp-content/uploads/2013/02/21_Morphfaux_wiredprofile.jpg
 Bild 41. <http://archolab.com/archives/40>
 Bild 42. <http://www.designboom.com/cms/images/andrea02/pike07.jpg>
 Bild 43. <http://thefunambulistdotnet.files.wordpress.com/2010/12/gramaziokohlervenise1.jpg>
 Bild 44. http://static.dezeen.com/uploads/2012/01/dezeen_Flight-Assembled-Architecture-3.jpg
 Bild 45-48. <http://arch2o.com/icditke-research-pavilion-2012/>
 Bild 49. <http://www.spiegel.de/netzwelt/gadgets/bild-932890-566642.html>
 Bild 50. http://i.ytimg.com/vi/_T0J5PB2av8/maxresdefault.jpg
 Bild 51. http://www.youtube.com/watch?v=_T0J5PB2av8
 Bild 52. <http://www.robofold.com/assets/img/gallery/img-cnslt-02-05.jpg>
 Bild 53. <http://www.robofold.com/assets/img/gallery/img-sftwr-02-01.jpg>
 Bild 54. http://static.dezeen.com/uploads/2012/08/dezeen_Arum-by-Zaha-Hadid-Architects-at-Venice-Architecture-Biennale-2012-21.jpg
 Bild 55a. http://www.robofold.com/assets/img/make_process/img-prdctn-prcss-04-s-w447-h310-q75-m1395932848.jpg
 Bild 55b. http://rhino-in.com/news/images/2013_01_11_02_rhino_in_RoboFold.jpg
 Bild 56a. El Ahwany, Claudia: Vom Wasser inspiriert, mit Beton realisiert. BauPortal, Horb a.N., 10/2012, S.29
 Bild 56b. El Ahwany, Claudia: Vom Wasser inspiriert, mit Beton realisiert. BauPortal, Horb a.N., 10/2012, S.29
 Bild 56c. http://fadwamezughl.files.wordpress.com/2012/05/img_65583.jpg
 Bild 57. Christian Pichlkastner, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz
 Bild 58. <http://www.idw-online.de/de/newsimage?id=1541&size=screen>
 Bild 59. <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/fdm.png>
 Bild 60. http://blog.conrad.at/wp-content/uploads/2014/02/409630_RB_01_FB.EPS_1000.jpg
 Bild 61. <http://www.see3.de/glossar/pics/SL.jpg>
 Bild 62. <http://blog.nus.edu.sg/u0804594/files/2011/10/LOM-Process.png>
 Bild 63. http://m.wsj.net/video/20110715/0715113dprinterconcrete1/0715113dprinterconcrete1_512x288.jpg
 Bild 64. Le/Austin/Lim/Buswell u.a.: Hardened properties of high-performance printing concrete, Department of Civil and Building Engineering Loughborough University 2011
 Bild 65. <http://www.3ders.org/images/concrete-3d-printing2.jpg>
 Bild 66. <http://johnstonarchitects.files.wordpress.com/2012/03/lunar-printer3.jpg>
 Bild 67. <http://inhabitat.com/robo-builder-builds-a-building/wp-content/blogs.dir/1/files/robobuilderca.jpg>
 Bild 68. <http://www.vvork.com/wp-content/uploads/2006/05/pow15a.JPG>
 Bild 69. http://4.bp.blogspot.com/-oNpRufNntd8/T71Ve8BcbG1/AAAAAAAAAd4/oLbeguNfjR0/s400/contour_03.jpg
 Bild 70. <http://static4.businessinsider.com/image/52ceb68469beddf0f1c32cc/researchers-are-making-a-3d-printer-that-can-build-a-house-in-24-hours.jpg>
 Bild 71. http://shiro-studio.com/i/size/x1600/http://shiro-studio.com/images/jpeg/new/Radiol_05.jpg
 Bild 72. <http://www.vitodibari.com/progettosan.it/wp-content/uploads/2012/11/3d-printer-enrico-dini-d-shape6-N-241295-13.jpg>
 Bild 73. <http://www.vcharkarn.com/uploads/199/199218.jpg>
 Bild 74. http://blog.thedpages.com/wp-content/uploads/2013/02/D-Shape_printer-dpages.jpg
 Bild 75. <http://3dprinterplans.info/wp-content/uploads/2014/04/WinSun-3D-Printed-House-China-2.jpg>
 Bild 76. <http://www.designboom.cn/wp-content/uploads/2014/04/3d-printed-houses-24-hours-designboom-01.jpg>
 Bild 77. <http://en.twtn.com/Upload/14/4/16092536665.jpg>
 Bild 78. <http://d.ibtimes.co.uk/en/full/1375658/each-3d-printed-house-measures-200-square-metres>
 Bild 79. <http://3dprinterplans.info/wp-content/uploads/2014/04/WinSun-3D-Printed-House-China.jpg>
 Bild 80. <http://printreality.ru/wp-content/uploads/2014/04/house-3d-printed-shanghai-5.png>
 Bild 81. <http://3dprinterplans.info/wp-content/uploads/2014/04/WinSun-3D-Printed-House-China-3.jpg>
 Bild 82. <http://tehnabob.com/blog/2014/08/27/3d-printed-concrete-mini-castle/>
 Bild 83. <http://www.3ders.org/images/2014/world-first-3d-printed-concrete-castle-20.jpg>
 Bild 84. <http://www.youtech.nl/wp-content/uploads/2014/08/3D-Printed-Castle1.jpg>
 Bild 85. http://www.electronicproducts.com/uploadedImages/Packaging_and_Hardware/Prototyping_Tools_Equipment_Services/fajb_3d_printed_castle_03_sep2014.jpg
 Bild 86. <http://www.designer-daily.com/wp-content/uploads/2014/08/3d-printed-concrete-castle-08.jpg>
 Bild 87. <http://4.bp.blogspot.com/-xyec5R4YSGG/VARFZQ2qGI/AAAAAAAAAIs0/BiBaoTLT29c/s1600/world-first-3d-printed-concrete-castle-25.jpg>

- Bild 88. <http://disrupt3d.com/wp-content/uploads/2013/04/usc-nasa-2.jpg>
 Bild 89. http://f.fastcompany.net/multisite_files/fastcompany/imagecache/inline-small/inline/2013/11/3021306-inline-crugcurvewallcc.jpg
 Bild 90. <http://www.kurzweilai.net/images/sinterhab-moon-base-4.jpg>
 Bild 91. <http://3dprinting.com/wp-content/uploads/2014/01/1.png>
 Bild 92. <http://www.yalescientific.org/wp-content/uploads/2013/04/Image-2C.jpg>
 Bild 93. http://spaceismore.files.wordpress.com/2013/08/3d-printed_lunar_base_design.jpg2C.jpg
 Bild 94. http://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2013/01/multi-dome_base_being_constructed2/12506598-1-eng-GB/Multi-dome_base_being_constructed.jpg
 Bild 95. http://spaceismore.files.wordpress.com/2013/08/3d-printed_lunar_base_design.jpg2C.jpg
 Bild 96. http://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2013/01/lunar_base_made_with_3d_printing/12501019-1-eng-GB/Lunar_base_made_with_3D_printing.jpg
 Bilder 90 - 94. Jürgen Holl, ITE 19. Jänner 2014
 Bild 101. Höfler/Schlumpf/Jahn: Sika Spritzbeton Handbuch. Sika Schweiz AG, Zürich 2012. S. 72.
 Bild 102-116. Jürgen Holl, Hagerbach, 21. Jänner 2014
 Bild 117. Jürgen Holl, Konzeptskizze, Graz
 Bild 118, Markus Jahn, Sika AG, 9. April 2014
 Bild 119-135. Jürgen Holl, Sika AG Schweiz, 25. Mai 2014
 Bild 136-142. Jürgen Holl, RDL Graz, 15. Juli 2014
 Bild 143-148. Jürgen Holl, Aufbereitung der Versuche, Graz 3. Juli 2014
 Bild 150-151. Jürgen Holl, Graz 15. August 2014
 Bild 152-158. Jürgen Holl, 22. August 2014
 Bild 159, Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz, <http://www.ite.tugraz.at/> 30.09.2014
 Bild 160. Jürgen Holl, RDL Graz, 7. Juli 2014
 Bild 161-162. Jürgen Holl, Robotersteuerung, Graz 30. September 2014
 Bild 163-167. Jürgen Holl, Graz, RDL, Graz 31. August 2014
 Bild 168. <https://www.whiteclouds.com/sites/default/files/glossary-images/Rhinoceros-Software.png>
 Bild 169-170. Jürgen Holl, Graz, RDL, Graz 31. August 2014
 Bild 171. http://www.westcam.cz/assets/images/akkordeon/hyper_CAD.jpg
 Bild 172-195. Jürgen Holl, Graz, RDL, Graz 31. August 2014
 Bild 196. Jürgen Holl, 22. August 2014
 Bild 197. Jürgen Holl, ABB Roboter Labor, Graz 29. August 2014
 Bild 198-200. Jürgen Holl, ITE, Graz, 9. September 2014
 Bild 201. Christian Pichlkastner, ITE, Graz 16. Juli 2014
 Bild 202. Jürgen Holl, ABB Labor, Graz, 27. August 2014
 Bild 203. Christian Pichlkastner, ITE, Graz 16. Juli 2014
 Bild 204-205. Jürgen Holl, 15. August 2014
 Bild 206. Jürgen Holl, ABB Roboter Labor, Graz 29. August 2014
 Bild 207. Jürgen Holl, Graz, RDL, Graz 31. August 2014
 Bild 208. Jürgen Holl, ABB Roboter Labor, Graz 29. August 2014
 Bild 209. Jürgen Holl, Graz, RDL, Graz 31. August 2014
 Bild 210-218. Jürgen Holl, 1. September 2014
 Bild 219. Jürgen Holl, Sika AG Schweiz, 25. Mai 2014
 Bild 220-221. Jürgen Holl, 15. September 2014
 Bild 222. Jürgen Holl, Sika AG Schweiz, 25. Mai 2014
 Bild 223-235. Jürgen Holl, ABB Roboter Labor, 2. September 2014
 Bild 236. Jürgen Holl, RDL, Graz 1. September 2014
 Bild 237. Jürgen Holl, ABB Roboter Labor, 2. September 2014
 Bild 238-239. Jürgen Holl, RDL Graz, 15. Juli 2014
 Bild 240-249. Jürgen Holl, ABB Roboter Labor, 2. September 2014
 Bild 249. Jürgen Holl, ABB Roboter Labor, 15. September 2014
 Bild 250, ITE, TU Graz
 Bild 251. Jürgen Holl, ABB Roboter Labor, 15. September 2014
 Bild 252-253, Jürgen Holl, RDL, Graz 4. Juli 2014
 Bild 254-255, Jürgen Holl, ABB Roboter Labor, 21. August 2014
 Bild 256-259, Jürgen Holl, RDL, Graz 4. Juli 2014
 Bild 260-264. Jürgen Holl, Sika AG Schweiz, 25. Mai 2014
 Bild 265-272. Jürgen Holl, RDL, Graz 4. Juli 2014
 Bild 274-279. Jürgen Holl, RDL, Graz 7. Juli 2014
 Bild 280-291. Jürgen Holl, RDL, Graz 8. Juli 2014
 Bild 292-300. Jürgen Holl, RDL, Graz . 10. Juli 2014
 Bild 301-302. Jürgen Holl, RDL, Graz . 11. Juli 2014
 Bild 303-304. Jürgen Holl, RDL, Graz . 2. September 2014
 Bild 305-324. Jürgen Holl, ABB ROBOTER LABOR, Graz . 21. August 2014
 Bild 325-329. Jürgen Holl, ABB ROBOTER LABOR, Graz . 22. August 2014
 Bild 330. Jürgen Holl, ABB ROBOTER LABOR, Graz . 23. August 2014
 Bild 331. Jürgen Holl, ABB ROBOTER LABOR, Graz . 22. August 2014
 Bild 332-340. Jürgen Holl, ABB ROBOTER LABOR, Graz . 25. August 2014
 Bild 341-345. Jürgen Holl, ABB ROBOTER LABOR, Graz . 26. August 2014
 Bild 346-353. Jürgen Holl, ABB ROBOTER LABOR, Graz . 27. August 2014
 Bild 354-357a. Jürgen Holl, ABB ROBOTER LABOR, Graz . 28. August 2014
 Bild 357b, links. Burry/Nonell/Bassegoda u.a.: Gaudi Unseen-Die Vollendung der Sagrada Familia, Frankfurt am Main, 2007
 Bild 357c u. e. Jürgen Holl, ABB ROBOTER LABOR, Graz, 15. September 2014
 Bild 357d. <http://momentum-magazin.de/files/2013/06/DSC08683.jpg>
 Bild 357f-g. Fotomontage Jürgen Holl, 05. Oktober 2014
 Bild 363-368. Jürgen Holl, ABB ROBOTER LABOR, Graz . 15. September 2014
 Bild 369-375. Jürgen Holl, ABB ROBOTER LABOR, Graz . 29. August 2014
 Bild 377-383. Jürgen Holl, ABB ROBOTER LABOR, Graz . 1. September 2014
 Bild 384-389. Jürgen Holl, ABB ROBOTER LABOR, Graz . 15. September 2014
 Bild 390-396. Jürgen Holl, 14. Oktober 2014
 Bild 397. Jürgen Holl, ABB ROBOTER LABOR, Graz . 15. September 2014
 Bild 398. <http://www.3ders.org/images/concrete-3d-printing2.jpg>
 Bild 399. http://www.electronicproducts.com/uploadedImages/Packaging_and_Hardware/Prototyping_Tools_Equipment_Services/fajb_3d_printed_castle_03_sep2014.jpg
 Bild 400. http://static.dezeen.com/uploads/2012/10/dezeen_Building-Bytes-by-Brian-Peters-4.jpg
 Bild 401. http://m.wsj.net/video/20110715/0715113dprinterconcrete1/0715113dprinterconcrete1_512x288.jpg
 Bild 402. Jürgen Holl, ABB Roboter Labor, Graz, 21. August 2014

Datenblatt: Masterarbeit-Beton 3D Druck

Institut für Tragwerksenturf



Masterarbeit: Jürgen Holl, BSc

Thema: Additive Beton-Bauteil-Herstellung mittels Robotik



Am Institut für Tragwerksentwurf der Technischen Universität Graz laufen verschiedenste Forschungsprojekte für die Herstellung von dünnwandigen Betonschalen, runden Betonwänden und Betonkuppeln. In Folge dessen entstand die Idee im Rahmen einer Diplomarbeit Betonteile nicht mit der altbewehrten Methode des Schalens herzustellen, sondern ein neues Verfahren "den Beton-3D Druck" zu erforschen. Im 3D Druck steckt großes wirtschaftliches Potential, welches einerseits den Architekten mehr Entwurfsspielraum bieten und andererseits auf der Baustelle das umständliche "Schalen" ersparen würde.

Dieses Verfahren ist nicht neu, es wurde bereits an der Universität von California getestet, jedoch ist es noch nicht vollständig ausgereift. (<https://www.youtube.com/watch?v=-yv-IWdSdns>)

Der Prozess:

Es soll versucht werden mit Industrierobotern der Firma ABB ein Verfahren zu entwickeln, welches uns ermöglicht, Betonscheiben auf schnellstmögliche Art herzustellen und in einem zweiten Schritt ein Dämmmaterial zu inkludieren. Die Betonwände sollten als Sandwichbauelement (Beton-Dämmung-Beton) ausgeführt werden.

Der Beton wird in Schichten aufgetragen (Layers). Das bedeutet, (Feinkorn-)Beton wird aus einer Düse mit entsprechendem Kopf ausgepresst und „in einer Wurst“ lagenweise übereinander geschichtet und damit werden z.B. gekrümmte Wandelemente geformt.

Somit müsste der Beton so fließfähig sein, dass er pumpbar bleibt, gleichzeitig sollte er eine hohe Grünstandsfestigkeit aufweisen und so gut verarbeitbar bleiben, sodass man ihn in Schichten auftragen kann.

Am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung (DI Joachim Juhart), wurde schon Rücksprache gehalten.

Arbeitsablauf:

1. Betonmischung

Muss anhand der im Prozess beschriebenen Eigenschaften entsprechen um ein lagenweises Auftragen zu ermöglichen.

2. Erstellung der Betonierdüse, Zuleitung

In Abhängigkeit der Betonmischung wird eine Betonierdüse entworfen und eine Zuleitung von der Mischeinrichtung gebaut. Die Betonzufuhr sollte mittels Extrusionsverfahren oder Spritzbetonverfahren geschehen.

3. Dämmstoff

Durch das Betonieren entstehen zwei verbundene Betonscheiben. Die Basis dieser Arbeit ist es nicht nur die Wände betonieren zu können, sondern auch einen ausreichenden U-Wert zu erzielen. Somit werden die Wände als Sandwichbauelement ausgeführt. Der richtige Dämmstoff wurde noch nicht gewählt.

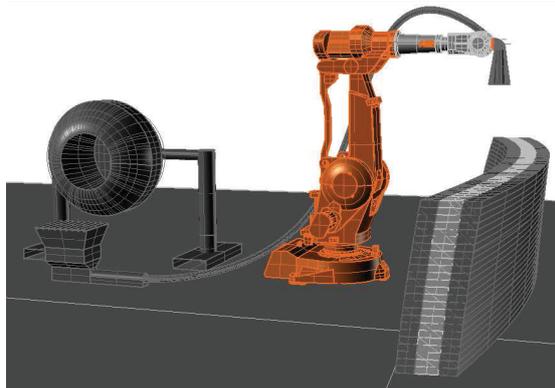
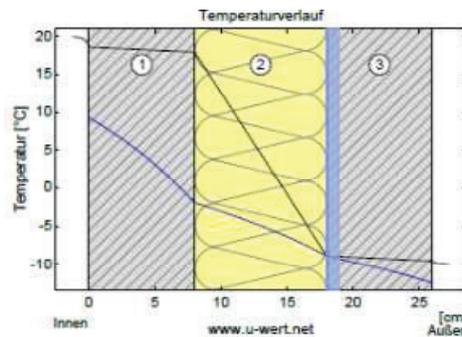
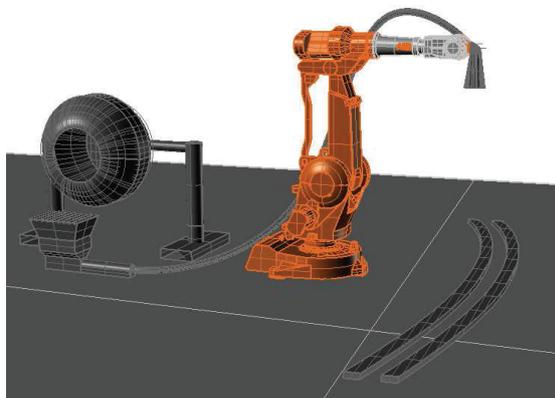
4. Erstellung der 3D Datei und Umwandlung

In Absprache mit dem Leiter des Institutes für Tragwerksenturf, sollte ein Entwurfspavillon hergestellt werden, um das Verfahren zu verdeutlichen.

Somit wurde im Modellierprogramm Rhinoceros die 3 D Datei erstellt und mittels den Plug-in Programmen Grasshopper und Hal, in einen Code für die Robotersteuerung umgewandelt.

Methode

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist experimentell auf ein Ergebnis zu kommen. Somit sind einige Betonierversuche erforderlich, um die Machbarkeit nachzuweisen und einen Prototypen zu entwickeln.



Theoretischer Betonierprozess