

1.1 Abstract

Iterative Prozesse zur Herstellung von wiederverwendbaren Schalungsformen für doppelt gekrümmte Betonbauteile.

Bei verschiedensten Projekten in der Architektur tritt der Fall auf, dass für komplexe Fassadenkonstruktionen oder tragende Schalenkonstruktionen als unverhältnismäßig angesehen hohe Kosten dadurch entstehen, dass die Schalungsteile nicht effizient genug hergestellt werden können und/oder dass die Konstruktion viele ungleiche Elemente enthält - speziell im Bereich des „Parametric Design“ - und somit für jedes Teil eine eigene Form hergestellt werden muss, die wiederum nur einmalig verwendbar ist.

Ziel der Diplomarbeit ist die prototypische Herstellung doppelt gekrümmter Schalungen, die durch die Entwicklung eines iterativen Prozesses gefertigt werden können. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf drei in Zusammenhang stehenden Punkten: Zum Ersten auf der sensorischen Ermittlung des Ist-Zustandes, und den daraus abgeleiteten und algorithmisch erstellten Arbeitsschritten. Zum Zweiten auf der reversiblen plastischen Verformbarkeit des Ausgangsmaterials, und der zum dritten daraus ermöglichten Einsparung des - verwendeten Materials, welches sich auch nach erfolgtem Verformungsprozess beliebig oft verwenden lässt und somit eine ressourcensparende Herstellung der Schalkörper ermöglicht.

2.1 Einleitung

Wie schon Konrad Wachsmann in seinem Anfang des Jhdts. Erschienenen Manifest „Wendepunkte im Bauen“ geschrieben hat und auch wie es in dem gleichnamigen Werk, 50 Jahre später im Vorwort erwähnt wird, so ist das Streben nach modularer Fertigung ein tragender Eckpfeiler um der Industrialisierung und somit einer Wende im Bauen nachzukommen.

Wachsmann schreibt hier »Das Prinzip der Industrialisierung erfordert die Verlegung der Produktionsstätte von der Baustelle oder dem Werkplatz in die Fabrik«¹

»Gebäude in der Fabrik wie eine Maschine zu produzieren haben schon viele Architekten und Ingenieure gefordert. 1921 schrieb beispielweise Le Corbusier in „Lésprit nouveaux“:»Häuser müssen aus einem Block entstehen, mit Werkzeugmaschinen aus der Fabrik, und so montiert wie Ford die Teile seiner Automobile auf Fließbändern zusammenfügt.« Und Jean Prouve, ein Autofan wie LE Corbousier, erläuterte 1946 in einem Vortrag, dass bei einem „fabrikgefertigtem“ Haus »alle Elemente zu Teilen einer Maschine werden, die komplett mechanisch zusammengebaut wird ohne dass irgendetwas auf der Baustelle hergestellt werden müsste«².

Im Zusammenhang mit dem Thema Rationalisierung nach dem 2ten Weltkrieg entbrannte unter Architekten ein heftiger, ideologisch und politisch bestimmter Streit über die Verdrängung handwerklicher „menschlicher“ Qualitäten durch das Eindringen der „seelenlosen“ Maschine in den Bereich der Architektur sowie über die Folgen von Typisierung und Massenproduktion.³

»Die Maschine näht, strickt, stickt, schnitzt, malt, greift tief ein in das Gebiet der menschlichen Kunst und beschämt jede menschliche Geschicklichkeit.«⁴

Die Angst war groß, dass durch den Eingriff der fabrikgesteuerten Produktion aus einem architektonisch gestalteten Haus ein monotones Ungetüm werden würde. Wachsmann zu dieser Diskussion: »Der Missverständene Begriff des Rationalisierens führt im Endergebnis zum hausgewordenen Stumpfsinn, der richtig verstandene dagegen wird den Hausbau erst lebendig machen.«⁵

»Jedoch ist die Industrialisierung am Bauwesen nicht spurlos vorübergegangen. Deren Ergebnisse finden sich nur eher in der in den benutzten Baustoffen als in den Methoden des Bauens. Stahl und Stahlbeton sind Materialien die vor der Industrialisierung teuer beziehungsweise unbekannt waren und die ohne industrielle Herstellungsprozesse in ihrer heutigen Verbreitung undenkbar wären.«⁶ Als Wendepunkt kann hier sozusagen eher der Wechsel von traditionellen zu industriellen Baustoffen als von handwerklichen zum Industriellen Bauen gesehen werden.

3.1 Parametrik

Als zweite Wendepunkt im Bauen kann nach der Industrialisierung die Digitalisierung gesehen werden. Dem rapiden Anstieg von maschineller Fertigung kann die globale Vernetzung durch den Baustoff Glas mittels Glasfaserkabeln, der konstante Anstieg von Übertragungsfrequenzen und der tägliche Gebrauch von Informations- und Kommunikationsgeräten gleichgesetzt werden.

Parametrische Architektur, obwohl an einem bestimmten Punkt vor einigen Jahren bereits ohne würdigen Nachfolger als überholt angesehen⁷, ermöglicht es dennoch schon seit vielen Jahren Einsparungen auf verschiedenen, in den Konstruktionsprozess eingebetteten, Ebenen vorzunehmen.

»Parametrische Software bringt Möglichkeiten mit sich, neue, zuvor unvorstellbare Formen und Körper zu finden und zu generieren. Dies zu erzielen erfordert jedoch ein Umdenken und die Anwendung neuer Entwurfsverfahren. Man entwickelt ein theoretisches Gebäudemodell und schafft Verbindungen (Beziehungen) zwischen einzelnen baulichen Komponenten. Es wird nicht mehr nur mit absoluten Zahlen gearbeitet, sondern mit relativen Beziehungen. Parametrische beziehungsweise generative Entwurfssoftware erfordert es, Prozesse und nicht fixe Geometrien zu erzeugen. Diese Vorgänge steuern anschließend die Ausbildung der Formen.«⁸

Durch die Möglichkeit der Bearbeitung freier Formen am Rechner hat sich auch ihre Komplexität stark gewandelt. Auf diese Weise generierte dynamische Systeme sind ohne den Einsatz von Computern nicht mehr erfassbar oder visualisierbar. Das altbekannte Raster wird nun durch neue assoziative Geometrien abgelöst, Form, Inhalt und Struktur können voneinander unabhängig behandelt werden.

Durch die daraus resultierende Unabhängigkeit des Rasters ist es möglich einzelne Systemelemente an die Fassade anzupassen und doch jederzeit die Kontrolle über ihre Dimensionen und Platzierung zu haben da sie in ständiger Kommunikation mit ihren Nachbarn stehen.⁹

»Statt auf der Grundlage vieler gleicher, additiv zu fügender Bauteile basieren heutige digitale Modelle auf der Basis eines Genotyps (ein genetischer Bauplan, der im Rahmen, jedoch nicht im Detail das Erscheinungsbild eines Lebewesens festlegt). Übertragen auf die Architektur bedeutet dies: Der Genotyp eines Gebäudes definiert zwar die grundlegenden Bauteile und deren Beziehungen zueinander in einem Modell, aber er stellt ohne absolute Werte wie Maße und Größen den Bauplan eines Gebäudes dar.

Erst durch die Eingabe bestimmter Parameter entsteht ein entsprechender Phänotyp (Definition aller Merkmale eines Individuums) – also ein konkretes geometrisches Modell. Je nachdem wie man die Parameter einstellt und variiert, ändert sich auch das Aussehen des Körpers auf der Basis des Genotyps. Es lassen sich unendlich viele verschiedene Varianten erzeugen, modifizieren und anpassen. Die Form wird nicht mehr gefunden, sondern generiert.«¹⁰

3.2 Gängige Programmiersprachen

Grundlegend differenziert man zwischen Scripting, der Erstellung kleinerer Programme mit vergleichsweise einfachen Programmiersprachen und der eigentlichen Programmierung mit komplexeren Programmiersprachen bei wesentlich höherer Leistungsfähigkeit, wie beispielweise die direkte Ansteuerung einer CNC Maschine.

Überblendet wird diese Unterscheidung durch das Konzept der visuellen Programmierung, wie sie z.B. die Grasshopper Entwicklungsumgebung für das CAD Programm Rhinoceros bietet. Anstatt einer Beschreibung werden hier grafisch vordefinierte Komponenten, die Bearbeitungsschritte repräsentieren, mit der Maus verknüpft, was eine logische Konstruktionsabfolge definiert. Änderungen an einem Punkt dieser Konstruktion übernehmen die parametrischen Verknüpfungen an allen relevanten Punkten des Gesamtmodells direkt.

4.1 Einführung

»The robot brings forth a comprehensive digital basis for construction that, since the beginning of building industrialisation, has been more dreamed of than realised. Beyond merely catching up on technology, the robot hereby provokes fundamental changes in the discipline: the reciprocal connection of the digital reality of the computer with the physical reality of architecture. As opposed to the exuberant experiments in the early days of digitalisation, the focus is no longer on form and virtuality. Rather it is on the physical enrichment of the discipline. Paradoxically, with pervasive digitalisation, the “materialisation of the digital” becomes the focal point.«¹¹

Dieser einleitende Satz aus dem Buch “The Robotic Touch”, herausgegeben von Gramazio Kohler, beschreibt gut den Diskurs, den der Einfluss von Robotern in den architektonischen Arbeitsablauf bietet. Der Roboter fungiert sozusagen als ein Bindeglied zwischen dem digitalen und der Realität.

Die Automatisierung des Konstruktionsprozesses, das Bauen mit Robotern ist nur ein weiterer Schritt auf dem Weg zu Präzision und Zeiteinsparung.

4.2 Robotik im architektonischen Produktionsprozess

Die Art und Weise der Integration von Robotern in den Sparten Architektur und Design erfolgt auf viele verschiedene Arten. Der Begriff der robotergesteuerten Fertigung ist weitreichend und umfasst von generativen Verfahren über subtraktive Verfahren, umformende Verfahren als auch den Einsatz von sensorischen Geräten ein breites Spektrum.

4.2.1 Additive/ Generative Verfahren

Auch als Urformen bezeichnet umfasst diese Sparte die Erstellung von Werkstücken aus Einzelpartikeln wie Flüssigkeiten, Pulvern, Gasen, Fasern und Spänen mit den jeweiligen Materialeigenschaften der Ausgangsstoffe. Beispiele dafür sind 3D-Drucken und das robotergestützte Schichten von Modulen.

Ebenfalls zu dieser Sparte gehörend, und für die Architektur am relevantesten sind das Rapid Prototyping für den Prototypenbau und Rapid Manufacturing für die direkte Endfertigung. Unter Rapid Verfahren versteht man einen Prozess, in dem aus CAD Daten schnelle und ohne Umwege physische Werkstücke hergestellt werden. Hierbei werden komplexe Geometrien zu einer Vielzahl von 2D Fertigungsschritten reduziert.

In der Architektur werden Rapid Verfahren primär zur schnellen und kostengünstigen Fertigung von hochkomplexen, individuellen und dauerhaften Modellen, Mustern, Prototypen und Bauelementen bis zu einer Größe von maximal 1x1x1 m eingesetzt. Sie eignen sich ideal für eine „mass customization“, also die kundenindividuelle Massenfertigung und eine Produktion nach Bedarf.¹²

4.2.2 Subtraktive Verfahren

»Materialtrennende oder subtraktive Verfahren dienen zur örtlichen Aufhebung eines Materialzusammenhalts. Dabei werden Partikel vom Werkstoff getrennt, sodass sich das Ausgangsvolumen des Bauteils verringert. Bei den wichtigsten Verfahren differenziert man zwischen der schneidenden und zerspanenden Bearbeitung. Besonderes Augenmerk liegt auf Verfahren, die sich über CNC-Daten ansteuern lassen und somit eine direkte Schnittstelle zwischen digitaler Planung und Ausführung ermöglichen.«¹³

Beispiele: Schneiden, Strahlschneiden, Plasma bzw. Autogenschneiden, Fräsen und Heißdrahtschneiden.

4.2.3 Materialneutrale Verfahren

Unter materialneutralen Verfahren versteht man Umformprozesse, welche durch mechanischen Druck oder Zug, der auf ein Werkstück ausgeübt wird entstehen. Unter den Oberbegriffen des Druck- und Zugumformens differenziert man

zwischen dem Walzen, Freiformen, Gesenkformen, bzw. Tiefziehen, Drücken, Innenhochdruck-Weitstauchen und werkzeuglosem Drahtziehen.

4.3 Industrieroboter in der Architektur

»Today we are witnessing a second digital age of architecture, which, through the introduction of the robot finds its contemporary expression and potential to thrive. It is now possible to regard computer programming and architectural construction as conditional upon each other, and to see their reciprocity as fundamental to architecture in the digital age. As a consequence the digital becomes concrete and tangible. Hereby the robot is both a symbol of, and a primary tool for, a profound reformation of the discipline. Through the robot architecture develops a form of materialization adequate for the information age.«¹⁴

Die Grundlage zur Konstruktion und Entwicklung von Industrierobotern ist die Herstellung einer multifunktionalen modularen Maschine, welche in der Lage ist ein breites Spektrum an repetitiven und präzisen Aufgaben zu erledigen, je nachdem welches Werkzeug als Endeffektor angebaut ist. Ganz ähnlich der Funktionsweise des menschlichen Arms, der in der Lage ist eine Mehrzahl von Werkzeugen zu bedienen. Diese Tatsache macht sich die Architektur zu nutzen.

Ein Roboterarm kann eine Vielzahl von Aufgaben erfüllen zu deren Erfüllung normalerweise mehrere Geräte zum Einsatz kommen würden. Das spart Geld und bietet ein, im Vergleich zu CNC Fräsen ähnlicher Größe, wenig eingeschränktes Arbeitsumfeld. Dazu ist er in der Lage sich seiner Arbeitsumgebung anzupassen.

Dies macht den Roboterarm zum idealen Werkzeug für prototypische Herstellung von 1:1 Objekten oder Prototypen im architektonischen Maßstab. Die am weitesten verbreiteten Projekte behandeln die beiden Punkte Maßstab und Vielseitigkeit.

Bereits Konrad Wachsmann erkannte das 1969, als er einen Industrieroboter an der USC (University of South California) konstruierte.

»Um dies zu erreichen wurde eine experimentelle Maschine mit der für die damalige Zeit hohen Anzahl von insgesamt sieben Freiheitsgraden entwickelt«¹⁵

4.4 Überblick der Entwicklung in der Robotik

Ausschlaggebend für die Integration der Industrieroboter in den architektonischen Kontext sind sind großteils Universitäten bzw. Architekturfakultäten mit einem starken Forschungsdrang. Sowohl die Tabelle, als auch die darauf folgende Weltkarte zeigt Informationen bezüglich der entstandenen Forschungseinrichtungen und der jeweiligen Ausstattung.¹⁶

4.4.1 Gantenbein Vineyard Facade

Gramazio Kohler Architects
Gantenbein Vineyard Facade, Fläsch, Switzerland, 2006

Ein Meilenstein im Prozess der robotergestützten Fertigung ist das von Gramazio u. Kohler in Wallis umgesetzte Projekt, der Umbau und die Fassadengestaltung eines Weinguts.

Ausschlaggebend für das Projekt ist die 400 m² umfassende Fassade, bestehend aus Betonrahmen welche digital, unter Einwirkung von Schwerkraft, mit übergroßen abstrakten Weintrauben gefüllt werden. Das Bild der dadurch entstehenden unterschiedlichen Kontraste wird in der Außen-Fassade mit Hilfe von 20,000 Ziegeln dargestellt. Der Abstand der Ziegel zueinander und die Rotation von 0-17 Grad bestimmt die Fassade. Die Herstellung der Außenwände

erfordert aufgrund der hohen Komplexität die der Logik des Algorithmus und der hohen Präzision der Positionierung der Ziegel zu Grunde legt einen einzigartigen Arbeitsprozess.¹⁷

Ein Industrieroboter, der die direkte Verbindung zwischen Daten und Herstellungsprozess darstellt, bildet den Übergang von einem Manuell repetitivem zu einem digital differenzierten Prozess und übernimmt im Werk die Roharbeit.

4.4.2 Forschungspavillon Uni Stuttgart

ITKE Universität Stuttgart, 2011

Die Idee eine „Urhütte der Moderne,, zu schaffen fußt auf dem Prinzip des Aufbaus von biologischen Strukturen. Das Plattenskelett eines Seeigels wird als Vorbild genommen um einen Forschungspavillon mit einer Grundfläche von 72 m² aus 6,5 mm dünnen Sperrholzplatten zu konstruieren.

Die Morphologie der Außenhülle eines Seeigels weist ideale Tragfähigkeit auf, trotz der Tatsache, dass an den Verbindungspunkten nur Normal- und Schubkräfte übertragen werden können, jedoch keine Biegemomente. Daher ist eine äusserst präzise Fertigung nötig die durch einen „mit einem Fräskopf ausgestatteten Industrieroboter übernommen wird.

Drei grundlegende Eigenschaften biologischer Strukturen werden auf die Holzkonstruktion übertragen: Heterogenität, Hierarchie und Anisotropie, d.h die Orientierung und Größe der Zellen passt sich den mechanischen Beanspruchungen und den Krümmungen der Schale an. Die räumlich komplexen Fräsungen erfordern jedoch eine siebte Achse die mittels der Kopplung des Roboters mit einer rotierenden Scheibe, auf der das Bauteil eingespannt ist, erreicht wird.¹⁸

4.5 Eigener Ansatz

Im Zuge meines Architekturstudiums begann ich schon sehr früh mich mit verschiedenen Arten und Weisen auseinanderzusetzen, die es mir ermöglichen Architektur in einer computergestützten Form zu generieren und zu manipulieren. Durch das umfassende Angebot an der TU Graz, und im speziellen durch die Lehrveranstaltung „Computed Serendipity“, welche das Institut für Architektur und Medien betreut hat, fand ich schnell zu der Schnittstelle, die Grasshopper in Zusammenarbeit mit dem Roboter bietet.

Während meines Masterstudiums konnte ich mich vertiefend durch verschiedene Institute immer mehr in den Kontext einarbeiten und wurde schließlich über die Lehrveranstaltung „Faksimile“, angeboten vom Institut für Tragwerksentwurf, und die dortige Förderung und Betreuung auf das Thema der Generierung von komplexen Schalungsformen auf der Basis von iterativen Prozessen aufmerksam.

Dieses Kapitel zeigt diverse Beispiele, die mich stark beeinflusst und inspiriert haben.

4.5.2 Robo Sculpt

Mathew Schwartz and Jason Prasad
University of Michigan College of Architecture, 2012

Im Zentrum dieser Versuchsarbeit steht die prototypische Fertigung eines mehrfach gekrümmten Fiberglasstuhls auf der Basis einer wiederverwendbaren Schalung aus einem wachsbasiertem Ton.

Die Herstellung der Schalung erfolgt durch sowohl manuelle als auch robotergesteuerte Prozesse und umfasst zunächst die generierung der Krümmung, das Aufschichten einer Blindschalung aus Styrodur um Material einzusparen und schließlich die robotergestützte Ausarbeitung.

Der Roboter fungiert als Künstler der mit repetitiven Bewegungen den Ton Streifen für Streifen abträgt. Dafür wurde eigens ein Endeffektor entwickelt der herkömmlichen Tonbearbeitungswerkzeugen sehr ähnelt, aber speziell für den Bearbeitungswinkel designt wurde.

Der Herstellungsprozess kann auf eine beliebige Krümmung der Fläche geändert werden und auch die Wahl des Materials kann von Fieberglas auf andere ausgeweitet werden.¹⁹

4.5.3 TailorCrete

Gramazio Kohler Research
ETH Zürich Schweiz, 2009-2013

Durch die Integration eines Industrieroboter mit einer, durch Pins verstellbaren Schalungsmembran, zeigt diese Research Arbeit eine alternative Herangehensweise an das Thema von wiederverwendbaren Schalungen.

Mit dem an der ETH unter Zusammenarbeit mit einigen namhaften Schweizer Firmen entwickelten Schaltschisch im Format 80x80cm werden Wachsformen hergestellt, die als Schalung für mehrfach gekrümmte Betonelemente fungieren.

Die Einzelformen werden auf die Baustelle transportiert und vor Ort zusammengesetzt. Nach dem Aushärten des Betons kann das Wachs wieder eingeschmolzen und erneut verwendet werden.

4.5.4 Faksimile

Die grundlegende Idee des Masterstudios „Faksimile“ war es, sich mit den Möglichkeiten der parametrisch generierten und digital gesteuerten Fabrikation von Bauteilen auseinanderzusetzen, und aus den gewonnenen Erkenntnissen ein Konzept für die die Entwicklung von elementierbaren und somit vofabrizierbaren, doppelt gekrümmten Betontragwerken zu entwickeln.

»In dem Projekt haben die Teilnehmer einen Pavillon für die Serpentine Gallery in London entwickelt, und sich ein spezielles Element der Fabrikation herausgesucht (z.B.: das Weben von Bewehrungslagen, das Einstellen adaptiver Schalungen, etc.) und dieses in Form eines parametrischen Arbeitsprozesses auf ABB IRB 140 Industrierobotern modellhaft verwirklicht. Dazu wurden die Werkzeuge für die auszuführende Tätigkeit selbst entwickelt.«²⁰

Basierend auf einem Script, welches eine raumüberspannende Voronoi-Zellstruktur mit einem materialsparenden, an eine florale Form erinnernden Kurvennetzwerk füllt, wurde ein Tragwerk entwickelt, welches aus Einzelsegmenten zusammengesetzt werden kann.

Der Arbeitsprozess zur Herstellung der im Maßstab 1:2 geplanten Einzelsegmente umfasst die schrittweise Verformung eines Tonblocks mittels eines, an den Endeffektor des Roboters montierten kugelförmigen Werkzeuges zur Generierung der Grundkrümmung des Bauteils, und der anschließenden Herausarbeitung der Negativform mittels eines für den Roboter modifizierten Schneideinstruments. In die Negativform wird Beton eingegossen um das fertige Bauteil zu erhalten.

5.1 Einführung

Wie Konrad Wachsmann 1959 über die Konsequenzen automatisierter Fertigung schreibt, ist die vollautomatisierte Fabrik erst durch die Produktion »einer großen Anzahl identischer Teile wirtschaftlich«.

Dieses Prinzip unterscheidet die Fabrik von der Werkstatt und verändert die Bedeutung des Begriffs Werkzeug, das nicht mehr allgemeines Hilfsmittel für eine Vielzahl von Aufgaben ist, sondern eine spezifische Form-, Stanz- oder Schneidevorrichtung in einer Maschine.

»Das formgebende Werkzeug ist somit das einzige Original im Herstellungsprozess und indirekt auch das fertige Produkt. Jede Instanz des Produktes ist nur noch eine Kopie. Das Massenprodukt der Serienfertigung muss stets einem Abstrakten modularen Koordinatensystem folgen und lässt sich dadurch unbegrenzt kombinieren«. ²¹

Das dazugehörige Ordnungsprinzip beschreibt Wachsmann als modulare Koordination, die sich auf Linien Flächen und Körper bezieht. Jedes Einzelteil ist in sich selbst und in einer Beziehung zu allen anderen Teilen Eindeutig bestimmt.

Die aktuelle Architektur strebt durch die Wende der computerbasierten Entwurfs- und Fertigungsmethoden auf Formen zu, deren Realisierung aufgrund ihrer hohen Komplexität ohne ein gewisses Maß an Fabrikdenken und Vorfertigung nicht möglich wäre.

Parametrisch generierte doppeltgekrümmte Gesamtstrukturen können zwar mittels Algorithmen in konstruktive Einzelsysteme zerlegt (Top-Down) und die Daten jedes einzelnen Elements exportiert und gedruckt werden, jedoch ist kein Handwerker in der Lage zweifach gekrümmte Formen nach 2D- Plänen exakt herzustellen. Die Daten müssen digital bleiben, der Computer muss die Fertigungsmaschinen direkt steuern.

Komplexe Formen in Beton zu realisieren bedeutet auch, individuelle, komplexe Schalungen zu fertigen. Beim Schalungsbau gab es bereits im letzten Jahrhundert einige interessante Ansätze zur Generierung von gekrümmten Flächen, unter anderem das Aufschütten von Erdhügeln oder die Verwendung pneumatischer Schalungen.

5.2 Feedback Prozesse

Die Herstellung simpler standardisierter Elemente erfolgt nach einem einfachen Prinzip. Die Geometrie wird innerhalb einer digitalen Umgebung vordefiniert. Das Design entspricht einer Form, die mit einer bereits vorentschiedenen Fertigungstechnik hergestellt werden kann. Aus dem Design werden CNC Pfade errechnet und das Schalteil ausgefräst.

Hierbei sind sowohl der Produktionsprozess als auch das Endresultat vordefiniert, weshalb es mit hohem Zeit- und damit Kostenaufwand verbunden ist innerhalb des Produktionszyklus auf die Kette und somit auf teils unvorhersehbare Probleme Einfluss zu nehmen.

Bei verschiedensten Projekten in der Architektur tritt der Fall auf, dass für komplexe Fassadenkonstruktionen oder tragende Schalenkonstruktionen unverhältnismäßig hohe Kosten dadurch entstehen, dass die Schalungsteile nicht effizient genug hergestellt werden können und/oder dass die Konstruktion viele ungleiche Elemente enthält - speziell im Bereich des ‚Parametric Design‘ - und somit für jedes Teil eine eigene Form hergestellt werden muss, die wiederum nur einmalig verwendbar ist.

Die Integration von Sensortechnologie und der Einsatz von Industrierobotern als Fertigungswerkzeug lockert den produktionsprozessabhängigen Ansatz und ändert die Art und Weise, in welcher Architekten und Designer arbeiten können.

Durch einen 3D Scanner indizierten Feedbackprozess werden Informationen relevant, die den Ist-Zustand eines Materials feststellen. Dies ermöglicht einen Design- bzw. Herstellungsprozess außerhalb der Grenzen von konformen Materialien.

5.3 Digital Material Feedback

Essentiell ist die Differenzierung der sensorischen Information bzw. der Zeitpunkt der Implementierung. Dies kann in drei verschiedenen Stadien erfolgen: Bevor ein Prozess gestartet wird um sich über den Ausgangszustand bewusst zu werden, zwischen 2 Prozesszyklen um sensorische Information über den Prozess in den nächsten Schritt einfließen zu

lassen, und schlussendlich die Implementierung der sensorischen Information während des Prozesses und die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Prozess selbst. Abbildung 5.3.0 bis 5.3.2 veranschaulichen dieses Konzept der Differenzierung.²²

5.3.1 Scan-Design-Production

Bevor ein Produktionsprozess initialisiert wird, wird der Grundzustand des Objekts erfasst. Diese Information liefert die Eckdaten für die Bearbeitung und wird in den initialen Werkzeugpfad implementiert.

5.3.2 Multiple cycle based Scan-Design-Production

Die sensorische Information trifft eine Aussage über den Werkstückzustand eines abgeschlossenen Zyklus. Dieser Zustand wird in den folgenden Ablauf implementiert bis der gewünschte Endzustand erreicht ist. Die Implementierung erfolgt über neuerliches Einspeisen der geänderten Arbeitspfade.

5.3.3 Real-time feedback based Scan-Design-Production

Die Implementierung und Erfassung der sensorischen Information erfolgt zeitgleich mit dem Produktionsprozess. Die gewonnenen Daten fließen in die Generierung der Arbeitspfade ein, welche direkt an den Roboter übertragen werden. Dies erfordert eine direkte Schnittstelle zwischen Roboter und PC über ein Programmierinterface.

6.1 Einführung

Die Kapitel Umsetzung und Experimente behandeln den Aufbau und die Interaktion der in der Grundinstallation enthaltenen Komponenten - einem ABB IRB140 Industrieroboter, einem Microsoft Kinect 3D Scanner und dem diese Komponenten verbindenden Computerscript. Weiters wird die daraus resultierende technische Umsetzung und Interaktion mittels Versuchsanordnungen demonstriert und schließlich eine finale Conclusio gezogen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die prototypische Herstellung doppelt gekrümmter Schalungen zur Herstellung von Betonfertigteilen, die mit Hilfe der Verwendung eines iterativen, repetitiven, robotergesteuerten und materialneutralen Prozesses gefertigt werden können. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf 3 Punkten: Zum Ersten auf der sensorischen Ermittlung des Ist-Zustandes und der daraus resultierenden Erstellung einer digitalen 3D Topologie. Zum Zweiten auf der reversiblen plastischen Verformbarkeit des Ausgangsmaterials und dem zum Dritten daraus resultierenden ressourcensparenden Umgang mit dem im Test verwendeten Herstellungsmaterial, welches sich nach dem Verformungsprozess beliebig oft verwenden lässt und somit eine effiziente Herstellung der Schalkörper ermöglicht.

Um nun sensorisch den realen Ist-Zustand eines nicht fix definierten Rohlings zu erhalten und diesen in ein digitales Modell zu übersetzen, wird auf die Verwendung eines 3D-Scanners (in diesem Fall eine Microsoft Kinect) zurückgegriffen. Dieser ist in der Lage ein digitales Abbild der Topographie des Rohlings zu erstellen.

Das solcherart erhaltene digitale Modell wird mit Hilfe eines eigens geschriebenen Scripts innerhalb der in das Programm Rhino eingebundenen Programmierumgebung Grasshopper mit der zu erzielenden Geometrie abgeglichen.

Aus diesem Abgleich wird zuerst die Differenz zwischen dem Rohling und der zu erreichenden Schalungsform errechnet und daraus folgend die Presspfade generiert.

Die Kommunikation zwischen einem, über der Schalform angebrachten 3D Scanner, einem Industrieroboter als Werkzeug und einem Computer als Schnittstelle wird sowohl anhand der Einzelkomponenten näher erklärt, als auch anhand der Experimente, welche die Zusammenarbeit dieser Komponenten veranschaulichen.

Um die plastische Verformung des Schalungsmaterials (im Test ein wachsbasiertes Plastilin) zu reduzieren, wird die Fläche abgestimmt zum gewählten Verformungswerkzeug gerastert. Die plastische Verformung durch Materialverdrängung in Form von Pressen oder Hämmern steht im Gegensatz zu einer subtraktiven Herstellung von

geringerer Präzision. Daher wird durch erneute Scans jeweils nach Beendigung eines Fertigungszyklus der veränderte Zustand des Schalungsmaterials ermittelt und die gewünschte Form iterativ erreicht.

6.2 Methode der Durchführung

Beschreibung der Interaktion zwischen den Komponenten und dem ihr zu Grunde liegenden System. Das Setup besteht aus einem 6-achsigen ABB Industrie-Roboter, einem Computer und einem 3D Scanner, einer Microsoft Kinect Kamera. Die Kommunikation zwischen den Komponenten funktioniert über einen Computer, der unter Verbindung des 3D Programmes Rhinoceros und der darin implementierten Programmierumgebung Grasshopper als Schnittstelle eingesetzt wird.

Er empfängt die von der Kinect übertragenen Tiefeninformation, wandelt sie in Punktwolken um, vergleicht sie mit der final zu erreichenden Geometrie und konvertiert die für die Produktion notwendigen Pfade in für den Roboter verständliche Targets. Diese werden mit Hilfe eines USB-Sticks an das Flex Panel des Roboters übertragen.

Als Werkzeug fungiert der Industrieroboter, der schließlich mit einer Pressbewegung aus dem Rohling die fertige Geometrie heraus arbeitet.

6.2 Methode der Durchführung

Beschreibung der Interaktion zwischen den Komponenten und dem ihr zu Grunde liegenden System. Das Setup besteht aus einem 6-achsigen ABB Industrie-Roboter, einem Computer und einem 3D Scanner, einer Microsoft Kinect Kamera. Die Kommunikation zwischen den Komponenten funktioniert über einen Computer, der unter Verbindung des 3D Programmes Rhinoceros und der darin implementierten Programmierumgebung Grasshopper als Schnittstelle eingesetzt wird.

Er empfängt die von der Kinect übertragenen Tiefeninformation, wandelt sie in Punktwolken um, vergleicht sie mit der final zu erreichenden Geometrie und konvertiert die für die Produktion notwendigen Pfade in für den Roboter verständliche Targets. Diese werden mit Hilfe eines USB-Sticks an das Flex Panel des Roboters übertragen.

Als Werkzeug fungiert der Industrieroboter, der schließlich mit einer Pressbewegung aus dem Rohling die fertige Geometrie heraus arbeitet.

6.3 3D Scanner

Essenziell für das Projekt ist eine digitale Erfassung der realen Welt, also die Generierung eines Abbilds bestehend aus Daten, die innerhalb der Programmierumgebung interpretiert und weiter verarbeitet werden. Als Medium hierfür wird eine Microsoft Kinect Kamera verwendet.

Hierbei handelt es sich um einen 3D Scanner, anfänglich von Microsoft als Spielecontroller entwickelt um sowohl Personen- als auch Gestenerkennung durchzuführen und die Bewegungen in digitale Skelettmodelle zu übertragen.

Durch die hohe Popularität und Anfrage hat Microsoft 2011 die erste offizielle Windows SDK veröffentlicht mit der es möglich ist die Technologie für andere Zwecke zu nutzen. SDK, kurz für „Software Development Kit“, bietet die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten der Kinect über verschiedene Programmiersprachen und somit die Entwicklung von eigenen Programmen, als auch die Nutzung der Kinect für den PC.

Hierfür wurde eigens eine leistungsfähigere Version des Scanners entwickelt und 2012 auf den Markt gebracht. 2014 wurde zusammen mit der XBOX One eine neue überarbeitete Version veröffentlicht.

Mehrere Sensoren erfassen gleichzeitig Daten, welche über einen Prozessor zusammen geführt werden. Dies umfasst: Ein Mikrofon, einen InfraRot Projektor, einen Tiefensensor, eine RGB Kamera und einen Neigungssensor mit

Beschleunigungsmesser. Im Folgenden wird auf die relevanten Hauptkomponenten und das Leistungsspektrum der verwendeten Kamera eingegangen.

6.3.2 RGB-Kamera

Die RGB Kamera basiert auf einem CMOS Bildsensor, welcher die Informationen in Bilddaten umwandelt, die für den Nutzer erkennbar sind. Die Auflösung entspricht 640x480 und erfasst die Grundfarben in einem 8-bit pro Pixel Bereich. Das Bildfeld der Kamera umfasst einen Winkel von 62,7 Grad, was ein wenig mehr ist als das Bildfeld des Tiefensensors.

Die RGB Kamera dient einzig zu Feedbackzwecken für den User und wird selten benutzt um in Anwendungen hilfreiche Daten zu generieren. Bei neueren Applikationen wird ein Abgleich zwischen RGB und Tiefensensor durchgeführt um Finger- und Gesichtserkennung besser möglich zu machen.

6.3.3 Tiefensensor

Der Tiefensensor dient zur Interaktion des Benutzers mit Anwendungen. Er besteht im Wesentlichen aus 2 Teilen:

Einem Infrarot Laser und einer auf CMOS basierenden Kamera um die Informationen des Lasers auszulesen. Die Auflösung beträgt 640x480 Pixel und kann bis maximal 2048x1536 erhöht werden, was für die Präzision und die Menge der Punkte innerhalb der ausgelesenen Punktwolke relevant ist.

6.3.4 Funktionsweise

Im Gegensatz zur Methode der Triangulation, wie gezeigt in Abbildung 6.3.6 verwendet die Kinect ein anderes System. Vor der Linse der IR (Infrarot) Kamera liegt ein Filter, durch welchen der Laser geleitet wird. Dies generiert einen Punkteraster, welcher anschließend von der CMOS Kamera erfasst wird, die diese Daten an den Prozessor weiterleitet. Die Position der Punkte wird mit einem Referenzbild abgeglichen und daraus die Position der Punkte im Raum errechnet. Dies geschieht in einem 9x9 Raster welcher ständig überlappt. Daraus kann sowohl Tiefe als auch Position ausgelesen werden wie in Abbildung 6.3.7 gezeigt wird.

Der Tiefensensor hat eine Auflösung von 1cm in Z-Achse und 1mm in der X-, als auch der Y- Achse. Der Sensor wurde entwickelt um bei Distanzen von 1,2 bis 3,5m optimal arbeiten zu können, wobei die Informationen auch bei Distanzen von 0,7 bis 6m noch gut verarbeitet werden können.

Die Kommunikation zwischen der Kinect und dem PC erfolgt über USB 2.0, erfordert jedoch eine externe Stromversorgung, da die Spannung von 2,5V, welche der USB Port liefert zu gering ist, und eine Spannung von 12V benötigt wird.

Um die Daten, die die Kinect liefert, innerhalb der Programmierumgebung Grasshopper anzeigen zu lassen und damit arbeiten zu können ist die Verwendung eines Plug-Ins nötig, dessen Funktion auf der Windows SDK basiert.

Firefly, ein von Andrew Payne entwickeltes Plug-In, ermöglicht unter anderem die Kommunikation mit Ardurino Komponenten, aber - weit wichtiger - die Interaktion mit der Kinect Kamera. Die DEPTH-Image Komponente liefert den Zugang zu den Daten, die sowohl die RGB Kamera aufzeichnet, als auch zur Information, die über den Tiefensensor empfangen wird.²³

6.6.1 Teil I: Import

Der erste Teil des Scripts behandelt den direkten Import der Punktwolke, welche von der Microsoft Kinect geliefert wird, über das Firefly-Plugin. Je nach Einstellung der Auflösung entsteht eine Wolke mit höherer oder geringerer Punktedichte. Bevor jedoch mit diesen Informationen gearbeitet werden kann ist es erforderlich die Punkte aus dem Koordinatensystem der Microsoft Kinect in das Koordinatensystem von Rhino zu überführen.

Dies geschieht mittels Skalieren und Drehen über ermittelte und fix definierte Werte. In diesem Teil wird ebenfalls die Abweichung der Kinect korrigiert, welche in Z Koordinate ca. 6mm beträgt. Der Output umfasst abschließend den gesamten Scan-Bereich, den die Kinect um den Arbeitstisch abdeckt.

Der Output muss schließlich begrenzt werden, da alles außerhalb des Bereiches des Arbeitstisches nicht relevant für die Produktion ist. Hierzu wird über ein Rechteck, welches den Abmessungen des Tisches entspricht, und einen Regler, der die Höhe beschränkt, ein selektierter Bereich von Punkten ausgewählt.

Im finalen Abschnitt von Teil I wird die Begrenzung der Punkte noch auf einen, durch die Abmessungen des Arbeitsbereichs und der Schalbox von 300x300x300mm definierten Bereich erweitert.

6.6.2 Teil II: Comparison

Aufgrund der Abmessungen der definierten Arbeitsfläche wird zunächst ein Raster generiert. Dieses Raster dient der Einteilung der Bearbeitungsfläche in Segmente mit einer Größe von jeweils 30 mal 30mm.

Anhand dieser Segmente überprüft der zweite Teil des Scripts zu Beginn, ob genug Rohmaterial für den Pressvorgang vorhanden ist und gibt ein visuelles Feedback, in welchen Bereichen noch Material aufgebracht werden muss. Grüne Segmente bedeuten OK, in den roten hingegen fehlt es an Material.

6.6.3 Teil III: Grid generation

Innerhalb jedes einzelnen der Segmente wird basierend auf der Sortierung ein Sub-Raster generiert, welches die Anzahl an Presspunkten und somit das Maß an Präzision bestimmt. Die Abstufung erfolgt in 3 Schritten mit jeweils 4, 5 oder 9 Punkten, welche pro Segment einzeln angesteuert werden.

6.6.4 Teil IV: Output

Anhand der auf die Scanfläche projizierten Punkte des Sub-Rasters werden Linien senkrecht, entlang der Z-Achse, auf die zu erreichende Zielfläche gezogen. Die Linien werden in gleich lange, für die Presskraft des Roboters abänderbare, zulängliche Segmente unterteilt.

Die Segmente werden nach z-Höhe in Gruppen zusammengefasst. Um die Materialverdrängung durch den Pressvorgang auszugleichen werden die Gruppen abwechselnd mit radialer Sortierung und gespiegelt radialer Sortierung verbunden.

Um die Punkte für den Pressvorgang optimal vorzubereiten wird in einer fix über dem Arbeitstisch definierten Höhe eine Ebene generiert. Von jedem zuvor projizierten Punkt wird eine Kopie auf diese Ebene projiziert und Duplikate anschließend gelöscht. Diese Projektionen bilden sowohl die Ausgangs-, als auch die Endpunkte.

Schließlich werden Anfangspunkt, Presspunkt und Endpunkt miteinander verbunden um eine kontinuierliche Pressbewegung zu generieren. Die Punkte werden anhand der maximalen Aufnahmekapazität des internen Speichers des ABB- Roboters in Gruppen von maximal 20.000 Punkte zusammengefasst und in *.mod Files konvertiert.

6.4 3D Scanner Halterung

Die Microsoft Kinect Kamera wird in einer optimalen Höhe von – Metern über dem Versuchstisch mit Hilfe einer eigenen Vorrichtung montiert, in welche eine Wasserwaage integriert ist um zu gewährleisten, dass der Sensor normal auf die Fläche steht.

Die somit erhaltenen Daten werden in Form einer Punktwolke innerhalb der Komponente dargestellt, wobei die Auflösung der Punkte in einem Rahmen von- bis – verändert werden und somit die Anzahl der Informationspunkte

drastisch erhöht bzw. verringert werden kann. Des Weiteren kann auch die Bildwiederholungsrate verändert werden, was aber für die Versuchsanordnungen nicht relevant ist.

6.5 Industrieroboter

Der für die Experimente verwendete Roboter ist ein IRB-140 der Firma ABB. Seine Abmessungen betragen 500x500x570mm. Er ist mit 6 Rotationsachsen und 6 rotationsfähigen Gelenken ausgestattet. Mit einem maximalen Traggewicht von 6kg verfügt er über eine maximale Bearbeitungsreichweite von 810mm.²⁴

Durch die Kooperation der TU Graz mit der Firma ABB wurde 2012 ein Forschungslabor in Leben gerufen, zu deren Ausstattung 3 ABB IRB 140 Roboter gehören. Ziel ist die Erforschung von Industrierobotern im architektonischen Kontext als auch der Unterricht, daher die Näherbringung dieser Technologie an Studierende.

6.6 Script

Grundlegender Aufbau des in Grasshopper generierten Skripts und eine Erklärung der Zusammenarbeit der einzelnen Komponenten miteinander.

6.2 Methode der Durchführung

Beschreibung der Interaktion zwischen den Komponenten und dem ihr zu Grunde liegenden System. Das Setup besteht aus einem 6-achsigen ABB Industrie-Roboter, einem Computer und einem 3D Scanner, einer Microsoft Kinect Kamera. Die Kommunikation zwischen den Komponenten funktioniert über einen Computer, der unter Verbindung des 3D Programmes Rhinoceros und der darin implementierten Programmierumgebung Grasshopper als Schnittstelle eingesetzt wird.

Er empfängt die von der Kinect übertragenen Tiefeninformation, wandelt sie in Punktwolken um, vergleicht sie mit der final zu erreichenden Geometrie und konvertiert die für die Produktion notwendigen Pfade in für den Roboter verständliche Targets. Diese werden mit Hilfe eines USB-Sticks an das Flex Panel des Roboters übertragen.

Als Werkzeug fungiert der Industrieroboter, der schließlich mit einer Pressbewegung aus dem Rohling die fertige Geometrie heraus arbeitet.

6.3 3D Scanner

Essenziell für das Projekt ist eine digitale Erfassung der realen Welt, also die Generierung eines Abbilds bestehend aus Daten, die innerhalb der Programmierumgebung interpretiert und weiter verarbeitet werden. Als Medium hierfür wird eine Microsoft Kinect Kamera verwendet.

Hierbei handelt es sich um einen 3D Scanner, anfänglich von Microsoft als Spielecontroller entwickelt um sowohl Personen- als auch Gestenerkennung durchzuführen und die Bewegungen in digitale Skelettmodelle zu übertragen.

Durch die hohe Popularität und Anfrage hat Microsoft 2011 die erste offizielle Windows SDK veröffentlicht mit der es möglich ist die Technologie für andere Zwecke zu nutzen. SDK, kurz für „Software Development Kit“, bietet die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten der Kinect über verschiedene Programmiersprachen und somit die Entwicklung von eigenen Programmen, als auch die Nutzung der Kinect für den PC.

Hierfür wurde eigens eine leistungsfähigere Version des Scanners entwickelt und 2012 auf den Markt gebracht. 2014 wurde zusammen mit der XBOX One eine neue überarbeitete Version veröffentlicht.

Mehrere Sensoren erfassen gleichzeitig Daten, welche über einen Prozessor zusammen geführt werden. Dies umfasst: Ein Mikrofon, einen InfraRot Projektor, einen Tiefensensor, eine RGB Kamera und einen Neigungssensor mit Beschleunigungsmesser. Im Folgenden wird auf die relevanten Hauptkomponenten und das Leistungsspektrum der verwendeten Kamera eingegangen.

6.3.2 RGB-Kamera

Die RGB Kamera basiert auf einem CMOS Bildsensor, welcher die Informationen in Bilddaten umwandelt, die für den Nutzer erkennbar sind. Die Auflösung entspricht 640x480 und erfasst die Grundfarben in einem 8-bit pro Pixel Bereich. Das Bildfeld der Kamera umfasst einen Winkel von 62,7 Grad, was ein wenig mehr ist als das Bildfeld des Tiefensensors.

Die RGB Kamera dient einzig zu Feedbackzwecken für den User und wird selten benutzt um in Anwendungen hilfreiche Daten zu generieren. Bei neueren Applikationen wird ein Abgleich zwischen RGB und Tiefensensor durchgeführt um Finger- und Gesichtserkennung besser möglich zu machen.

6.3.3 Tiefensensor

Der Tiefensensor dient zur Interaktion des Benutzers mit Anwendungen. Er besteht im Wesentlichen aus 2 Teilen:

Einem Infrarot Laser und einer auf CMOS basierenden Kamera um die Informationen des Lasers auszulesen. Die Auflösung beträgt 640x480 Pixel und kann bis maximal 2048x1536 erhöht werden, was für die Präzision und die Menge der Punkte innerhalb der ausgelesenen Punktwolke relevant ist.

6.3.4 Funktionsweise

Im Gegensatz zur Methode der Triangulation, wie gezeigt in Abbildung 6.3.6 verwendet die Kinect ein anderes System. Vor der Linse der IR (Infrarot) Kamera liegt ein Filter, durch welchen der Laser geleitet wird. Dies generiert einen Punkteraster, welcher anschließend von der CMOS Kamera erfasst wird, die diese Daten an den Prozessor weiterleitet. Die Position der Punkte wird mit einem Referenzbild abgeglichen und daraus die Position der Punkte im Raum errechnet. Dies geschieht in einem 9x9 Raster welcher ständig überlappt. Daraus kann sowohl Tiefe als auch Position ausgelesen werden wie in Abbildung 6.3.7 gezeigt wird.

Der Tiefensensor hat eine Auflösung von 1cm in Z-Achse und 1mm in der X-, als auch der Y- Achse. Der Sensor wurde entwickelt um bei Distanzen von 1,2 bis 3,5m optimal arbeiten zu können, wobei die Informationen auch bei Distanzen von 0,7 bis 6m noch gut verarbeitet werden können.

Die Kommunikation zwischen der Kinect und dem PC erfolgt über USB 2.0, erfordert jedoch eine externe Stromversorgung, da die Spannung von 2,5V, welche der USB Port liefert zu gering ist, und eine Spannung von 12V benötigt wird.

Um die Daten, die die Kinect liefert, innerhalb der Programmierumgebung Grasshopper anzeigen zu lassen und damit arbeiten zu können ist die Verwendung eines Plug-Ins nötig, dessen Funktion auf der Windows SDK basiert.

Firefly, ein von Andrew Payne entwickeltes Plug-In, ermöglicht unter anderem die Kommunikation mit Ardurino Komponenten, aber - weit wichtiger - die Interaktion mit der Kinect Kamera. Die DEPTH-Image Komponente liefert den Zugang zu den Daten, die sowohl die RGB Kamera aufzeichnet, als auch zur Information, die über den Tiefensensor empfangen wird.²³

6.6.1 Teil I: Import

Der erste Teil des Scripts behandelt den direkten Import der Punktwolke, welche von der Microsoft Kinect geliefert wird, über das Firefly-Plugin. Je nach Einstellung der Auflösung entsteht eine Wolke mit höherer oder geringerer

Punktedichte. Bevor jedoch mit diesen Informationen gearbeitet werden kann ist es erforderlich die Punkte aus dem Koordinatensystem der Microsoft Kinect in das Koordinatensystem von Rhino zu überführen.

Dies geschieht mittels Skalieren und Drehen über ermittelte und fix definierte Werte. In diesem Teil wird ebenfalls die Abweichung der Kinect korrigiert, welche in Z Koordinate ca. 6mm beträgt. Der Output umfasst abschließend den gesamten Scan-Bereich, den die Kinect um den Arbeitstisch abdeckt.

Der Output muss schließlich begrenzt werden, da alles außerhalb des Bereiches des Arbeitstisches nicht relevant für die Produktion ist. Hierzu wird über ein Rechteck, welches den Abmessungen des Tisches entspricht, und einen Regler, der die Höhe beschränkt, ein selektierter Bereich von Punkten ausgewählt.

Im finalen Abschnitt von Teil I wird die Begrenzung der Punkte noch auf einen, durch die Abmessungen des Arbeitsbereichs und der Schalbox von 300x300x300mm definierten Bereich erweitert.

6.6.2 Teil II: Comparison

Aufgrund der Abmessungen der definierten Arbeitsfläche wird zunächst ein Raster generiert. Dieses Raster dient der Einteilung der Bearbeitungsfläche in Segmente mit einer Größe von jeweils 30 mal 30mm.

Anhand dieser Segmente überprüft der zweite Teil des Scripts zu Beginn, ob genug Rohmaterial für den Pressvorgang vorhanden ist und gibt ein visuelles Feedback, in welchen Bereichen noch Material aufgebracht werden muss. Grüne Segmente bedeuten OK, in den roten hingegen fehlt es an Material.

6.6.3 Teil III: Grid generation

Innerhalb jedes einzelnen der Segmente wird basierend auf der Sortierung ein Sub-Raster generiert, welches die Anzahl an Presspunkten und somit das Maß an Präzision bestimmt. Die Abstufung erfolgt in 3 Schritten mit jeweils 4, 5 oder 9 Punkten, welche pro Segment einzeln angesteuert werden.

6.6.4 Teil IV: Output

Anhand der auf die Scanfläche projizierten Punkte des Sub-Rasters werden Linien senkrecht, entlang der Z-Achse, auf die zu erreichende Zielfläche gezogen. Die Linien werden in gleich lange, für die Presskraft des Roboters abänderbare, zulängliche Segmente unterteilt.

Die Segmente werden nach z-Höhe in Gruppen zusammengefasst. Um die Materialverdrängung durch den Pressvorgang auszugleichen werden die Gruppen abwechselnd mit radialer Sortierung und gespiegelt radialer Sortierung verbunden.

Um die Punkte für den Pressvorgang optimal vorzubereiten wird in einer fix über dem Arbeitstisch definierten Höhe eine Ebene generiert. Von jedem zuvor projizierten Punkt wird eine Kopie auf diese Ebene projiziert und Duplikate anschließend gelöscht. Diese Projektionen bilden sowohl die Ausgangs-, als auch die Endpunkte.

Schließlich werden Anfangspunkt, Presspunkt und Endpunkt miteinander verbunden um eine kontinuierliche Pressbewegung zu generieren. Die Punkte werden anhand der maximalen Aufnahmekapazität des internen Speichers des ABB- Roboters in Gruppen von maximal 20.000 Punkte zusammengefasst und in *.mod Files konvertiert.

Basierend auf den zuvor generierten Segmente wird mittels eines C# Scripts eine Sortierung vorgenommen. Die Bereiche werden, ausgehend vom Zentrum des Tisches radial nach außen hin sortiert und durchnummeriert, sodass eine gezielte und kontrollierte Ansteuerung ermöglicht wird.

6.2 Methode der Durchführung

Beschreibung der Interaktion zwischen den Komponenten und dem ihr zu Grunde liegenden System. Das Setup besteht aus einem 6-achsigen ABB Industrie-Roboter, einem Computer und einem 3D Scanner, einer Microsoft Kinect Kamera. Die Kommunikation zwischen den Komponenten funktioniert über einen Computer, der unter Verbindung des 3D Programmes Rhinoceros und der darin implementierten Programmierumgebung Grasshopper als Schnittstelle eingesetzt wird.

Er empfängt die von der Kinect übertragene Tiefeninformation, wandelt sie in Punktwolken um, vergleicht sie mit der final zu erreichenden Geometrie und konvertiert die für die Produktion notwendigen Pfade in für den Roboter verständliche Targets. Diese werden mit Hilfe eines USB-Sticks an das Flex Panel des Roboters übertragen.

Als Werkzeug fungiert der Industrieroboter, der schließlich mit einer Pressbewegung aus dem Rohling die fertige Geometrie heraus arbeitet.

6.3 3D Scanner

Essenziell für das Projekt ist eine digitale Erfassung der realen Welt, also die Generierung eines Abbilds bestehend aus Daten, die innerhalb der Programmierumgebung interpretiert und weiter verarbeitet werden. Als Medium hierfür wird eine Microsoft Kinect Kamera verwendet.

Hierbei handelt es sich um einen 3D Scanner, anfänglich von Microsoft als Spielecontroller entwickelt um sowohl Personen- als auch Gestenerkennung durchzuführen und die Bewegungen in digitale Skelettmodelle zu übertragen.

Durch die hohe Popularität und Anfrage hat Microsoft 2011 die erste offizielle Windows SDK veröffentlicht mit der es möglich ist die Technologie für andere Zwecke zu nutzen. SDK, kurz für „Software Development Kit“, bietet die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten der Kinect über verschiedene Programmiersprachen und somit die Entwicklung von eigenen Programmen, als auch die Nutzung der Kinect für den PC.

Hierfür wurde eigens eine leistungsfähigere Version des Scanners entwickelt und 2012 auf den Markt gebracht. 2014 wurde zusammen mit der XBOX One eine neue überarbeitete Version veröffentlicht.

Mehrere Sensoren erfassen gleichzeitig Daten, welche über einen Prozessor zusammen geführt werden. Dies umfasst: Ein Mikrofon, einen InfraRot Projektor, einen Tiefensensor, eine RGB Kamera und einen Neigungssensor mit Beschleunigungsmesser. Im Folgenden wird auf die relevanten Hauptkomponenten und das Leistungsspektrum der verwendeten Kamera eingegangen.

6.3.2 RGB-Kamera

Die RGB Kamera basiert auf einem CMOS Bildsensor, welcher die Informationen in Bilddaten umwandelt, die für den Nutzer erkennbar sind. Die Auflösung entspricht 640x480 und erfasst die Grundfarben in einem 8-bit pro Pixel Bereich. Das Bildfeld der Kamera umfasst einen Winkel von 62,7 Grad, was ein wenig mehr ist als das Bildfeld des Tiefensensors.

Die RGB Kamera dient einzig zu Feedbackzwecken für den User und wird selten benutzt um in Anwendungen hilfreiche Daten zu generieren. Bei neueren Applikationen wird ein Abgleich zwischen RGB und Tiefensensor durchgeführt um Finger- und Gesichtserkennung besser möglich zu machen.

6.3.3 Tiefensensor

Der Tiefensensor dient zur Interaktion des Benutzers mit Anwendungen. Er besteht im Wesentlichen aus 2 Teilen:

Einem Infrarot Laser und einer auf CMOS basierenden Kamera um die Informationen des Lasers auszulesen. Die Auflösung beträgt 640x480 Pixel und kann bis maximal 2048x1536 erhöht werden, was für die Präzision und die Menge der Punkte innerhalb der ausgelesenen Punktwolke relevant ist.

6.3.4 Funktionsweise

Im Gegensatz zur Methode der Triangulation, wie gezeigt in Abbildung 6.3.6 verwendet die Kinect ein anderes System. Vor der Linse der IR (Infrarot) Kamera liegt ein Filter, durch welchen der Laser geleitet wird. Dies generiert einen Punkteraster, welcher anschließend von der CMOS Kamera erfasst wird, die diese Daten an den Prozessor weiterleitet. Die Position der Punkte wird mit einem Referenzbild abgeglichen und daraus die Position der Punkte im Raum errechnet. Dies geschieht in einem 9x9 Raster welcher ständig überlappt. Daraus kann sowohl Tiefe als auch Position ausgelesen werden wie in Abbildung 6.3.7 gezeigt wird.

Der Tiefensensor hat eine Auflösung von 1cm in Z-Achse und 1mm in der X-, als auch der Y- Achse. Der Sensor wurde entwickelt um bei Distanzen von 1,2 bis 3,5m optimal arbeiten zu können, wobei die Informationen auch bei Distanzen von 0,7 bis 6m noch gut verarbeitet werden können.

Die Kommunikation zwischen der Kinect und dem PC erfolgt über USB 2.0, erfordert jedoch eine externe Stromversorgung, da die Spannung von 2,5V, welche der USB Port liefert zu gering ist, und eine Spannung von 12V benötigt wird.

Um die Daten, die die Kinect liefert, innerhalb der Programmierumgebung Grasshopper anzeigen zu lassen und damit arbeiten zu können ist die Verwendung eines Plug-Ins nötig, dessen Funktion auf der Windows SDK basiert.

Firefly, ein von Andrew Payne entwickeltes Plug-In, ermöglicht unter anderem die Kommunikation mit Ardurino Komponenten, aber - weit wichtiger - die Interaktion mit der Kinect Kamera. Die DEPTH-Image Komponente liefert den Zugang zu den Daten, die sowohl die RGB Kamera aufzeichnet, als auch zur Information, die über den Tiefensensor empfangen wird.²³

6.6.1 Teil I: Import

Der erste Teil des Scripts behandelt den direkten Import der Punktwolke, welche von der Microsoft Kinect geliefert wird, über das Firefly-Plugin. Je nach Einstellung der Auflösung entsteht eine Wolke mit höherer oder geringerer Punktedichte. Bevor jedoch mit diesen Informationen gearbeitet werden kann ist es erforderlich die Punkte aus dem Koordinatensystem der Microsoft Kinect in das Koordinatensystem von Rhino zu überführen.

Dies geschieht mittels Skalieren und Drehen über ermittelte und fix definierte Werte. In diesem Teil wird ebenfalls die Abweichung der Kinect korrigiert, welche in Z Koordinate ca. 6mm beträgt. Der Output umfasst abschließend den gesamten Scan-Bereich, den die Kinect um den Arbeitstisch abdeckt.

Der Output muss schließlich begrenzt werden, da alles außerhalb des Bereiches des Arbeitstisches nicht relevant für die Produktion ist. Hierzu wird über ein Rechteck, welches den Abmessungen des Tisches entspricht, und einen Regler, der die Höhe beschränkt, ein selektierter Bereich von Punkten ausgewählt.

Im finalen Abschnitt von Teil I wird die Begrenzung der Punkte noch auf einen, durch die Abmessungen des Arbeitsbereichs und der Schalbox von 300x300x300mm definierten Bereich erweitert.

6.6.2 Teil II: Comparison

Aufgrund der Abmessungen der definierten Arbeitsfläche wird zunächst ein Raster generiert. Dieses Raster dient der Einteilung der Bearbeitungsfläche in Segmente mit einer Größe von jeweils 30 mal 30mm.

Anhand dieser Segmente überprüft der zweite Teil des Scripts zu Beginn, ob genug Rohmaterial für den Pressvorgang vorhanden ist und gibt ein visuelles Feedback, in welchen Bereichen noch Material aufgebracht werden muss. Grüne Segmente bedeuten OK, in den roten hingegen fehlt es an Material.

6.6.3 Teil III: Grid generation

Innerhalb jedes einzelnen der Segmente wird basierend auf der Sortierung ein Sub-Raster generiert, welches die Anzahl an Presspunkten und somit das Maß an Präzision bestimmt. Die Abstufung erfolgt in 3 Schritten mit jeweils 4, 5 oder 9 Punkten, welche pro Segment einzeln angesteuert werden.

6.6.4 Teil IV: Output

Anhand der auf die Scanfläche projizierten Punkte des Sub-Rasters werden Linien senkrecht, entlang der Z-Achse, auf die zu erreichende Zielfläche gezogen. Die Linien werden in gleich lange, für die Presskraft des Roboters abänderbare, zulängliche Segmente unterteilt.

Die Segmente werden nach z-Höhe in Gruppen zusammengefasst. Um die Materialverdrängung durch den Pressvorgang auszugleichen werden die Gruppen abwechselnd mit radialer Sortierung und gespiegelt radialer Sortierung verbunden.

Um die Punkte für den Pressvorgang optimal vorzubereiten wird in einer fix über dem Arbeitstisch definierten Höhe eine Ebene generiert. Von jedem zuvor projizierten Punkt wird eine Kopie auf diese Ebene projiziert und Duplikate anschließend gelöscht. Diese Projektionen bilden sowohl die Ausgangs-, als auch die Endpunkte.

Schließlich werden Anfangspunkt, Presspunkt und Endpunkt miteinander verbunden um eine kontinuierliche Pressbewegung zu generieren. Die Punkte werden anhand der maximalen Aufnahmekapazität des internen Speichers des ABB-Roboters in Gruppen von maximal 20.000 Punkte zusammengefasst und in *.mod Files konvertiert.

7 Fallstudien

7.1 Abgleich

Um die Position der Punktwolke zu kalibrieren wird ein Abgleich mit einem Hochleistungsscanner durchgeführt.

Ablauf:

Auf dem Arbeitstisch wird an einem, sowohl real als auch digital definiertem Punkt ein Styroporblock positioniert, dessen Abmessungen bekannt sind. Dieser wird sowohl mit der Microsoft Kinect Scanvorrichtung als auch mit einem Romer Hochleistungsmessarm erfasst. Die an den Roboter angebrachte Messspitze fährt schließlich anhand beider Messungen den selben Eckpunkt an um die Abweichung darzustellen.

Script:

Im digitalen Raum wird ein Quader erstellt, dessen Abmessungen und Position dem auf dem Arbeitstisch positionierten gleichen.

Anschließend wird der reale Quader und der Arbeitstisch sowohl mit der Microsoft Kinect als auch mit dem Romer Messarm erfasst, und basierend auf der Punktedaten jeweils ein digitales Abbild erstellt.

Innerhalb dieser Abbilder werden die Koordinaten des selben Eckpunkts des Quaders relativ zum Nullpunkt des Roboterkoordinatensystems ausgelesen und in Targets für die Pfadgenerierung umgewandelt. Die an den Endeffektor des Roboters angebrachte Messspitze steuert diese Targets an, um Abweichungen erkennen und ausgleichen zu können. Die Positionierung der Punktwolke wird anschließend Anhand dessen kalibriert.

Schlussfolgerung:

Die Kalibrierung und der Offset der Punktwolke gewährleistet bei gleichbleibender Position der Microsoft Kinect eine gleichbleibende bekannte Distanz zur Arbeitsfläche.

7.2 Slalom

Ziel des Experiments ist es eine erste Zusammenarbeit zwischen Microsoft Kinect und dem Industrieroboter zu entwickeln und zu testen.

Ablauf:

Auf dem Arbeitstisch werden in zufälliger Anordnung Hindernisse platziert, in diesem Fall Styroporwürfel verschiedener Größe. Anschließend wird mit Hilfe des über dem Tisch montierten 3D-Scanners (Microsoft Kinect) ein Abtastvorgang gestartet und die Objekte auf dem Tisch in digitale Punktwolken gerastert und daraus die Position im digitalen Raum ermittelt. Aus dieser Information wird ein Arbeitspfad generiert, mit welchem der Roboter die Hindernisse umfährt.

Script:

Die aus dem Abtastvorgang resultierenden Punkte werden an den Computer übermittelt und per Script in Objekte übersetzt, welche in Form, Höhe und Anordnung differenziert und der Reihe nach sortiert werden.

Im nächsten Schritt wird innerhalb von Grasshopper sowohl ein Start-, als auch ein Endpunkt gesetzt und durch die Implementierung von Galapagos ein genetischer Algorithmus gestartet. Durch diesen wird anhand der Position der Styroporwürfel eine mögliche Pfadkurve berechnet um die Hindernisse ohne Kollision slalomartig zu umfahren.

Diese Pfadkurve wird in, für den Roboter verständliche Targets mit XYZ-Ausrichtung umgewandelt, auf Fehler hin überprüft und schließlich an den Roboter übermittelt. Dieser nutzt die an ihn übertragene Information um mit einer, an der untersten Achse montierten Messspitze die einzelnen Blöcke ohne Berührung zu umfahren.

Versuchsordnung Nr 1:

Objekte: 4

Versuchsordnung Nr 2:

Objekte: 5

Schlussfolgerung:

Die in diesem Experiment beschriebenen Schritte sind beliebig oft mit beliebiger Position der Hindernisse wiederholbar. Es zeigt eine Genauigkeit, die mit Hilfe des Kinect-Scanners erreicht werden kann. Durch die Verwendung von sensorischer Information besteht die Möglichkeit der Differenzierung von Objekten anhand ihrer Größe wie auch der Bestimmung ihrer Position in einem fixierten Koordinatensystem und somit sowohl die bewusste Vermeidung von Kollision als auch das Ansteuern der Objekte mit einem Werkzeug.

7.3 Ermittlung der Werkzeugperformance

Da der verwendete Roboter eine Presswirkung von maximal 6 kg erzeugen kann, und sich bei Überschreitung die Motoren abschalten muss eine fixierte Presstiefe pro Presspunkt festgelegt werden und andere Randbedingungen abgesteckt werden.

Ablauf:

Auf dem Arbeitstisch wird im Zentrum ein Block Plastilin positioniert. Die Abmessungen und Form werden mittels eines Scans in die Digitale Umgebung übertragen. Die festgelegte Form einer Kugelkalotte wird auf den Block projiziert und daraus Presspunkte errechnet. Die Presstiefe wird variiert um eine Relation zwischen Presstiefe und Pressgeschwindigkeit ablesen zu können. Ziel ist es eine allgemeine Abschätzung der Festigkeit des Materials und der resultierenden Presstiefe zu bekommen. Ausgehend davon werden verschiedene Pressvorgänge mit verschiedenen Rahmenbedingungen durchgeführt.

Script:

Auf den Scan-basierenden, im digitalen Umfeld generierten Block wird eine Fläche projiziert und stufenweise Pressvorgänge bei gleichbleibendem Raster berechnet. Der Höhenunterschied zwischen Stufen kann im Bereich von bis zu 0,1mm mit Hilfe eines Schiebereglers korrigiert werden.

Test I:

Allgemeine Überprüfung der Projektion einer Fläche auf einen Block und der Herstellung.

Test II:

Eingrenzung der Arbeitsfläche auf 300x300mm in Anbetracht der maximalen Reichweite des Roboters durch einen Holzrahmen und Fertigung einer Fläche.

Test III:

Überprüfung der Überarbeitung einer bereits finalisierten Fläche mittels hinzufügen von Plastelinklumpen.

Test IV:

Aufgrund der Geometrie des Werkzeugkopfes kann das Material an den Seiten nur begrenzt erreicht werden. Der Rahmen wird entfernt und das Material auf eine Holzplatte von 300x300mm aufgestapelt.

Test V:

Da das Material sich durch den Pressvorgang anhebt, wird die Holzplatte mit Schrauben perforiert und anschließend das Plastelin wieder aufgestapelt.

Schlussfolgerung:

Die hier gezeigten Interventionen fließen direkt in die weiteren Experimente ein. Die Dimensionen des Presskopfes müssen überarbeitet werden. Die maximale Tiefe pro Pressvorgang ist zu gering um eine Fläche von 300x300mm effizient herstellen zu können. Durch den Verlust des Rahmens ist die Materialverdrängung zunehmend ein Problem geworden und muss gelöst werden.

7.3.1 Raster

Trotz ausgemessener Presstiefe stoppt der Roboter bei größeren Flächen aufgrund der Materialverdrängung des Arbeitsmaterials Plastelin während eines Pressdurchlaufes. Es ist erforderlich eine fixe Reihenfolge festzulegen in welcher der Roboterarm die Zielpunkte ansteuert, um eine kontinuierliche und präzise steuerbare Produktion anzustreben. Wie zuvor erklärt wird die Arbeitsfläche zunächst in radial nach außen hin sortierte Segmente unterteilt und diesen schließlich ein in Präzisionsabstufung differenzierbarer Subraster zugeordnet.

7.3.2 Presskopf

Um sowohl die nötige Präzision zur Herstellung einer Schalform zu gewährleisten als auch die Dauer des Prozesses zu minimieren ist die Geometrie des Presswerkzeuges von hoher Relevanz.

Hierzu ist es notwendig vorab einige Informationen bezüglich des, für diese Experimente und Prozesse verwendeten Roboters zu geben:

1. Die Größe des Arbeitsfeldes des Roboters ist beschränkt, daher werden sämtliche Pressvorgänge normal zum Arbeitstisch und nicht normal zur herzustellenden Form ausgeführt.

2. Der Roboter kann maximal eine Presswirkung von 6kg erzeugen, wird diese überschritten, schalten sich die Motoren aus Sicherheitsgründen ab und der Roboter muss manuell neu gestartet werden.

Bei der herzustellenden Fläche handelt es sich jeweils um dieselbe Kugelkalotte, das Material wird nach dem Wechsel des Werkzeuges jeweils neu aufgebracht.

Ablauf:

Auf den Endeffektor des Roboterarmes werden unterschiedliche Pressköpfe angebracht und eine gleichbleibende Sequenz angesteuert. Hierbei werden die Präzision und die Dauer der Vorgänge abgeglichen. Ziel ist es den Presskopf zu ermitteln, der eine möglichst gleichmäßige Oberfläche schafft. Innerhalb der Programmierumgebung wird eine fixe Form definiert, die für alle Werkzeuge gleich bleibt. Die Herstellung dieser Form wird in je 3 Zwischenschritten durchgeführt. Die Feinheit des Rasters wird bei jedem Zwischenschritt erhöht.

Tool I:

Nach nur wenigen Tests wurde es aufgrund der geringen Presskraft des Endeffektors schnell überarbeitet. Das Werkzeug bietet zu viel Fläche für die Verteilung der Presskraft.

Tool II:

Durch das Aufkleben einer Holzhalbkugel mit einem Durchmesser von 5 cm konnten erste Tests durchgeführt werden, aber die Kraftverteilung ist noch immer zu unfokussiert um aussagekräftige Ergebnisse zu produzieren.

Tool III: Quader, abgerundete Ecken, Größe 4,5x4,5cm

Press 1: 35490 targets

Abstand: 2mm
Raster: 4 Punkte
Files: 4
Dauer: 1h 28min

Abbruch nach Presspunkt 15830, Presstiefe zu groß, neuerlicher Scan erforderlich.

Press 2: 35804 Targets

Abstand: 1,5mm
Raster: 5 Punkte
Files: 4
Dauer: 1h 28min

Abbruch nach Presspunkt 30115, Raster zu grob für Werkzeug, neuerlicher Scan erforderlich.

Press 3: 72489 Targets

Abstand: 1,5mm
Raster: 9 Punkte
Files: 3
Dauer pro File: 3h 12min

Abbruch bei Presspunkt 65643.

Schlussfolgerung: Das Werkzeug ist zu wenig präzise.

Tool IV: Kugel, Durchmesser 3,5 cm

Press 1: 32082 targets

Abstand: 2mm
Raster: 5 Punkte
Files: 3
Dauer: 1h 6min

Abbruch nach Presspunkt 20860, Presstiefe zu groß, neuerlicher Scan erforderlich.

Press 2: 34170 Targets

Abstand: 1,5mm

Raster: 5 Punkte
Files: 4
Dauer: 1h 41min

Press 3: 51234 Targets
Abstand: 1,5mm
Raster: 9 Punkte
Files: 3
Dauer pro File: 2h 38min

Schlussfolgerung:

Die Ermittlung der Werkzeugperformance zeigt, dass von den ausgewählten Werkzeugen die Tools I und II ineffiziente Resultate liefern und für die weitere Produktion nicht in Frage kommen aufgrund der ungünstigen Relation von Kraft und Pressfläche.

Tool III hat anfänglich gute Ergebnisse geliefert, ist aber im Bezug auf die Geometrie noch nicht optimal. Tool IV bietet mit einem Durchmesser von 35mm eine günstige Oberflächengeometrie um den Arbeitsbereich abdecken zu können. Die daraus resultierenden Punkte um ein Subsegment in der Finalisierung komplett abdecken zu können belaufen sich hierbei auf 32 Targets.

7.4 Produktion

Ablauf:

Um den Prozess zu demonstrieren wurde exemplarisch, basierend auf einer klassischen Hängekonstruktion in der Physik-Engine Kangaroo ein aus Einzelsegmenten bestehender Schalenpavillon generiert, der über Zugspannung verbunden wird.

Als Gegenüberstellung zu verschiedenen Prozessen wurde maßstabsgetreu die Schalungsform für ein Segment dieses Pavillons, sowohl mit Hilfe des von mir entwickelten Feedback Prozesses als auch mit einem Feed-forward und einem CNC gestützten Prozesses hergestellt und ein Vergleich der jeweiligen Flächen mithilfe eines Romer Hochleistungsscanners durchgeführt.

7.4.1 Feed-forward

Die Vorinformation für den Arbeitsprozess liefert ein Scan mit der Microsoft Kinect Kamera. Die Information über die Ausgangsgeometrie wird integriert und ein einzelner Pressdurchgang zur Annäherung an die Zielfläche generiert.

Dieser Zustand wird als Endzustand angenommen und die Fläche abgescannt um durch einen Abgleich die Abweichung zur Zielfläche erkennen zu können.

7.4.2 CNC

Innerhalb von Grasshopper werden für das Pavillionsegment Fräspfade erstellt. Diese werden auf einen, mit einer Frässpindel ausgerüsteten ABB IRB 140 übertragen und aus einem Styrodurblock herausgearbeitet.

7.5 Feedback Prozess

Basierend auf dem zuvor beschriebenen Script und den durchgeführten Experimenten wird anhand eines iterativen Prozesses, bestehend aus abscannen der Oberfläche, ermitteln des Ist-zustandes und Annähern an die Zielfläche in drei Zwischenschritten mit steigender Auflösung des Subrasters die Schalungsform für das Pavillionsegment gefertigt.

7.5.1 Import

Durch den Microsoft Kinect Scanner wird der Ist-Zustand des Ausgangsmaterials erfasst und in ein Mesh umgewandelt.

7.5.2 Abgleich

Um feststellen zu können ob genug Material für die Produktion vorhanden ist wird zunächst innerhalb des Scripts ein Vergleich mit der zu herstellenden Fläche durchgeführt. In Bereichen die grün aufscheinen ist ausreichend vorhanden. Die Ränder erscheinen rot, da sie von der Produktion ausgenommen sind

7.5.3 Generierung der Presspfade

Aus dem Vergleich zwischen der Ausgangsfläche und Zielfläche werden anhand der Projektion des in Detaillierungsgrad änderbaren Subrasters Presspfade generiert und diese durch Unterteilung der Presstiefe in Presspunkte gewandelt und an den Roboter übertragen.

7.5.4 Produktion der Schalung

Die Zielfläche wird in drei iterativen Prozessen herausgearbeitet, wobei sich die Aulöung des Subrasters und somit die Präzision nach jedem Vorgang steigert.

Schlussfolgerung:

Aus dem Abgleich der einzelnen Zwischenschritte des Feed-back Prozesses ist klar eine Annäherung an die Zielfläche erkennbar.

Der Vergleich zwischen Feed-back, Feed-forward und CNC Herstellung trifft eine klare Aussage über den Entwicklungszustand des Prozesses. Die benötigte Zeit zur Herstellung der CNC Form und der Finalen Form des Feed-back Prozesses weicht nur wenig voneinander ab und bietet einen guten Ansatzpunkt für weitere Forschung und Entwicklung an einigen Aspekten und Rahmenbedingungen eines mit sensorischer Information gekoppelten Herstellungsprozesses.

7.6 Kugelkalotte

Um die Genauigkeit des Herstellungsverfahrens zu demonstrieren wird klassisch eine Kugelkalotte aus einem rohen Plastilin-Block herausgefertigt. Dazu wird die Auflösung des Rasters pro Zwischenschritt weiter verfeinert, was in einer höheren Produktionszeit resultiert, aber in einer genaueren Oberfläche. Die fertige Form wird anschließend mit der digitalen Kugelkalotte abgeglichen und ausgeschalt.

7.7 Unvermeidbares Ornament

»Abwechselnd gefeiert und verurteilt, zugleich historisch rückgebunden und zukunftsweisend, kann das Ornament als universell künstlerisches Phänomen aufgefasst werden. Seine Ausprägungen reichen von den altägyptischen Pyramiden und der Antike über die präkolumbischen Kulturen, den islamischen Kulturraum und das Mittelalter bis in die Neuzeit, Moderne und Gegenwart: Das Bedürfnis nach Ornament und Dekoration scheint über alle Zeiten und Kulturen hinweg ein Grundbestandteil menschlichen Daseins und ein Ausdruck des menschlichen Strebens nach Schönheit zu sein.«²⁵

Bei der Erstellung eines Werkstückes, sei es rein künstlerischer oder architektonischer Natur, muss innerhalb des Planungsprozesses bereits die Produktionsmethode mit einkalkuliert werden, da je nach Wahl andere Parameter eine

Rolle spielen in Bezug auf Materialwahl, Materialverdrängung usw. Jedes Werkzeug hinterlässt, meist ungewollt seine Spuren auf einer Oberfläche, und erzeugt ein unverkennbares Muster. Seien es die Riefen, die ein Scharriereisen auf Stein, verschieden feine Hobel auf Holz oder die präzisen kontinuierlichen Bahnen, die eine CNC Fräse auf unterschiedlichen Oberflächen hinterlässt.

Durch die Wirkung eines Pressvorgangs auf die weiche Tonoberfläche wird unwillkürlich ein konstantes Muster generiert, welches den Detaillierungsgrad des Prozesses widerspiegelt. Dieses Muster ist als künstlerische Komponente in das Projekt eingebunden und ist so wie der Prozess nicht material-, sondern werkzeugspezifisch. Mit der Entwicklung des Werkzeugs ändert und entwickelt sich auch das unvermeidbare Muster.

8.1 Conclusio

Diese Arbeit gibt einen Überblick über verschiedene Arten der Implementierung von technologischen Innovationen auf der Ebene von robotergestützten Fertigungstechniken in den architektonischen Kontext. Das Nutzen von sensorischer Information bietet einen neuen Blickwinkel auf die Art und Weise wie einzelne Bauteile und auch Gebäude in Zukunft entstehen könnten. Dieser reicht von der Positionierung von Einzelelementen auf einer Baustelle durch Drohnen, die ihre eigene Position mittels Triangulation bestimmen, bis hin zur kompletten Integration von mobilen, scannergesteuerten Industrierobotern als ausführende Handwerker.

Die Entwicklung eines iterativen Prozesses, fußend auf einer plastischen Verformung eines Ausgangsmaterials und dem zuvor erfassten „Ist-Zustand“ ist gegenüber anderen vorgestellten Prozessen eine alternative Herangehensweise im Umgang mit Information, Aktion und Reaktion.

Die Prozesskette, bestehend aus einem initialen Scan, der Aussage über den Grundzustand des Materials trifft, gefolgt vom Abgleich mit der Zielfläche und der Integration dieser Information in einen Presszyklus, wird verwendet um sich schrittweise an den Endzustand einer doppelt gekrümmten Schalungsform anzunähern.

In Gegenüberstellung zwischen einem „Single-Cycle Feed-Forward“- und einem „Multi-Cycle Feed-Back“-Zyklus zeigt sich eine klare Verbesserung durch das erneute Einarbeiten der Information über den Zwischenzustand und die progressive Steigerung der Auflösung des Pressrasters nach jedem Durchgang. Durch die Implementierung einer „Real-Time Feed-Back“ Schleife können die Möglichkeiten des Prozesses ausgeweitet und zu einem selbstständigen System entwickelt werden.

Die durch den Roboter festgelegten Rahmenbedingungen, wie maximale Presstiefe, Werkzeuggeometrie und Arbeitsradius, sind Punkte, auf die in Bezug auf eine Weiterentwicklung des Herstellungsverfahrens ein großes Augenmerk gelegt werden sollte. Eine Umlegung der dem Prozess zugrundeliegenden Syntax mit Hilfe von geringen Änderungen auf andere Materialien ist ebenso eine Möglichkeit der Verbesserung.

Der entwickelte Arbeitsprozess ermöglicht eine materialsparende Fertigung von Schalungsformen für doppelt gekrümmte Flächen und erfüllt somit das anfänglich gesetzte Ziel. Der Stand der Entwicklung, in dem sich diese Fertigungstechnologie befindet, bietet einige neue Aspekte der kostengünstigen Herstellung von komplex geformten Betonfertigteilen, weitab von zwar bewährten, jedoch auch veralteten Herstellungsverfahren.

Bibliographie

Amtsberg, Felix/Raspall, Felix/Trummer, Andreas (2015): Emerging Experience in Past, Present and Future of Digital Architecture; Digital-Material Feedback in Architectural Design. Daegu

ABB: IRB 140 Small, powerful and fast 6-axes robot: <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-140> in new.abb.com

Bell-Cokcan, Sigrid/Braumann, Johannes Hg. (2013): Rob|Arch, Robotic fabrication in Architecture, Art, and Design. Wien. Springer Verlag

Cache, Bernard Hg. (2010): GAM 06- Nonstandard Structures, After Parametrics. Wien, New York. Springer Verlag

Caspary, Uta (2013): Ornamente der Fassade. Berlin. Jovis Verlag

Gramazio, Fabio/Kohler, Matthias/Willmann, Jan (2014): THE ROBOTIC TOUCH-How Robots Change Architecture. Zürich. Park Books

Gramazio, Fabio/Kohler, Matthias (2012): Winery Gantenbein / Gramazio & Kohler + Bearth & Deplazes Architekten, <http://www.archdaily.com/260612/winery-gantenbein-gramazio-kohler-bearth-deplazes-architekten> in: <http://www.archdaily.com/>

Hauschild, Moritz/Karzel, Rüdiger Hg. (2010): Digitale Prozesse. München. Institut für Internationale Architekturdokumentation GmbH & Co. Kg

ITE TUGraz (2013): FAKSIMILE SS2013, <http://www.ite.tugraz.at/index.php?page=272> in: www.ite.tugraz.at

Ladzinski, Aston (2012): Development of 3D Image Manipulation Software Utilizing the Microsoft Kinect. School of Engineering and Energy, Murdoch University

Nerdinger, Winfried Hg. (2010): Wendepunkte im Bauen - von der seriellen zur digitalen Architektur. München. Ins. F. Int. Architekturdokumentation

Semper, Gottfried (1851): Weltausstellung

Taut, Bruno (1927): Ein Wohnhaus. Stuttgart. Franckh'sche Verlagshandlung

Wachsmann, Konrad (1959): Wendepunkte im Bauen. Wiesbaden. Krausskopfverlag

Abbildungsnachweis

Abb. 2.1.1 <http://www.einstein-website.de/images/Wachsmann1929.jpg>

Abb. 2.1.2 http://41.media.tumblr.com/tumblr_maqyqgTg4T1r6glo5o1_1280.jpg

Abb. 3.1.1 http://40.media.tumblr.com/fbec218a9c7963b777329a066987292a/tumblr_nl3co8k8cD1rug5n5o1_1280.jpg

Abb. 3.1.2 http://www.srf.ch/var/storage/images/auftritte/news/bilder/node_1388818/11678962-2-ger-DE/bild_span12.jpg

Abb. 3.1.3 http://ricardosaslavsky.files.wordpress.com/2014/03/th_65d1300db123ce22f6e2569fb36764f8_1137_innsb_phot_0290.jpg

Abb. 4.2.1 <http://blog.drupa.com/wp-content/uploads/2015/01/printedhouse.jpg>

Abb. 4.2.2 http://www.cact.org/documents/CACT_EmergingIndustries_Report_V4_LowRes.pdf

Abb. 4.2.3 http://i.kinja-img.com/gawker-media/image/upload/s--mvl89iA2--/c_scale,fl_progressive,q_80,w_800/196va6mbeogzmjpg.jpg

Abb. 4.2.4 M. Hauschild R. Karzel Hg. (2010): Digitale Prozesse. München. Institut für Internationale Architekturdokumentation GmbH & Co. Kg, S.44

Abb. 4.2.5 M. Hauschild R. Karzel Hg. (2010): Digitale Prozesse. München. Institut für Internationale Architekturdokumentation GmbH & Co. Kg, S.57

Abb. 4.2.6 M. Hauschild R. Karzel Hg. (2010): Digitale Prozesse. München. Institut für Internationale Architekturdokumentation GmbH & Co. Kg, S.68

Abb. 4.2.7 <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/58/c4/0f/58c40f9915f3c1595ec672382e3d518f.jpg>

Abb. 4.3.1 www.iaarc.org/publications/fulltext/Turning_Points_in_Construction.pdf

Abb. 4.3.2 http://www.robarch2012.org/wp-content/uploads/2011/11/2_Robotic-Fabrication-of-Non-standard-Brick-Wall-Professorship-Gramazio-Kohler-Architecture-and-Digital-Fabrication-ETH-Zurich.jpg

Abb. 4.3.3 https://www.zuliefermarkt.de/_storage/asset/1060617/storage/chv-content-center/file/17340504/08707216.jpg

Abb. 4.3.4 <http://3dprint.com/wp-content/uploads/2015/06/about-3-1030x579.jpg>

Abb. 4.4.1- Abb. 4.4.5 <http://www.archdaily.com/260612/winery-gantenbein-gramazio-kohler-bearth-deplazes-architekten>

Abb. 4.4.6- Abb. 4.4.10 <http://www.itke.uni-stuttgart.de/entwicklung.php?id=25>

Abb. 4.5.1- Abb. 4.5.5 S.Bell-Cokcan, J.Braumann (2013): Rob|Arch, Robotic fabrication in Architecture, Art, and Design. Wien. Springer Verlag, S. 230- 237.

Abb. 4.5.6- Abb. 4.5.10 <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/164.html>

Abb. 4.5.11- Abb. 4.5.16 Bilder des Autors

Abb. 5.2.1 <http://www.gramaziokohler.com/web/e/projekte/209.html>

Abb. 5.3.1- Abb. 5.3.3 F. Amtsberg, F. Raspall (2014): Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design; Material Feedback in Robotic Production. Springer International Publishing.

Abb. 6.2.1 Bild des Autors

Abb. 6.3.1 <https://d3nevf7k7ii3be.cloudfront.net/igi/11MmxFnRgOpcfRZ.medium>

Abb. 6.3.2 <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/67/Xbox-360-Kinect-Standalone.png/1024px-Xbox-360-Kinect-Standalone.png>

Abb. 6.3.3- Abb. 6.3.5 <https://lernprocessing.wordpress.com/2012/12/13/kinect-einstieg/>

Abb. 6.3.6- Abb. 6.3.7 http://www.gamasutra.com/blogs/DanielLau/20131127/205820/The_Science_Behind_Kinects_or_Kinect_10_versus_20.php

Abb. 6.4.1- Abb. 6.4.2 Bilder des Autors

Abb. 6.5.1 Bild des Autors

Abb. 6.5.2 <http://www07.abb.com/images/default-source/robotics/irb-140-data.jpg?sfvrsn=2>

Abb. **6.6.1**
http://cdnreal.food4rhino.com/cdn/farfuture/ak5oXrJGazx0rOWZHrcJUJ9dkloWJkDhZ0x61wHj8b8/mtime:1420511747/sites/default/files/imagecache/Thumbnail-project-node/firefly_logo_256x256.jpg

Abb. 6.6.2- Abb. 6.6.15 Bilder des Autors

Abb. 7.1.1- Abb. 7.1.8 Bilder des Autors

Abb. 7.2.1- Abb. 7.2.17 Bilder des Autors

Abb. 7.3.1- Abb. 7.3.39 Bilder des Autors

Abb. 7.4.1- Abb. 7.4.8 Bilder des Autors

Abb. 7.5.1- Abb. 7.5.19 Bilder des Autors

Abb. 7.6.1- Abb. 7.6.6 Bilder des Autors

Abb. 7.7.1 Bild des Autors

Danksagung

Für die Unterstützung bei meiner Masterarbeit möchte ich mich herzlich bei einigen Leuten bedanken:

Bei meinem Betreuer Stefan Peters, bei Felix Amtsberg, bei Andreas Trummer und vielen anderen Mitarbeitern am Institut für Tragwerksentwurf, für die tatkräftige Unterstützung, konstruktive Kritik und geniale Betreuung.

Bei meinem Freund Paul Randig für dem konstanten Nachschub an kontroversen Ideen und Satzzeichen.

Ganz besonders bei meiner Familie, allen meinen Freunden und meiner Partnerin, die mich auf diesem Weg begleitet, unterstützt und inspiriert haben.