

# **Machinecraft in der Architektur.**

Architektonische Roboter als  
Synthese von Handwerk und  
Maschine.

Eine kritische Evaluierung ihrer  
Auswirkungen.

Cristina Nan



## **Machinecraft in der Architektur.**

Architektonische Roboter als Synthese von Handwerk und Maschine.  
Eine kritische Evaluierung ihrer Auswirkungen.

Vorgelegt im Promotionsausschuss der  
HafenCity Universität Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur(in) (Dr.-Ing.)

Dissertation von Ioana Cristina Nan  
Dipl. Ing. (Arch.) Technische Universität München

Betreuer Prof. Dott. Arch. Paolo Fusi  
HafenCity Universität Hamburg

Betreuer Prof. Dr. Viktor Sigrist  
Hochschule Luzern

Meinen Eltern

## Abstract

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Thema der robotischen Fertigung und versucht neue Entwicklungswege für die computergesteuerte Fabrikation im Bereich der Architektur aufzuzeigen. Diese Thematik wird auf zwei Ebenen behandelt. Während sich die erste Ebene mit dem theoretisch-philosophischen Rahmenwerk bezüglich der Rolle der Maschine, der Maschinenentwicklung durch den Architekten und architektonischer Roboter beschäftigt, werden auf der zweiten Ebene die resultierenden methodologischen Implikationen an einer durch den Autor durchgeführten experimentellen, robotischen Fallstudie, die den Namen „*Minibuilders*“ trägt, beleuchtet. Die Intention besteht darin den Status der Maschine im Allgemeinen, und im Konkreten des Roboters und selbst entwickelter Robotersysteme, neu zu definieren und somit die Position des Architekten als Erfinder von Maschinensystemen zu avancieren.

Die Variabilität von Entwürfen und die Entwurfsserie stellen oft thematisierte Motive in der Architektur dar. Das digitale Medium bietet den benötigten Nährboden für einen zugänglichen und vereinfachten Akt des Erfindens. Mittels des Scriptens, also dem Verfassen von Instruktionen mittels Programmiersprachen, können Architekten spezifische Entwurfswerkzeuge entwickeln oder bestehende an den eigenen Ansprüchen adaptieren. Das Potenzial, das erschlossen werden kann, ist dementsprechend immens. Dieselben Möglichkeiten lassen sich auch im fabrikativen Bereich antreffen. Digital gesteuerte Fabrikationsmaschinen offerieren dieselben Möglichkeiten für den Architekten mittels der Manipulation ihrer instruktiven Datensätze. Zusätzlich ermöglichen sie auch technische Interventionen seitens des Architekten, so dass diesem die Option zur technischen Anpassung bis hin zur Erfindung neuer Maschinen frei steht. Wenn im Rahmen dieser Arbeit der Terminus Erfinder benutzt wird, so bezieht er sich auf das Erfinden fabrikationsbezogener Komponenten, seien es nur Maschinenteile oder ganze Robotersysteme. Die durchgeführte Investigation fokussiert auf die Implikationen der Betätigung des Architekten als Maschinenentwickler und die Befreiung von den maschinellen Zwängen, indem er auf das Arbeiten mit Industrierobotern zurückgreift.

Computer gesteuerte Fertigung (CAM) und kundenspezifische Massenproduktion (mass customization) garantieren die relativ unproblematische Baubarkeit variierender Entwurfsserien, von Industrieprodukten bis hin zu Gebäuden. Standardisierte Maschinen können ohne das Betreiben eines Mehraufwands variierende Teilelemente fertigen. Der nächste Entwicklungsschritt stellt die Variabilität der Maschine entsprechend spezifischer Entwurfsanforderungen dar. Der erste Schritt in diese Richtung besteht bereits in dem vermehrten Einsetzen robotischer Industriearme in der Architekturpraxis. Ein anderer Ansatz liegt darin, die Idee der nicht spezifischen Roboterarme beiseite zu legen und sich stattdessen auf das Adaptieren anpassbarer Roboter oder Robotersysteme zu konzentrieren. Diese nehmen die Funktion spezifischer Entwurfswerkzeuge ein, die in der Lage sind auf die facettenreichen Projektansprüche betreffend der Fabrikationsprozesse zu reagieren.

Abgesehen von der Kontrolle über die Entwurfs- und Informationsprozesse, wäre der Architekt zum Teil auch für die Entwicklung und die Rekonfiguration von Maschinen verantwortlich, sowie auch für das Entwickeln entsprechender robotischer Baustrategien. Diese Prozesse müssen selbstverständlich als partizipatorisch und interdisziplinär betrachtet werden. Der Architekt ist nicht nur Bedienender der Maschine, sondern wird in gewissem Masse auch zu ihrem Erfinder. Durch das Involvieren des Architekten in die Entwicklung robotischer Systeme wird ein bidirektionaler Prozess angestoßen: das Adaptieren der Maschine an die Entwurfsanforderungen und vice versa. Der Architekt wird zum Organisator einer konzeptuellen robotischen Strategie, die die Bereiche des Entwurfs, des Materials, der Struktur und der Maschinenentwicklung abdeckt. Im Kontext dieser Betrachtungen wird die Rolle des Architekten als Entwickler und Erfinder von robotischen Systemen im Zusammenhang mit der Evolution des Berufsstands im Laufe der letzten Jahrhunderte beleuchtet. Handwerk als praktische Betätigung und als theoretisches Konzept wird analysiert, wobei die These vertreten wird, dass durch die Robotik eine Reaktivierung der Handwerklichkeit in der Architektur erzeugt werden kann. Diese Ideen werden unter dem Konzept der Machinecraft zusammengeführt und anhand diverser historischer Fallstudien analysiert und betrachtet.

Dieses theoretische Rahmenwerk wird von einer experimentellen Fallstudie unterstützt. Das Robotikprojekt „*Minibuilders*“ wurde während eines Forschungsaufenthalts am IaaC - Institute for Advance Architecture of Catalonia in Barcelona durchgeführt. Das genannte Gruppenprojekt illustriert die Implikationen, die sich aus der parallelen Entwicklung einer robotischen Fabrikationsstrategie mit dem dazugehörigen Robotersystem ergeben. Einem problemorientierten Ansatz folgend wurde ein dreiteiliges mobiles und unabhängig agierendes Robotersystem entwickelt.

Ein vertieftes und differenzierteres Verständnis für die Potenziale der Robotik für die Disziplin, der handwerklichen Natur der Architektur in einem digitalen Kontext und die Neupositionierung des Architekten als Entwickler von Fabrikationsstrategien und -technologien wird beabsichtigt.

## **Anerkennung**

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit wurde im Rahmen des Graduiertenkollegs „Kunst und Technik“ bearbeitet und fertiggestellt. Die damit verbundene Arbeit und Forschung wurden von der Deutschen Forschungsgesellschaft gefördert. Die dreijährige Förderung dieses Forschungsvorhabens durch die DFG hat die Teilnahme an einer breiten Reihe von Seminaren, Konferenzen und Workshops ermöglicht. Das somit gewonnene Fachwissen hat den theoretischen Diskurs innerhalb der vorliegenden Arbeit substantiell bereichert und eine differenzierte thematische Auseinandersetzung begünstigt.

Prof. Paolo Fusi und Prof. Viktor Sigrist haben als Betreuer der Doktorarbeit beim Navigieren durch das komplexe Feld der theoretischen Themenbereiche einen signifikanten Beitrag geleistet. Mit ihrer Hilfe war es möglich eine ausgeglichene Struktur auszuarbeiten und die thematische Komplexität so zu erfassen, dass zwar die Struktur vernetzter wissenschaftlicher Inhalte beleuchtet wird, gleichzeitig aber die Arbeit ihren Fokus beibehält.

Mein Dank gilt auch den Mitgliedern des Graduiertenkollegs „Kunst und Technik“, den beteiligten Professoren, Doktoranden und Postdoktoranden für die konstruktiven und interdisziplinär geprägten Gesprächsrunden.

Die präsentierte Fallstudie Minibuilders wurde am Institute for Advanced Architecture of Catalonia in Barcelona durchgeführt. Das Mitwirken der Gruppenpartner, der Professoren und des Forschungspersonals des IaaC-Instituts haben das Zustandekommen eines facettenreichen Forschungsprojekts ermöglicht, welches neue Einblicke in die Thematik der Architekturrobotik geboten hat.

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>Anerkennung</b>	<b>7</b>
<b>I. Einleitung</b>	<b>14</b>
1. <b>Zur Architektur und zur Maschine</b>	<b>14</b>
2. <b>Ziel der Forschung</b>	<b>16</b>
3. <b>Aufbau und Methodik</b>	<b>18</b>
4. <b>Stand der Forschung</b>	<b>19</b>
<b>II. Machinecraft</b>	<b>22</b>
1. <b>Der Maschinenbau und die Architektur</b>	<b>22</b>
2. <b>Der Kontext der Digitalisierung</b>	<b>23</b>
3. <b>Das Konzept der Machinecraft</b>	<b>25</b>
4. <b>Handwerk</b>	<b>27</b>
Allgemeine Begriffsdefinition und Kontextualisierung	27
Handwerk als Ausgangspunkt für die Architektur	30
5. <b>Die Maschine</b>	<b>32</b>
Begriffserklärung	32
6. <b>Handwerk und Maschine</b>	<b>34</b>
Vergleich zwischen handwerklichem Werkzeug und der Maschine	34
Vergleich zwischen maschineller und handwerklicher Bearbeitung	36
Maschine als limitierender Faktor	37
7. <b>Schlussfolgerungen zu Handwerk, Maschine und Machinecraft</b>	<b>39</b>
<b>III. Renaissance: Baumeister und Architekt</b>	<b>43</b>
1. <b>Zwei Modelle</b>	<b>43</b>
Analysemethodik	45

<b>2. Vom Wandel der Berufe</b>	<b>46</b>
Auslöser des Wandels	48
<b>3. Filippo Brunelleschi - Das Paradigma des Baumeisters</b>	<b>50</b>
Zum biographischen Hintergrund	50
Der Kuppelbau der Santa Maria del Fiore in Florenz	52
Terminologie: Vorbogen und Lehrgerüst	52
Die Bauaufgabe	54
Baustrategie und Ausführung	56
Die Gerüste	57
Die Doppelschaligkeit der Kuppel	58
Bautechnische Innovationen bei Brunelleschi	62
Brunelleschi und der Maschinenbau	63
Interdisziplinarität des mittelalterlichen Baugewerbes	64
Das Modell des Baumeisters	66
<b>4. Leon Battista Alberti - Das Paradigma des Architekten</b>	<b>69</b>
De re aedificatoria	69
Kontext und Architekturtraktate	70
Vitruv in seiner Vorbildfunktion	72
Dualität des Diskurses	72
Trennung von Planung und Ausführung	75
Der Plan	79
Das durch Pragmatismus begründete Schisma	82
Zur Maschine und zum Erfindungsgeist	83
<b>5. Schlussfolgerungen, im Kontext der digitalen Praxis</b>	<b>84</b>
<b>IV. Industrialisierung</b>	<b>92</b>

<b>1. Ein neuer Kontext</b>	<b>92</b>
<b>2. Ablösung des Werkzeugs durch die Maschine</b>	<b>93</b>
<b>3. Der Einfluss von Eisen und Stahl</b>	<b>95</b>
<b>4. Der Ingenieur: Vom Wandel der Berufsbilder</b>	<b>98</b>
<b>5. Der Kristallpalast</b>	<b>102</b>
<b>6. Schlussfolgerungen zum Potenzial technologischer Entwicklungen</b>	<b>110</b>
<b>V. Robotik</b>	<b>113</b>
<b>1. Im Kontext der Machinecraft</b>	<b>113</b>
<b>2. Roboter - Begriffserklärung und allgemeine Definition</b>	<b>113</b>
<b>3. Klassifizierung von Robotern</b>	<b>115</b>
<b>4. Industrieroboter</b>	<b>116</b>
Geschichtlicher Überblick	116
Definition	117
Anwendung von Industrierobotern	118
Vorteile des Industrieroboters	119
<b>5. Automatisierung und Robotisierung des Bauwesens</b>	<b>119</b>
Vorbild und Einfluss der Automobilindustrie	119
Einsatz von Robotern im Bauwesen	122
Japan und die Entwicklung der Industrieroboter im Bauwesen	124
<b>6. Schlussfolgerungen</b>	<b>127</b>
<b>VI. Theoretische Ansätze zur Architekturrobotik</b>	<b>129</b>
<b>1. Gramazio und Kohler</b>	<b>129</b>
Einfluss des Digitalen auf das Materielle	131
Der Industrieroboter - Bindeglied zwischen Entwurf und Fabrikation	132
Implikationen des Programmierens	134
Eine neue Ästhetik	136

2. Zusammenfassende Betrachtungen	139
<b>VII. Fallstudie: Minibuilders</b>	<b>141</b>
1. Forschungsrahmen	141
2. Fertigungsverfahren und ihre Klassifizierung	142
3. Generative Fertigung und Rapid Prototyping	143
4. 3D-Druck Verfahren und ihre Klassifizierung	144
5. Vorbilder und Stand der Forschung	145
Neri Oxman und das VPRP-Verfahren	145
Behrokh Khoshnevis und das Contour Crafting	150
Enrico Dini und D-Shape	153
6. Projektagenda	156
7. Robotische Konstruktionsstrategie	161
Materialzufuhr und Strategie der Materialverteilung	167
Zukünftige Entwicklungsfelder	171
8. Schlussfolgerungen	174
Interdependenz	174
Code und Programmieren	175
Roboter als Fabrikationswerkzeug	175
Handwerklichkeit durch den Roboter	176
Die Maschine als weiterer Ausgangspunkt	177
Demokratisierung und Liberalisierung durch die Maschine	178
<b>VIII. Abschließende Schlussfolgerungen</b>	<b>180</b>
1. Integraler Ansatz der Machinecraft	180
2. Zur materiellen und konstruktiven Natur	180
3. Neuintegration der Handwerklichkeit	181
4. Material	181

<b>5. Die Frage des technologischen Primats</b>	<b>182</b>
<b>6. Neupositionierung des Architekten</b>	<b>183</b>
<b>7. Erweiterung des Gestalterischen</b>	<b>183</b>
<b>8. Bezug zur baulichen Tradition</b>	<b>183</b>
<b>9. Die Variation der Maschine</b>	<b>184</b>
<b>10. Interdisziplinarität</b>	<b>185</b>
Abschliessend	185
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>187</b>
<b>Internetquellen</b>	<b>194</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>195</b>

# I. Einleitung

## 1. Zur Architektur und zur Maschine

Die Entwicklung der Architektur ist eng an die Entwicklungen im Bereich des Materials und der Technologie gebunden. Dies lässt sich durch eine Vielzahl von Beispielen nachweisen, angefangen beim Altertum über die Industrialisierung bis hin zur Moderne. Als Beleg für diese Behauptung lässt sich das Exempel eines der ältesten Baumaterialien heranzuführen. Der Soziologe Richard Sennett bietet hierfür ein für die Architektur äußerst relevantes Beispiel, indem er den geschichtlichen Werdegang des Ziegels zusammenfasst. Lehmziegel können sich auf einen langen Einsatz in der Bautradition berufen, denn sie werden seit über zehntausend Jahren als Baustoff eingesetzt. Der Übergang vom Lehmziegel zum gebrannten Ziegel geschah erst circa 3500 v. Chr. mit der Erfindung des Brennofens. Zum Brennen eines Ziegels sind Temperaturen von bis zu 1000 Grad Celsius notwendig, während es unmöglich ist diese Werte mit einem offenen Feuer zu erzielen.<sup>1</sup> Aus diesem Prozess des Brennens von Ziegeln resultierten der gebrannte Lehmziegel, der im Vergleich zu seinem Vorgänger witterungsresistent war. Somit führte die Erfindung des Brennofens, eine technologische Entwicklung, zu der Weiterentwicklung eines Baumaterials.

Technik und technologischer Fortschritt stellen direkte Treiber der Architektur dar. Sie üben einen transformierenden Einfluss auf die disziplinären Werkzeuge des Architekten aus, wodurch neue Logiken, Methoden oder Prozesse generiert werden, was wiederum disziplinäre Entwicklungsschübe provozieren kann. Jedoch tut sich die Disziplin generell damit schwer, Technik als einen wesentlichen Faktor Architekturevolution anzuerkennen, so dass die Signifikanz technischen Fortschritts auf der rein fabrikativen Ebene akzeptiert wird, auf der entwerferischen tendenziell negiert oder als sekundär eingeschätzt wird. Diese dualistische Relation zur Technik und die unentschlossene Positionierung zu dieser fasst der Professor für Kunstgeschichte Norbert Huse in der Formulierung treffend zusammen, dass „*eines der Problemfelder, die die Architektur auch weit in das 21. Jahrhundert hinein in Atem halten werden, das Verhältnis zu Technik ist*“.<sup>2</sup> Gerade heute, angesichts einer rasanten Technologieentwicklung, die eine proliferative Phase erlebt, so dass unermüdlich innovative Instrumente und Methoden der Fabrikation mit traditionellen Werkzeugen und Prozessstrukturen konkurrieren, ist eine Thematisierung der Relevanz und des Potenzials von der technologischen Komponente von größter Signifikanz. Im weiteren Verlauf dieser Dissertation wird das Evidenzieren der Rolle technologischer Entwicklungen und des Einbindens des Architekten in diese technischen Prozesse, vornehmlich der Maschine und des Roboters verfolgt. Erläuterung der bestehenden Zusammenhänge zwischen Entwurf, Material, Fabrikation, Architekten und hauptsächlich die Rolle des handwerklichen Arbeitens

---

<sup>1</sup> Vgl. Sennett, R.: „Handwerk“, Berlin Verlag, Berlin, 2008, S. 177.

<sup>2</sup> Huse, N.: „Geschichte der Architektur im 20. Jahrhundert“, C. H. Beck Verlag, München, 2008, S. 108.

verbunden mit der Maschine werden dabei beachtet und beleuchtet. Es geht darum, das Potenzial, welches von Maschinen im Allgemeinen und vom Roboter im Speziellen ausgeht und seit langem relativ ungenutzt und unbeachtet vom Architekten umgangen wurde, aufzuzeichnen und zukünftige Entwicklungsfelder zu umreißen. Die Rolle der vom Architekten ausgehenden und betriebenen Auseinandersetzung mit und Entwicklung von Maschinen der Fabrikation und eine sich daraus ableitende Reaktivierung der handwerklichen Natur der Architektur stehen somit im Zentrum der Betrachtung.

Das Aufgabenfeld des Architekten ist ein komplexes Gefüge das sich mit einer Vielzahl von anderen Disziplinen überschneidet und von einem grundsätzlich interdisziplinären Charakter geprägt ist. Materialkunde, Ingenieurwissenschaften, Haustechnik, Biotechnik, Sozialwissenschaften oder Verhaltenspsychologie sind nur einige der Felder mit denen die Disziplin der Architektur traditionell konvergiert. Um der Idee, dem Gedachten und Entworfenen eine materielle Form zu geben, ist die Architektur auf Werkzeuge der Fabrikation angewiesen. Zu diesen zählen ebenfalls Maschinen, seien es die frühen noch simplen Formen von Baukränen, wie sie auf der mittelalterlichen Baustelle anzutreffen waren, die neuen Maschinen zur Stahlverarbeitung wie sie im Laufe der Industriellen Revolution entwickelt wurden oder die immer mehr an Gebrauch und Zuspruch gewinnenden modernen Industrieroboter oder 3D-Drucker aus der heutigen Zeit. Innerhalb dieser Arbeit wird der Frage nachgegangen, warum es überhaupt erstrebenswert ist, dass Architekten sich aktiv mit dem Maschinenbau beschäftigen und welcher Mehrwert daraus resultieren kann. Im Kontext der heutigen Entwicklungen wird das Hauptmerk der Betrachtung auf Industrieroboter und von Architekten entworfene experimentelle Bauroboter gelegt.

Unterschiedliche Ansätze in Verbindung mit der Thematik der Maschine lassen sich im Verlauf des Architekturdiskurses identifizieren. Eines der einflussreichsten Assoziierungen zwischen Maschine und Architektur lässt sich auf den Architekten Le Corbusier zurückführen. Le Corbusier versuchte das Vorbild der technischen Funktionsweise der Maschine auf das Gebaute zu übertragen und prägte somit den Begriff der Wohnmaschine.<sup>3</sup> Maschine wird in diesem Kontext als ein Vorbild gesehen, deren inhärente Eigenschaften auf die Architektur projiziert werden sollen. Das Erreichen einer absoluten Funktionalität steht im Vordergrund. Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird eine andere Herangehensweise bei der Auseinandersetzung mit der Thematik der Maschine herangezogen. Die Vorbildfunktion der Maschine als konzeptionelles Leitbild für die Architektur wird nicht aktiviert. Es geht darum Maschine bzw. Roboter als aktiven und bedeutenden Parameter in der Architektur zu beleuchten. Als Mittel der Fabrikation wurde ihre Wahrnehmung von einer kennzeichnenden Passivität geprägt und vom Architekten überwiegend als dienliche Mittel zum Zweck verstanden. Diesem Ansatz der Betrachtung gilt es entgegenzuwirken und neue Sichtweisen zu eröffnen.

---

<sup>3</sup> Le Corbusier: „Ausblick auf eine Architektur“, Birkhäuser Verlag, Braunschweig, 2013, S..

## 2. Ziel der Forschung

Es ist richtig wenn der Theoretiker Mario Carpo folgende Feststellung macht:

*„Sie [Anm. d. A.: die Architekten] wollen nicht zur Kenntnis nehmen, dass die heutigen Maschinen nicht mehr länger diejenigen sind, die Le Corbusier und seine Freunde vor fast einem Jahrhundert gefeiert und sich angeeignet haben.“<sup>4</sup>*

Die Architektur reagiert langsam auf die Veränderungen in Bereich der Produktion. Bei der Aneignung und Implementierung neuer Fertigungstechnologien handelt es sich um komplexe Prozesse, welche sich im Laufe ausgedehnter Zeitspannen abspielen. Das heutige Angebot an neuen Maschinen, von dem Lasercutter, CNC-Fräsen, Rapid Prototyping-Verfahren, 3D-Lasercan-Technologien bis hin zu Industrierobotern und selbstentwickelten Robotersystemen, die bei der Fabrikation in der Architektur benutzt werden können, hat sich in den vergangenen Jahrzehnten rasant erweitert. Veränderungen im Bereich der Produktion sind an konkrete Innovationen im Bereich der Maschinenentwicklung gebunden. Neue Maschinen und Fertigungsverfahren werden entwickelt, so dass sich dadurch das Medium der Fabrikation verändert. Es stellt sich daher die Frage, welche Rolle spielt heute die Maschine in der Entwicklung der Architektur und welches Potenzial geht von ihr aus. Die Entwicklung neuer Maschinen und die damit einhergehende Entwicklung innovativer Verfahrensmethodiken verlangt nach Änderungen in der Fabrikationslogik, die vom Architekten anzuerkennen und zu berücksichtigen ist. Zusätzlich fordert dies nach einer Auseinandersetzung des Entwerfers mit der Maschine und ihrer Funktionsweise.

Im Kontext einer voranschreitenden Digitalisierung und Technologisierung der Disziplin wird die Rolle des Roboters in der Architektur untersucht. Ein oft im architektonischen Diskurs angetroffener Vorwurf ist der der Entfremdung der Disziplin durch eine übermäßige und nicht immer sinnvolle Implementierung fachfremder Technologien und Verfahren. Der hohe Grad an Digitalisierung wird oft mit dem Kontrollverlust des Menschen über die Prozesse des Entwerfens und der Fabrikation gleich gesetzt, was einen implizierten Qualitätsverlust des Resultats suggeriert.<sup>5</sup> Es ergibt sich somit die Frage, ob dieser Vorwurf berechtigt ist oder ob im Gegenteil durch eine spezifisch gesteuerte Implementierung und ein zweckmäßiges Adaptieren des Roboters in den Kontext architektonischer Fabrikation neue nutzbringende Synergien entstehen können. Das Objekt dieses Vorgehens liegt darin festzulegen ob durch den Einsatz des Roboters traditionelle handwerkliche Methoden und Verfahrensweisen im Sinne einer digitalen Handwerklichkeit oder digitalen Materialität<sup>6</sup> reaktiviert werden können.

---

<sup>4</sup> Carpo, M.: „Alphabet und Algorithmus“, transcript Verlag, Bielefeld, 2012, S. 28.

<sup>5</sup> Vgl. Abel, C.: „Architecture and Identity. Responses to cultural and technological change“, Architectural Press, Oxford, 2000, S. 43.

<sup>6</sup> Vgl. Gramazio, M., Kohler, M.: „Digital Materiality in Architecture“, Lars Müller, Baden, 2008, S. 7.

Der Roboter bietet sich als ein ideales Fabrikationswerkzeug für den Architekten an, da es sich hierbei um eine nicht-spezifische Maschine handelt, welche über reines Programmieren steuerbar ist, neu konfiguriert werden und somit verschiedene Aktionen ausführen kann. In diesem Zusammenhang bedeutet nicht-spezifische Maschine, dass der Roboter für eine weite Bandbreite von verschiedenen Aktivitäten benutzt werden kann und somit nicht der spezifischen Funktionalität innre Bandsäge oder eines 3D Druckers unterliegt. Dem Architekten wird die Chance geboten, direkt in maschinelle Abläufe eingebunden zu werden und über die Aktionen und Arbeitsprozesse von Maschinen selber zu bestimmen. Die Passivität bezüglich der maschinellen Fabrikation kann mittels Roboter überwunden werden und hat das Potenzial die Möglichkeiten der Fabrikation zu erweitern. Eine neue Art der Befreiung von den Fabrikationszwängen kann erreicht werden, was wiederum auch eine Erweiterung der Entwurfsmöglichkeiten und die Befreiung des Entwerfers bedeuten kann.

Das Ziel dieser Forschung besteht in dem Aufstellen eines neuen Konzepts, das das von Maschinen ausgehende Potenzial umschreibt. Das Konzept der Maschinenhandwerklichkeit zielt darauf ab, das durch das Benutzen von Robotern Aspekte des handwerklichen Arbeitens beim Architekten reaktiviert werden können, so dass eine neue Vernetzung zwischen dem Digitalen, Maschinellen und Manuellen erreicht werden kann.

Im Verlauf der Dissertationsschrift wird das Beantworten der folgenden Fragestellungen verfolgt:

- Wie stellt sich der Einfluss von neuen Bautechnologien, Fertigungsmaschinen und Materialentwicklungen auf die Disziplin der Architektur dar? Wie wird die Berufsausübung des Architekten dadurch beeinflusst?
- Können innovative bautechnische Entwicklungen das Verhältnis des Entwerfers zu den Prozessen des Entwurfs oder der Fabrikation verändern oder beeinflussen?
- Wie verändert der robotische Einsatz etablierte Berufspraktiken?
- In welchem Ausmaß ist das Auseinandersetzen des Architekten mit Aspekten des Maschinenbaus vorteilhaft?
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen Entwurf, Fabrikation, Material und Maschine bzw. Roboter?
- Welche Parallelitäten gibt es zwischen dem Handwerk und der maschinellen Fertigung? Sind die Konzepte der Handwerklichkeit und des Roboters miteinander vereinbar?
- Kann aus der Auseinandersetzung des Architekten mit den Aspekten der Maschinenentwicklung eine neue Art von Handwerklichkeit aktiviert werden, so dass die Trennung von Entwerfen und Fertigen überwunden wird?
- Welches Verhältnisgefüge besteht zwischen der Maschinenentwicklung und den Prozessen des Entwurfs und der Fabrikation?
- Welches Potenzial für die Disziplin und für den Architekten geht vom eigenen Gebrauch und der Steuerung von Robotern aus?
- Wie kann die Robotertechnik sinnvoll im Kontext der Architektur implementiert und adaptiert werden?

### 3. Aufbau und Methodik

Um diesen formulierten Fragen nachgehen zu können wird eine doppelte Forschungsstrategie verfolgt. In einer ersten Phase beläuft sich die Argumentation auf einer theoretischen Ebene. Hier wird der historische Hintergrund des Architekten als Erfinder und Benutzer von Maschinen analysiert. Grundsätzlich wird dabei zwischen zwei operationalen Vorgehensweisen bzw. Modellen unterschieden. Die Arbeitsmodelle des Baumeisters und des Architekten werden eingeführt und erläutert. Dabei wird überwiegend auf die Rolle der Maschinenentwicklung und der Befassung mit dem Handwerk im Rahmen der Berufsausübung des Architekten eingegangen. Es folgt eine Auseinandersetzung mit dem Zeitalter der Industrialisierung. Als eine Epoche die massgeblich von der Erfindung und Weiterentwicklung von Maschinen geprägt ist und die eine starke Wirkung auf den Bereich der Fabrikation hatte, eignet sich dieser historische Kontext ideal zur Veranschaulichung des Einflusses, der von der Maschinenentwicklung auf die Disziplin der Architektur ausgehen kann. Im weiteren Verlauf wird der Hauptfokus ausschließlich auf das Feld der Robotik, Industrieroboter und Robotersysteme gelegt. Die Automatisierung des Bauwesens und die Rolle des Roboters im Bauwesen werden betrachtet. Ansätze zur Theoretisierung dieser Abläufe, wie auch experimentelle Forschungsprojekte, werden vorgelegt und analysiert.

Im Vorfeld zu diesen Untersuchungen wird ein klarer Rahmen der Terminologie aufgestellt. Die Arbeit befasst sich zunächst mit der Klarstellung einer geeigneten Begrifflichkeit bezüglich der Termini Maschine und Handwerk. Darauf beruhend werden die Qualitäten und Eigenheiten der sowohl handwerklichen als auch maschinellen Arbeits- und Vorgehensweisen vorgestellt. Dies dient zur Erstellung eines Gefüges für die Erläuterung des neu eingeführten Konzepts der Maschinenhandwerklichkeit bzw. der Machinecraft.

Im Anschluss daran folgt der Übergang von der theoretisch-abstrakten Ebene, mit geschichtlicher Hinterlegung, zu einer empirischen Ebene. Um das theoretische Konstrukt zu unterstützen wird eine Fallstudie präsentiert. Die im ersten Teil aufgestellten Annahmen werden anhand einer vom Autor, in Zusammenarbeit mit einer Forschungsgruppe, durchgeführte Forschungsstudie verifiziert und untersucht.

Die Fallstudie *Minibuilders* stellt ein experimentelles Robotikprojekt dar, bei welchem ein funktionales dreiteiliges Robotersystem für den Baustelleneinsatz entwickelt wurde. Das zugrundeliegende Fabrikationsprinzip ist das der additiven Fertigung. Der Wissenstransfer von der theoretischen Recherche zu einer angewandten Fallstudie erfüllt eine Überprüfungsfunktion zum Validieren der gewonnenen Erkenntnisse. Abschliessend werden im letzten Teil der Dissertation die erreichten Schlussfolgerungen und Implikationen ausgelegt und zusammengefasst.

Somit weist diese wissenschaftliche Arbeit eine dreiteilige Struktur auf: die Klärung des historischen Kontexts bezüglich des Einbindens der Maschine in die operationalen Strukturen der beruflichen Tätigkeit von Architekten bzw. Baumeistern, die kontemporäre Thematik der Robotik im Kontext der Architektur und die angewandte Fallstudie *Minibuilders*. Im Zentrum der Analyse befinden sich folgende

weitere Untersuchungsfaktoren wie Material, Informationsstrukturen und operationale Logiken. Diese werden als unterstützende Teilsysteme und wichtige Parameter zum Definieren der These der Maschinenhandwerklichkeit interpretiert.

#### 4. Stand der Forschung

Das Thema der Maschine in Verbindung gesetzt mit der Fabrikation wurde in der Architektur vermehrt behandelt und wurde oft in den theoretischen Diskurs oder den angewandten baulichen Ansätzen verschiedener Architekten einbezogen. Je nach Architekt und seiner theoretischen Gesinnung wurde dieses Motiv unterschiedlich thematisiert. Le Corbusier hat das Sinnbild der Maschine auf das Wohnen übertragen und den Begriff der Wohnmaschine eingeführt,<sup>7</sup> während Walter Gropius, in seiner Position als Gründer und Leiter des Bauhaus Kunstschule in Weimar, bemüht war eine Lösung für die Symbiose zwischen industrieller Fertigung und handwerklichem Arbeiten zu generieren. Durch das Auftreten der Computer gesteuerten Fertigung und der damit verbundenen neuen Generation von Maschinen, die über rechnergestützte numerische Steuerung kontrolliert werden, dient die Maschine nicht mehr als metaphorisches Vorbild für Gebäude, wie es bei den Vertretern der Moderne der Fall war, sondern übernimmt graduell die Rolle eines aktiven Entwurfsparameters.<sup>8</sup>

Im Gegensatz dazu stellt die Thematisierung der Rolle des Architekten als Erfinder von Maschinen oder als Beteiligter an dem Prozess ihrer Entwicklung in der Architektur eine vernachlässigte Thematik dar. Dem Mehrwert, der sich aus dieser Neupositionierung des Entwerfers ergeben kann, wurde unzureichend Beachtung geschenkt. Im Zuge der voranschreitenden Automatisierung des Bauwesens wurde die Thematik der Maschine im Kontext des Vorfabrikation und der seriellen Produktion untersucht. Einer der wichtigsten Architekten und Theoretiker, die Bezug auf die Thematik der Industrialisierung des Bauwesens nehmen, ist Konrad Wachsmann. Der gelehrte Tischler und Architekt beleuchtet in seinem Hauptwerk „*Wendepunkt im Bauen*“, das sich als eine Art Manifest für das industrialisierte Bauwesen lesen lässt, die Implikation, die sich aus der Verlagerung der Fabrikation und Konstruktion von der Baustelle in die Fabrik ergeben.<sup>9</sup> Wachsmann interpretiert in seinem 1959 erschienenen Werk die maschinelle Produktion als einen effizienteren Ersatz für die handwerkliche Art des Bauens. Seit dem Erscheinen von Wachsmanns Manifesto hat die Technologieentwicklung jedoch rasante Sprünge erfahren. Der Schritt von der seriellen Massenproduktion zur individualisierten Massenfertigung wurde durch digitale Produktionssysteme befähigt. In Bezug auf die Architektur lassen sich neue Instrumente der Fabrikation identifizieren. Im Angesicht des Siegeszugs des Industrieroboters in der Architektur erscheint es als notwendig, die Rolle und den

<sup>7</sup> Vgl. Huse, N.: „Le Corbusier“, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg, 2002, S. 34 ff.

<sup>8</sup> Vgl. Denari, N.: „Precise Form for an Imprecise World“, S. 31 In: Marble, S. (Hrsg.): „Digital Workflows in Architecture. Designing Design - Designing Assembly - Designing Industry“, Birkhäuser, Basel, 2012.

<sup>9</sup> Wachsmann, K.: „Wendepunkt im Bauen“, Krauskopf Verlag, Wiesbaden, 1959, S. 118 ff.

Einfluss, die von, vom Architekten direkt steuerbaren und programmierbaren, Maschinen ausgehen, im Bauwesen näher zu beleuchten. Es geht darum, das Potenzial solcher Maschinen für das Bauwesen begreiflich zu machen.

Eine detaillierte Auseinandersetzung auf einer theoretischen Ebene im Zusammenhang mit dem robotischen Einsatz im Bereich der Architektur liefern bislang allein die Wissenschaftler und Professoren Gramazio und Kohler vom Fachbereich Architektur und Digitale Fabrikation der ETH Zürich. In einer umfassende Sammlung von Schriften wird die Komplexität des Themas der Robotik bzw. des Industrieroboters differenziert beleuchtet und behandelt. Dafür werden konkrete Fallbeispiele herangezogen, um das Evidenzieren der vom robotischen Gebrauch ausgehenden Implikationen zu ermöglichen. Dabei werden eine profunde Theoretisierung und eine Verankerung in den aktuellen Architekturdiskurs verfolgt. Darüber hinaus existieren eine Reihe von wissenschaftlichen Artikeln, oder Bände gesammelter Konferenzbeiträge, die sich der Thematik der Architekturrobotik annehmen. In diesen Fällen werden allerdings nur Teilaspekte untersucht. Die zweijährlich stattfindenden Konferenzreihen „*Robotic Fabrication in Architecture, Art, Design*“, „*Advances in Architectural Geometry*“ oder „*Fabricate*“ und die dazugehörigen Buchpublikationen widmen sich der Thematik des Roboters, überwiegend des Industrieroboters, und dessen Vorhandenseins in der Architektur. Diese Beiträge bewegen sich jedoch auf einem eher rein deskriptiven Niveau, wobei die technischen Rahmenbedingungen experimenteller Vorhaben beschrieben werden. Eine Verankerung in der Architekturtheorie fehlt meistens oder wird nur ansatzweise angedeutet. Die Kontextualisierung in dem Diskurs der Architekturgeschichte wird nur unzureichend beleuchtet. Diese vorläufige Fehlen einer verbreiteteren Thematisierung lässt sich dadurch begründen, dass die Implementierung des Industrieroboter in die Architekturpraxis ein neues Phänomen darstellt, welches zukünftig eine stärkere Theoretisierung erfahren wird.

Die vorliegende Arbeit unterscheidet sich, in der Art der Thematisierung der Beziehung zwischen Maschine und Architekt, von den vorgestellten Standpunkten. Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt auf dem Potenzial des Roboters als ein nichtspezifisches Instrument der Fabrikation und die Implikationen, die sich daraus ergeben, wenn der Architekt als Erfinder oder Weiterentwickler von Maschinen bzw. Robotersystemen agiert. Denn Maschinen werden in der allgemein gültigen Konzeption als sekundäre Hilfsmittel zur Fabrikation vom Architekten betrachtet, als etwas das eine vertiefte Auseinandersetzung erst ab der Phase der Fertigung benötigt. Fabrikationsmaschinen geben Bauteilparameter vor, wie beispielsweise die Vorgabe von absoluten Mindest- und Maximalwerten für Werkstoffabmessungen. Auf diese Angaben muss Bezug genommen werden, so dass die Baubarkeit sicher gestellt werden kann. Diese Position gilt es zu hinterfragen und eine Sensibilisierung der Entwerfer bezüglich des Potenzials, welches von dem Implementieren von Robotern in der Architektur und der Selbstbeteiligung des Architekten an der Maschinenentwicklung ausgehen kann, hervorzurufen. Um dieses neue Bewusstsein zu lancieren, werden die verursachten Änderungen auf der Ebene des Entwerfens und

der Fabrikation beleuchtet, mit einem speziellen Augenmerk auf die ausführende Rolle des Architekten und der Berufsausübung. Das Integrieren der operationalen Maschinenlogik in die anfänglichen Entwurfsprozesse wird untersucht, so dass die Prozesse der Fabrikation im Sinne des Entwurfs optimiert werden und somit eine Besserung und eine Nutzsteigerung der gesamtheitlichen Vorgänge erreicht wird. Des Weiteren wird die Thematik des Handwerks bzw. der handwerklichen Arbeitsweise untersucht, die aus einer verstärkten Beschäftigung mit dem Fertigungsprozess entspringen kann. Die Maschine wird nämlich im Rahmen der vorliegenden Arbeit als ein aktives Instrument der Fertigung, das dem Architekten zur Verfügung steht und welches dazu eingesetzt werden kann die Grenzen der Fabrikation dem spezifischen Entwurf anzupassen, verstanden. Es wird der Standpunkt vertreten, dass durch das Auftreten des Roboters, auch ein Instrument der Fabrikation, in der Baupraxis, der Architekt sich an der Maschinenentwicklung aktiv beteiligen kann. Daraus ergibt sich das Potenzial der Neupositionierung des Architekten innerhalb der Hierarchie der Bauprozesse und der damit einhergehende Ausbau seiner Aktivitätsfelder und Autorität. Die Idee wird verfolgt, dass das Modell des Baumeisters mittels der Digitalisierung von Entwurf und Fabrikation reaktiviert werden kann, wodurch die Idee vom digitalen Baumeister<sup>10</sup> eine neue Substanz erfährt.

---

<sup>10</sup> Vgl. Kolarevic, B.: „Information Master Builders“, S. 57 In: Kolarevic, B. (Hrsg.): „Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing“, Taylor and Francis, New York, 2009.

## II. Machinecraft

### 1. Der Maschinenbau und die Architektur

Der römische Gelehrte und Architekt Vitruv definiert Architektur als eine aus drei Teilen bestehende Disziplin:

*„Der Gattungen der Baukunst überhaupt - architectura ipsa - sind drey [sic!]; Die Baukunst insbesondere - aedificatio, - die Gnomonik und die Mechanik.“<sup>11</sup>*

Aus seiner umfassenden Werkreihe *„De Architectura libri decem“*, zu deutsch *„Zehn Bücher über Architektur“*, widmet Vitruv jeweils das neunte und zehnte Buch diesen beiden Themen. In diesem Kontext versteht er unter Mechanik den Bau von Maschinen. Somit werden der Uhren- und der Maschinenbau zu den wesentlichen Beschäftigungsfeldern des Architekten gezählt.<sup>12</sup> Der römische Architekt erkennt die Relevanz und Bedeutung der Maschine für die Ausübung der Architektur und sieht den Architekten zugleich als Maschinenbauer, als Erfinder und Entwickler von diesen Mechanismen. Dieses Verständnis des Architektenbildes wurde im Laufe der Jahrhunderte aufgegeben. Während es begreiflich ist, dass die Beschäftigung mit dem Bau von Sonnenuhren aus der Palette benötigter Grundkompetenzen des Entwerfers entfallen ist, so ist das Abwenden vom Maschinenbau nicht im gleichen Masse nachvollziehbar. Die rasanten Entwicklungen im Bereich der digitalen Fabrikation verleihen diesem Thema eine neue Aktualität. Die vorliegende Arbeit greift diesen bereits im 1. Jahrhundert v. Chr. formulierten Grundgedanken auf und nimmt sich vor daran anzuknüpfen. Eine Rückbesinnung auf diesen Gedanken wird vorgeschlagen, wobei der daraus zu schöpfende Nutzen und sich ergebende Implikationen untersucht werden. Es geht darum ein grundsätzliches Verständnis über die Maschine und den Maschinenbau zu entwickeln, so dass die Vorteile des Umgangs und der Manipulation der Maschine für den Entwurf maximiert werden können. Es besteht nicht der Anspruch, dass der heutige Architekt zu einem komplett ausgebildeten Maschinenbauer erzogen wird, sondern dass er über wichtige Grundkompetenzen und ein Basiswissen in diesem Bereich verfügt.

Die heutige reflexartige Ausgrenzung des Maschinenbaus von dem Betrachtungsfeld des Architekten ist tief in der Betrachtungsart der Disziplin verankert. Zur exemplarischen Anschauung lässt sich die von Heiner Knell durchgeführte Analyse von Vitruvs *„Zehn Bücher“* angeben. Bei seiner durchgeführten Analyse äußert sich Knell, *„dass Vitruv Uhrenbau und Maschinenbau zwar dem Aufgabenfeld des Architekten grundsätzlich zuweist, beides jedoch eher gleich einem Anhang seiner*

---

<sup>11</sup> Vitruv: „Baukunst“, Erster Band, Artemis Verlag für Architektur, Zürich und München, 1987, S. 30.

<sup>12</sup> Vgl. Knell, H.: „Vitruvs Architekturtheorie. Versuch einer Interpretation“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1985, S. 34 ff.

*Bücher insgesamt versteht*“.<sup>13</sup> Der Autor unterstellt dadurch beiden Gebieten ein gewisses Mass an Irrelevanz für das Ausüben der Architektur und sieht darin einen „begründeten Anlass, die letzten Bücher in dem hier abgesteckten Rahmen auszuklammern“.<sup>14</sup> Die substantielle Beziehung zwischen Architektur und den Mitteln ihrer Realisierung, wozu Werkzeuge und Maschinen zählen, wird nicht verinnerlicht. Diese Art der Betrachtungsweise und das fast willkürlich wirkende Ausschließen des Maschinenbaus, obwohl ausdrücklich von Vitruv als eines von drei Bestandteilen der Architektur aufgezählt, führt zu einer Entfremdung der Architektur von ihrer konstruktiven Ausrichtung. Eine Vernachlässigung dieses Aspekts hat ein oberflächliches Verständnis der entscheidenden Konditionierung der Architektur durch das Beherrschen der Mittel der Fabrikation zur Folge. Die Relation Entwerfer - Entwurf - Fertigung - Mittel der Fertigung wird unterschätzt und nur einseitig betrachtet, wobei der Maschine und ihrem potentiellen entwurfsbedingenden Einfluss eine zweitrangige, nicht erwähnenswerte Rolle zugesprochen wird.

## 2. Der Kontext der Digitalisierung

Die verstärkte Präsenz von Robotern, seien es Industrieroboter oder eigens vom Architekten entwickelte Robotersysteme, lässt sich nur im Kontext der heutigen digitalen Kultur erklären und gleichzeitig auch darauf zurückführen. Die wesentlichen geschichtlichen Entwicklungsphasen, die zu der gegenwärtigen Situation einer omnipräsenten Digitalisierung geführt haben und die Voraussetzungen, die erfüllt werden mussten, damit diese Kultur sich entfalten kann, werden vom Theoretiker Antoine Picon überschaubar resümiert. Die Industrialisierung, mit ihren zwei Phasen der ersten und zweiten industriellen Revolution, verursachte mittels der generierten technisch-wissenschaftlichen Errungenschaften einen profunden wirtschaftlichen Wandel, der zeitgleich im selben Ausmaß soziale Alternanzen kausierte: die wirtschaftliche Komplexität korrelierte mit einer wachsenden Komplexität der Gesellschaft, was wiederum einen wachsenden Informationsbedarf sowohl auf Seiten der Industrie als auch auf Seiten der Gesellschaft verursacht.<sup>15</sup> Dieser argumentativen Struktur folgend hat der Bedarf an Information die Entfaltung des Digitalen favorisiert, so dass „das Auftreten einer informationsbasierten Gesellschaft die Basis der folgenden Computerentwicklungen gebildet hat“.<sup>16</sup> Die digitale Umgebung und der Computer haben sich somit als unanfechtbare Medien für Informationskreisläufe und -zirkulation etabliert. Man nimmt an, dass die Fortschritte auf dem Gebiet der Mathematik und dadurch auch auf dem Gebiet der Kybernetik und Informatik einen

---

<sup>13</sup> Knell, H.: „Vitruvs Architekturtheorie. Versuch einer Interpretation“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1985, S. 35.

<sup>14</sup> Ebd., S. 36.

<sup>15</sup> Vgl. Picon, A.: „Digital Culture in Architecture. An Introduction for the Design Professions“, Birkhäuser Verlag, Basel, 2010, S.16-24.

<sup>16</sup> Ebd., S.19.

dermassen schwerwiegenden Einfluss auf die Entwurfsmethoden aus dem Fachgebiet der Architektur hatten, wie die zusammengerechneten Entwicklungen aus anderen disziplinären Bereichen mit denen die Architektur tangiert oder sich auseinandersetzt.<sup>17</sup>

Die Digitalisierung der Disziplin in den Bereichen des Entwerfens und der Produktion hat zu grundsätzlichen Veränderungen in der Art der Prozessgestaltung auf diesen beiden Ebenen geführt. Angefangen von den 1980er Jahren wurden in der Architektur, bedingt durch das Auftreten des Computers als wichtiges Instrument im Repertoire des Architekten, eine Serie wichtiger Forschungsprozesse angestoßen, welche sich mit dem angemessenen Implementieren des Digitalen in der Praxis beschäftigt haben.<sup>18</sup> Im Rahmen des Digital Turns wurde zunächst den neuen digitalen Mitteln der Formgenerierung sehr viel Beachtung gewidmet, da neue Softwareentwicklungen ein vereinfachtes Generieren komplexer Geometrien exponiert haben. Wie es schon der Name bildhaft suggeriert, findet die Bewegung des Digital Turns, zu deren wichtigsten Vertretern Greg Lynn, Frank Gehry oder Peter Eisenman aufgezählt werden können, ihren Ursprung in den Entwicklungen auf dem Gebiet der Kybernetik, der sich ausbreitenden Verfügbarkeit von Computern und dem Willen zur Implementierung dieser Fortschritte in den Korpus der Architektur.<sup>19</sup> Die Möglichkeiten der Kontrolle über nicht-lineare, komplexe Geometrien haben den Fokus überwiegend für sich beansprucht. Die digital gesteuerten Instrumente der Fabrikation wurden als Mittel zum Zweck betrachtet, die zwar die Baubarkeit der neuen Formen garantieren, aber trotzdem den Instrumenten der Formgebung und -generierung untergeordnet sind.

Die heutige vermehrte Auseinandersetzung von Architekten mit den digitalen Werkzeugen der Fabrikation lässt sich auch auf die neuen und unbegrenzten Möglichkeiten der geometrischen Formgenerierung zurückführen, denn entwickelt man Strukturen, die beispielweise auf nicht-euklidischen Geometrien basieren oder nicht abwickelbare Oberflächen beinhalten, müssen auch konstruktive Lösungen und Ansätze zur Fertigung solcher Strukturen geboten werden.<sup>20</sup> Die gestalterische Freiheit, die durch leistungsfähige Software gefördert wurde, redirektioniert den Architekten zur Konfrontation mit dem digitalen Bauen und Konstruieren. Eine wechselseitige und komplementäre Konditionierung ist gegeben: gestalterische Freiheit bezüglich der Formensprache verlangt nach einer angemessenen Freiheit des Fertigen und des Konstruierens.

---

<sup>17</sup> Vgl. Broadbent, G.: „Design in Architecture. Architecture and the Human Sciences“, David Fulton Publishers, London, 1988, S. 272.

<sup>18</sup> Vgl. Zardini, M.: „Archaeologist of the Digital-Some Fields“, S. 6 In: Lynn, G. (Hrsg.): „Archaeology of the Digital: Peter Eisenman, Frank Gehry, Chuck Hoberman, Shoji Yoh; [to accompany the Exhibition Archaeology of the Digital presented at the CCA from 7 May to 13 October 2013]“, Sternberg Press, Berlin, 2013.

<sup>19</sup> Vgl. Carpo, M.: „Twenty Years of Digital Design“, S.9 In: Carpo, M. (Hrsg.): „The Digital Turn in Architecture 1992-2012“, AD Reader, John Wiley & Sons Ltd Publications, Chichester, 2013.

<sup>20</sup> Vgl. Kolarevic, B.: „Information Master Builders“, S. 57 In: Kolarevic, B. (Hrsg.): „Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing“, Taylor and Francis, New York, 2009.

Die Digitalisierung im Bereich der Fabrikation hat neue Gelegenheiten geboten und andersartige Wege für den Entwerfer eröffnet. Das ineinandergreifende Geflecht des Digitalen auf zwei Ebenen, von CAD, Computer Aided Design bzw. dem rechnerunterstützten Entwerfen und CAM, Computer Aided Manufacturing bzw. der rechnerunterstützten Fertigung hat als Katalysator dieser Vorgänge gewirkt. Das Auftreten von CNC-Maschinen, Computerized Numerical Control bzw. rechnergestützt numerisch gesteuerte Geräte, und ihre rasante Verbreitung haben das direkte Einbinden des Architekten in die Prozesskette der Fertigung ermöglicht. Das hieraus entstehende Potenzial für das Bauwesen wurde im Verlauf des Architekturdiskurses vermehrt intuiert und unterschiedlich interpretiert. So erkennt der Theoretiker Chris Abel in dem Summieren von CAD und CAM das Entstehen einer neuen Art von Handwerkskunst oder handwerklichem Arbeiten.<sup>21</sup> Die Revitalisierung handwerklicher Arbeitsweisen durch das Digitale präsentiert sich zunächst als ein paradox erscheinendes Phänomen, da beide Elemente als widersprechende Konzepte gedeutet werden können. Die These eines digitalen Handwerks ist somit nicht neu und erfährt Zuspruch im Rahmen theoretischer Abhandlungen.

### 3. Das Konzept der Machinecraft

Die Digitalisierung bietet darüber hinaus ein weiteres, bislang ungenügend thematisiertes Potenzial. Dieses besteht in der Möglichkeit des direkten Eingreifens in die Aspekte der technischen Ausbildung der Maschine, im Sinne der Entwicklung und Konstruktion von Maschinen. Das Auftreten der Phänomene der Open Source Software, also der öffentlichen Zurverfügungstellung von Software ohne eine Bindung an Lizenzen, die Verbreitung des Programmierens, die wachsende Zugänglichkeit technischer Systeme, die Verbreitung von Plattformen für Soft- und Hardware wie Arduino®, die vereinfachte Formen von Microcontrollern zur Verfügung stellen, und die Entwicklung neuer plattformunabhängiger und vereinfachter Programmiersprachen wie Processing® begünstigen und ermöglichen diese Schritte auch für anfänglich nicht initiierte oder versierte Personen auf den Fachgebieten der Informatik und des Maschinenbaus. Dadurch eröffnet sich der Fachbereich der Maschinenentwicklung auch für Entwerfer, so dass die Entwicklung eigener Maschinen oder ihre Abänderung greifbar gemacht wird. Diese Entwicklungen im Bereich der Technik liefern den Kontext für das Aufstellen des neuen Konzepts der Machinecraft oder Maschinenhandwerklichkeit. War es bis vor Kurzem ausgeschlossen als Architekt in den Aufbau komplexer Maschinen, wie Mehrachsfräsen, Lasercutter oder Roboter einzugreifen, werden solche Vorhaben durch die fortschreitende Digitalisierung und der Open Source Bewegung möglich gemacht. Die Bewertung Greg Lynns dass *„Architekten wie Hoberman, Yoh, Eisenman und Gehry sich dem digitalen Medium mit Tiefenblick und Intelligenz annähern, indem das Digitale nicht nur als Werkzeug behandelt wird sondern als*

---

<sup>21</sup> Abel, C.: „Architecture and Identity. Responses to cultural and technological change“, Architectural Press, Oxford, 2000, S. 43.

*neues kreatives Medium, das integraler Bestandteil und Erweiterung ihres Entwurfsprozess ist*<sup>22</sup>, kann somit den Status einer allgemeinen Gültigkeit erreichen.

In Übereinstimmung mit der von Chris Abel ausgedrückten Meinung, dass *„die unsichtbaren Systeme der elektronischen Kommunikation und Produktion, diejenigen sind die die Art und Weise wie Architektur konzipiert und geschaffen wird revolutionieren“*<sup>23</sup> und dass diese *„die Rolle der Architekten selber herausfordern, indem sie den zukünftigen Kurs des Bauens vorgeben“*<sup>24</sup>, verfolgt die vorliegende Arbeit die Absicht die Rolle digital steuerbarer und manipulierbarer Maschinen, wie es Industrieroboter sind, zu beschreiben. Das Auseinandersetzen mit Aspekten des Maschinenbaus und die Beteiligung an dem Bauen von eigens entworfenen Robotersystemen hat das Potenzial eine neue Art der Handwerklichkeit für den Architekten zu generieren. Aus dieser Erweiterung des Aufgabenfeldes des Architekten oder des Entwerfers folgt eine Steigerung der Fabrikationsmöglichkeiten. Dehnt sich die Bandbreite dieser aus, übt dies einen Einfluss auf die Entwurfsmöglichkeiten aus, die dem Entwerfer zur Verfügung stehenden. Durch ihre flexible, neu programmierbare Natur bieten sich Roboter und Robotersysteme dazu an die Limitierungen anderer Fabrikationsmaschinen zu umgehen, indem der Architekt mittels des Programmierens, also der Entwicklung angepasster Codes, eigene, spezifische Fabrikationsinstruktionen generieren kann. Fabrikationsprozesse können in dieser Weise nach den spezifischen Anforderungen des Entwurfs ausgelegt werden, so dass gegebene technische Eingrenzungen umgangen werden können. Diese Entwicklungen kontrastieren sehr stark mit der gängigen Praxis der Automatisierung der Bauindustrie, als der Einfluss des Architekten auf die Fertigungsprozesse meistens derart limitiert war, dass er sich auf das Auswählen von Baukomponenten aus Bautabellen oder -katalogen besinnen musste.<sup>25</sup> Die Befreiung aus diesem Zustand bieten, wie zuvor argumentiert, computer-basierte Produktionssysteme.

Um die Wichtigkeit und die Relevanz der Maschine, einschließlich des Roboters, für die Gesamtheit aller Entwurfs- und Fabrikationsprozesse in der Architekturdiziplin zu beschreiben und zu definieren, führt der Autor das theoretische Konzept der Machinecraft, zu deutsch Maschinenhandwerklichkeit, ein. Dieser Begriff der Machinecraft beruht auf einer Nebeneinanderstellung zweier zunächst sich gegenseitig ausschließender Begriffe: die Maschine und die Handwerklichkeit. Um diese Konzept sinnvoll zu theoretisieren, bedarf es zunächst einer Auseinandersetzung mit den Begriffen des Handwerks und der Maschine. Beide Begriffe sind aus

---

<sup>22</sup> Vgl. Lynn, G.: „The End of “In the Future”“, S. 12 In: Lynn, G. (Hrsg.): „Archaeology of the Digital: Peter Eisenman, Frank Gehry, Chuck Hoberman, Shoji Yoh; [to accompany the Exhibition Archaeology of the Digital presented at the CCA from 7 May to 13 October 2013]“, Sternberg Press, Berlin, 2013.

<sup>23</sup> Abel, C.: „Architecture and Identity. Responses to cultural and technological change“, Architectural Press, Oxford, 2000, S. 48.

<sup>24</sup> Ebd., S. 48.

<sup>25</sup> Ebd., S. 39.

anthropologischer und philosophischer Sicht vorbelastet und gehören zu den Hauptthemen einer langen Reihe theoretischer Diskurse. In der folgenden Argumentation werden die, zur weiteren Theoretisierung des Konzepts der Machinecraft notwendigen, Facetten und Merkmale von Handwerk und Maschine präsentiert. Die Betrachtungen erfolgen aus einer architektonischen Perspektive und beziehen sich auf die Baukunst, die eher als Baupraxis anstelle einer Ästhetik verstanden wird. Daher werden Aspekte der Formästhetik und des Stils aus dem Diskurs weitgehend ausgeschlossen.

## 4. Handwerk

### Allgemeine Begriffsdefinition und Kontextualisierung

Handwerk, Handwerklichkeit, Handwerkskunst oder Kunsthandwerk sind eine Reihe von verwandten Begriffen, deren Definitionen stark von der „*historischen, technischen oder sozialpolitischen Perspektive*“<sup>26</sup> der Betrachtung variieren. Abhängend von dem Diskussionskontext können diese Begriffe unterschiedlich gedeutet werden. Sowohl aus kunsthistorischer als auch aus legaler Sicht betrachtet, lässt sich das Handwerk in verschiedene Kategorien unterteilen.

Um ein besseres Verständnis des Begriffs Handwerk und des dahinterstehenden Konzepts zu ermöglichen, ist es sinnvoll sich auf den linguistischen Ursprung des Wortes zu berufen. Hierfür benötigt es einer Rückbesinnung auf die Art und Weise wie Handwerk im alten Griechenland verstanden wurde, wo der Begriff *techné* sowohl Kunst als auch Handwerk beschrieb, so dass für die Beschreibung eines Handwerkers und Künstlers derselbe Terminus *technites* benutzt wurde.<sup>27</sup> In dem heutigen Sprachgebrauch differenzieren wir ganz genau zwischen diesen beiden Berufsständen, wobei ein einvernehmlicher, unterbewusster Konsens besteht, wenn es darum geht welcher von beiden Begriffen zur Beschreibung eines Schreiners oder eines Bildhauers eingesetzt werden sollte. Situationen, in denen eine Unklarheit betreffend der Angemessenheit des Benutzens des einen oder anderen Begriffs besteht, sind eher selten und stellen somit Ausnahmen dar. Das Delimitieren der Berufsstände findet intuitiv statt, basierend auf vorherrschenden Stereotypen. Das altgriechische Verständnis bezüglich der Definition von *techné* weist aber einen hohen Grad an Feingefühl für die Komplexität handwerklichen oder künstlerischen Arbeitens auf:

*„Statt dessen bezieht sich das griechische Wort techne auf eine Art Wissen. Es umfasst Methode und Folgerichtigkeit und steht für die in Praxis umgesetzte logische*

---

<sup>26</sup> Müller, K, Söndermann, M. und Marktworth, S.: „Das Handwerk in der Kultur- und Kreativwirtschaft“, Göttinger Handwerkswirtschaftliche Studien, Band 84, Verlag Mecke Druck, Duderstadt, 2011, S. 4.

<sup>27</sup> Vgl. Porphyrios, D.: „Klassisches Bauen“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1993, S. 29.

*Intelligenz des Menschen. Techne ist eine geordnete Anwendung von Wissen, die ein spezifisches Produkt hervorbringen oder ein vorbestimmtes Ziel erreichen soll.*<sup>28</sup>

Im Kontext des alten Griechenlands beruhen Handwerk und Kunst auf einem Konstrukt aus angereichertem Wissen, Methodik, logischer Intelligenz und spezifischer Zielorientierung. Das Ausführen von Handwerk wird nicht als eine automatische Handlungsabfolge mit repetitivem Charakter verstanden, sondern beschreibt eine Aktion mit fast wissenschaftlichem und künstlerischen Charakter. Diese Aktion beruht auf menschlicher Geschicklichkeit, angeeignetem Antizipieren oder Intuieren. Bezüglich der handwerklichen Bearbeitung oder präziser formuliert der handwerklichen Prozessgestaltung werden im Zusammenhang der vorliegenden Arbeit folgende zwei Definitionen unterstützend herangezogen, um eine treffend kontextualisierte Begriffsdeutung zu untermauern. Das Deutsche Handwerksinstitut liefert in der Studie „*Das Handwerk in der Kultur- und Kreativwirtschaft*“ folgende Begriffserklärung:

*„Bei der Funktionaldefinition handelt es sich um eine Sammlung von konstitutiven Merkmalen, die das Handwerk in seinen facettenreichen Ausprägungen auf idealtypische und pragmatische Art und Weise beschreiben. [...] Auch die Einzelanfertigung oder Herstellung von individuellen Serien, die individuelle Konzeption, Konstruktion oder Anpassung eines umzusetzenden Endprodukts, ein hoher Anteil der Handarbeit oder die Reparatur, Aufarbeitung oder Instandsetzung historischer Objekte sind in diesem Zusammenhang als idealtypische Eigenschaften des Handwerks zu sehen.“*<sup>29</sup>

Bei dieser Definition werden die Qualitäten, die mit der handwerklichen Bearbeitung in Zusammenhang gebracht werden, vordergründig präsentiert. Die Individualisierung, das Spezifische, welches sich aus dem Manuellen ergibt und die Limitierung der erhältlichen Einheiten werden als typische Merkmale des handwerklichen Arbeitens aufgezählt. Die spezifischen Qualitäten eines handwerklich geschaffenen Objekts also die gewollte Abweichung von der Norm im Sinne des individualisierten Serienprodukts und die resultierende gestalterische Einmaligkeit, die sie von anderen Objekten auszeichnet, können als wichtige Merkmale festgehalten werden. Während zuvor auf die Qualitäten handwerklich erzeugter Gebilde hingedeutet wurde, wird in einer weiteren Publikation des Deutschen Handwerksinstituts auf den Aspekt der manuellen Bearbeitung eingegangen. Die Relation zum Werkzeug wird wie folgt erklärt:

*„Die technische Sichtweise geht zunächst von der Werkerstellung durch Handarbeit aus. Das Hand-Werk bedient sich demzufolge der manuellen Fertigungsmethode, durch die schöpferischen Ideen des Menschen in Produkten Ausdruck verliehen wird.*

---

<sup>28</sup> Porphyrios, D.: „Klassisches Bauen“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1993, S. 29.

<sup>29</sup> Müller, K, Söndermann, M. und Marktworth, S.: „Das Handwerk in der Kultur- und Kreativwirtschaft“, Göttinger Handwerkswirtschaftliche Studien, Band 84, Verlag Mecke Druck, Duderstadt, 2011, S. 4.

*Das Maschinen-Werk ist im Gegensatz dazu eine Fertigungsmethode, die von Maschinen mehr oder weniger geprägt ist. Zwar ist das Wort „Handwerk“ auf eine solche Produktionstechnik zurückzuführen, doch kann der Handwerksbegriff heute nicht mehr allein durch die Betonung seiner „handwerk“-lichen Eigenschaften definiert werden. Die handwerkliche Arbeit hat sich im Laufe der Zeit, zum Beispiel durch neue oder verbesserte technische Werkzeuge, stark verändert.“<sup>30</sup>*

Dieser Erklärungsansatz setzt sich mit der Beziehung von Hand und Werkzeug auseinander. Es wird darauf hingewiesen, dass in seiner ursprünglichen Bedeutung das Wort „Handwerk“ sich sehr stark auf das Manuelle bezogen hat, jedoch haben die zeitlichen Rahmenbedingungen auch Auswirkungen auf die Auswahl der, dem Handwerker zur Verfügung stehenden, Werkzeuge. Etwas handwerklich zu erzeugen kann auch nur auf rein manueller Arbeit basieren ohne die Zuhilfenahme von Arbeitsgeräten. Überwiegend bedient sich der Handwerker aber doch eines oder mehrerer Werkzeug, um seinem Handwerk nachzugehen. Das Benutzen von Werkzeugen ist somit integrierter Bestandteil des handwerklichen Arbeitens. Die Ausprägungsart des Werkzeugs, das Aufkommen neuer Werkzeugsarten wirkt sich auf die Art des Ausübens des Handwerks aus. Der Einfluss der Arbeitsgeräte auf das Handwerk ist nicht bestreitbar. Handwerk, das handwerkliche Arbeiten, beruht dementsprechend auf dem Zusammenspiel des Manuellen und des manuell geführten Werkzeugs. Hand und Werkzeug bearbeiten das zur Verfügung stehende Material, woraus sich weitere Synergien ergeben. Im Zusammenhang der Baukultur werden diese resultierenden Folgerungen wie folgt umrissen:

*„Im Architekturmarkt übernehmen Handwerksunternehmen nicht nur die Umsetzung der vorgegebenen Planung von Architekten. Gemeinsam mit den anderen Planbeteiligten entwickeln sie auf Grundlage ihrer speziellen Kenntnisse um Materialien und Herstellungsmethoden neue Baustoffe, Bauteile und Bautechniken und finden kreative Lösungen und praktische Ansätze für verschiedene Probleme und innovative Umsetzungskonzepte.“<sup>31</sup>*

Der Blick wird auf den Mehrwert, der sich aus der Zusammenarbeit mit dem Handwerk ergeben kann, geleitet. Handwerker sind nicht als untergeordnete Ausführungskräfte zu interpretieren, die Teil einer Rollenverteilung sind, die wiederum ihrerseits auf einer starren Berufshierarchie basiert. Das von ihnen angesammelte Fachwissen bietet sich als wertvolle Ressource in der Erstellung neuer Baumethoden an. Aus der andauernden und intensiven Auseinandersetzung mit Werkzeug und Material ergibt sich ein profundes Wissen über Materialverhalten, Materialausprägung, Bearbeitungsarten und Fertigungsmethoden. Um die Dimension

---

<sup>30</sup> Glasl, M., Maiwald, B., Wolf, M.: „Handwerk - Bedeutung, Definition, Abgrenzung“, Deutsches Handwerksinstitut, 2008, S. 7, Weblink: [http://www.lfi-muenchen.de/lfi/moe/cms/main/ASSETS/bwl\\_pdfs/LFI\\_bwl\\_Definition\\_Handwerk.pdf](http://www.lfi-muenchen.de/lfi/moe/cms/main/ASSETS/bwl_pdfs/LFI_bwl_Definition_Handwerk.pdf).

<sup>31</sup> Müller, K., Söndermann, M. und Marktworth, S.: „Das Handwerk in der Kultur- und Kreativwirtschaft“, Göttinger Handwerkswirtschaftliche Studien, Band 84, Verlag Mecke Druck, Duderstadt, 2011, S. 32.

der angesprochenen Arbeitsintensität begreifbar zu machen, erklärt der Soziologe Richard Sennett, dass es ein generelles Einverständnis gibt, demzufolge ungefähr zehntausend Arbeitsstunden notwendig sind bis zum Erlangen des Schreinermeisters.<sup>32</sup> Dieses akkumulierte Wissen beruht auf Erfahrungswerten, welche ein informiertes Antizipieren zulassen. Ähnlich sieht auch Howard Risatti handwerklich erzeugte Objekte als Resultat des „*Zusammenkommens von Technik, Material und Hand*“.<sup>33</sup> Dieser Leitidee folgend definiert der britische Architekturtheoretiker Chris Abel „*die wahre Handwerkskunst als das Resultat der Kombination von künstlerischer Intelligenz und technischer Dexterität*“.<sup>34</sup> Die Doppeldeutigkeit des Ausdrucks der künstlerischen Intelligenz lässt sich als eine Synthese von künstlerischer Tätigkeit und wissenschaftlichem Vorgehen interpretieren. Diese Art der Definition entspricht dem zuvor erklärten griechischen Konzept der *techné*. Intelligenz beschreibt die Fähigkeit des Korrelierens vom abstrakten, logischen Denken und Agieren. Somit gleicht das handwerkliche Arbeiten dem Vermögen während des Ausübens einer künstlerischen Tätigkeit auf Eigenheiten des Materials bzw. der Materialisierungsprozesse zu reagieren und sich dabei angeeigneter technischer Fertigkeiten zu bedienen, die einer gewissen Art von spezifischer Intuition gleichen.

### Handwerk als Ausgangspunkt für die Architektur

Die Aneignung und das Beherrschen des Handwerks und des handwerklichen Arbeitens stellen nicht nur Anforderungen für die, an der Ausführung der Architektur beteiligten, Handwerksgruppen dar. Beleuchtet man allein die Wortherkunft des Begriffs Architektur und Architekt, wird die handwerkliche Natur der Architektur klar umrissen. Das Wort Architekt, welches aus dem Griechischen stammt, setzt sich aus dem Wort *arché*, das Ursprung oder Grundlage bedeutet und dem Wort *techné*, das sich mit Kunst oder Handwerk übersetzen lässt. Somit liesse sich die Bedeutung des Begriffs Architektur wörtlich mit „Erster Kunst“ oder „Erstem Handwerk“ übersetzen. Die Berufsbezeichnung Architekt, die zum ersten Mal beim dem antiken griechischen Gelehrten Herodot auftaucht, setzt sich aus den Worten *archi* und *tektion* zusammen, welche den Begriffen Oberleitung, Herrschaft und Zimmermann, später Handwerker, entsprechen.<sup>35</sup> Während mit dem Wort *tektion* in erster Linie ein Zimmermann gemeint war, wurde zur Beschreibung der Zimmermannsarbeit der Terminus *tektionike* benutzt, von dem sich der heutige Begriff der Tektonik ableitet.<sup>36</sup>

<sup>32</sup> Sennett, R.: „Handwerk“, Berlin Verlag, Berlin, 2008, S. 33.

<sup>33</sup> Risatti, H.: „A Theory of Craft. Function and Aesthetic Expression“, The University of North Carolina Press, 2007, S. 196.

<sup>34</sup> Abel, C.: „Architecture and Identity. Responses to cultural and technological change“, Architectural Press, Oxford, 2000, S. 43.

<sup>35</sup> Vgl. Binding, G.: „Meister der Baukunst. Geschichte des Architekten und Ingenieurberufes“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2004, S. 20.

<sup>36</sup> Vgl. Porphyrios, D.: „Klassisches Bauen“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1993, S. 37.

*Tektonike* vereint die Fertigkeit des Bauens, das benötigte Wissen des Zusammenlegens aber auch die unmittelbare Praxis per se, angeeignete Erfahrungswerte, die typisch für die Ausübung des Handwerks sind, heute aber nicht mehr unbedingt dem Berufsstandard für Architekten entsprechen:

*„Während Tektonik als die techne der Zimmerarbeit die besondere Geschicklichkeit und die Kenntnisse des Zimmermanns ausdrückt, stellt sie gleichzeitig die ontologische Erfahrung der Konstruktion dar.“<sup>37</sup>*

Aus der Verfolgung dieser etymologischen Entwicklung kristallisiert sich die intrinsische Verbindung zwischen Handwerk und Baukunst. Somit findet die Architektur ihren Ursprung im Handwerk, wobei daraus resultierend der Architekt als die Weiterentwicklung des Handwerkers verstanden werden kann. Diese abgeleiteten Erkenntnisse werden bereits im 1. Jahrhundert v. Chr. zur Kenntnis genommen und ausführlich zusammengefasst und theoretisiert. Bereits der römische Architekt Vitruv verweist in seinen *„Zehn Büchern über die Baukunst“* auf die wesentliche Rolle des Handwerks. Sein Werk der zehn Bücher gilt als erstes Architekturtraktat der Weltgeschichte und als ein grundlegendes Werk zur Theoretisierung und Abgrenzung der Disziplin. Vitruv definiert die Architektur als eine Wissenschaft bestehend aus zwei wesentlichen, in ihrer Wichtigkeit gleich gestellten Hauptteilen, *fabrica* und *ratiocinatio*:

*„Sie besteht aus der Ausübung - fabrica - und aus der Theorie - ratiocinatio. - Die Ausübung ist eine durch Nachdenken und stäte Übung erworbene mechanische Fertigkeit, aus jeder Art von Materialien ein Gebäude nach vorgelegtem Risse aufzuführen. Die Theorie aber ist die Geschicklichkeit, die, mit Kunst und nach den Grundsätzen des guten Verhältnisses - proportio - aufgeführten, Gebäude zu erläutern und zu erklären.“<sup>38</sup>*

Vitruv verweist somit auf die Dualität der Disziplin hin, die er als eine Wissenschaft versteht, bei der Theorie und Praxis eng miteinander verbunden sind und das Beherrschen beider stellt in seiner Anschauung eine Grundvoraussetzung für alle Vertreter der Architektur, welche er auch unter dem Namen des Baukünstlers zusammenfasst, dar.<sup>39</sup> Basierend auf der Etymologie des Handwerks, vertritt der Wissenschaftler und Architekt Demetri Porphyrios die Meinung, dass der theoretisierende Aspekt dem Handwerk bzw. der Kunst, je nachdem mit welchem Synonym man sich entschliesst *techné* zu übersetzen, von vornherein inneliegt:

---

<sup>37</sup> Porphyrios, D.: „Klassisches Bauen“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1993, S. 37.

<sup>38</sup> Vitruv: „Baukunst“, Erster Band, Artemis Verlag für Architektur, Zürich und München, 1987, S. 12.

<sup>39</sup> Ebd., S. 13.

*„Diese logische und von einer techne entfaltete Intelligenz bezieht die Möglichkeit ein, die Theorie ihrer Praxis zu formulieren, und eben diese Theorie stellt eine Wissensform dar, die sich zu ihrer charakteristischen Eigenschaft entwickelt.“<sup>40</sup>*

Anders als bei Vitruv wird hier bereits dem Handwerk selber, also gewissermaßen der *fabrica*, ein theoretisierendes Potenzial zugesprochen. Die zum Ausüben des Handwerks benötigte Intelligenz und Logik der ausführenden Person konditionieren das Potenzial zur Theoretisierung dieser Tätigkeiten. Architektur stellt eine Weiterentwicklung des Handwerks dar, ist in diesem verwurzelt und verlangt somit nach denselben Kompetenzen. Das Ignorieren des handwerklichen Aspekts der Architektur und das alleinige Fokussieren auf die intellektuelle und rein formalistische Komponente entspricht der Verneinung ihres Wesens und mündet in einem inkompletten und inkohärenten Verständnis der architektonischen Natur.

## 5. Die Maschine

### Begriffserklärung

Handwerklichkeit und maschinelle Fertigung werden oft als sich gegenseitig ausklammernde Konzepte betrachtet. Aufgrund ihrer unterschiedlichen operationalen Ansätze, folgen Handwerk und Maschine verschiedenen Vorgehenslogiken und stehen in unterschiedlichen Relationen zum Material. Des Weiteren ist es ebenfalls relevant die Rolle der Maschine in der Architektur zu beleuchten. Interessanterweise besteht, etymologisch betrachtet, bereits ein Zusammenhang zwischen beiden. Ab 1652 wurde das Wort Maschine in der deutschen Sprache nachweisbar benutzt und beschrieb damals ein „Werkzeug des Festungsbaus und der Belagerungskunst“.<sup>41</sup> Dem Sinn dieser Arbeit folgend, stand das Wort in seiner anfänglichen Benutzung in Relation mit der Architektur und wurde somit als ein Hilfsmittel der Baukunst verstanden. Zunächst ist es jedoch wichtig eine kontextualisierte Begriffserklärung des Wortes Maschine einzuführen. Der Duden liefert folgende Definition des Wortes:

*„mechanische, aus beweglichen Teilen bestehende Vorrichtung, die Kraft oder Energie überträgt und mit deren Hilfe bestimmte Arbeiten unter Einsparung menschlicher Arbeitskraft ausgeführt werden können.“<sup>42</sup>*

Die Rolle der Maschine als ein wichtiges Werkzeug für die Architektur wird bereits bei Vitruv veranschaulicht. Das Maschinenverständnis in der Antike beschreibt einen,

---

<sup>40</sup> Porphyrios, D.: „Klassisches Bauen“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1993, S. 29.

<sup>41</sup> Kluge, F.: „Etymologisches Wörterbuch der Deutschen Sprache“, 17. Auflage, Walter de Gruyter & Co., Berlin, 1957, S. 464.

<sup>42</sup> Duden Wörterbuch, <http://www.duden.de/node/673423/revisions/1362058/view> (Stand 05.11.2014).

für heutige Verhältnisse reduzierten, ausschließlich hölzernen Mechanismus, der überwiegend beim Lastentransport Verwendung fand:

*„Eine Maschine ist eine feste Verbindung von Holzwerk, insonderheit um schwere Lasten damit zu bewegen, welche auf eine künstliche Art vermittelt der Kreisbewegung, welche die Griechen nennen κυκλικήν κίνησιν, in Bewegung gesetzt wird.“<sup>43</sup>*

Wichtig ist festzuhalten, dass in seinem Werk Vitruv Maschinen ausschließlich auf den Lasten- und Wassertransport und die militärische Verteidigung eingrenzt. Es lässt sich mehr als ein Jahrhundert später bei dem Renaissancearchitekten Leon Battista Alberti ein ähnliches Begriffsverständnis der Maschine antreffen. Alberti versteht als Hauptfunktion dieser ebenfalls das Lastenheben und die Lastenplatzierung.<sup>44</sup> Bei der Aufzählung der verschiedenen Maschinentypen geht Vitruv äußerst systematisch vor, wobei folgende Kategorien angegeben werden: Zug- und Hebemaschinen, Maschinen zum Wassers schöpfen, Wassermühlen, das Wasserdruckwerk, die Wasserorgel, den Taxameter, Katapulte, Ballisten und Belagerungsmaschinen.<sup>45</sup> Maschinen werden von ihm nicht im Zusammenhang mit den Verfahren der Bauteilfertigung oder generell der Fabrikation in Verbindung gesetzt. Bezieht man sich heute auf die Thematik Maschine und Architektur so zählen zu den Einsatzbereichen von Maschinen zwar auch der Transport, überwiegend werden aber Fabrikationsverfahren mit dem Begriff assoziiert. Eine klare Verlagerung der Einsatzart der Maschine, im Verlauf der geschichtlichen Entwicklung der Baustelle, lässt sich erkennen: vom einem Mittel des Transports bis hin zum Mittel der Fabrikation. Die Bedeutung der Maschine, ihren Zusammenhang zu den Bauaktivitäten und die allgemeine Verflochtenheit derer mit dem Bauwesen illustriert Günther Binding, wenn er das Begriffsverständnis im Verlauf mehrerer Zeitspannen zusammenfasst:

*„Unter Maschine [...] wird in der Antike, im Mittelalter und in der Renaissance alles verstanden, was dem Menschen bei seiner Tätigkeit behilflich sein kann: dazu rechnen Stützkonstruktionen, Automaten, Lastenbeförderung und Bühnentechnik, ebenso wie Waffen, Kriegsmaschinen, Wasserwerke und die Architektur. Machinator ist der Maschinenbauer, Architekt, Baumeister (Livius: omnium architectus et machinator), abgeleitet von dem Verb machinari = ausdenken, schaffen, einrichten.“<sup>46</sup>*

---

<sup>43</sup> Vitruv: „Baukunst“, Zweiter Band, Artemis Verlag für Architektur, Zürich und München, 1987, S. 242.

<sup>44</sup> Vgl. Alberti, L.B.: „Die zehn Bücher der Architektur“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2005, S. 320.

<sup>45</sup> Vgl. Knell, H.: „Vitruvs Architekturtheorie. Versuch einer Interpretation“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1985, S. 35.

<sup>46</sup> Binding, G.: „Meister der Baukunst. Geschichte des Architekten und Ingenieurberufes“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2004, S. 20.

Der helfende, unterstützende Charakter bei der Ausführung von Aktionen unterschiedlichster Art wird zur Geltung gebracht. Von hoher Relevanz ist jedoch die darauf folgende Erläuterung welche Berufsgruppen mit dem Bau und Entwerfen von Maschinen assoziiert wurden, worunter sowohl der Architekt als auch der Baumeister gezählt werden. Dies illustriert die bereits in vorgehenden Epochen wahrgenommene Verknüpfung zwischen der Maschine und dem Bauwesen. In zweiter Instanz wird veranschaulicht, dass die Maschine eines der wichtigsten Instrumente des Bauens verkörpert, da diese massgeblich an der Umsetzung des Gedachten, des zunächst immateriellen Konstrukts, beiträgt. Diese Aussagen mögen zunächst offensichtlich erscheinen, jedoch führen sie zu der Feststellung, dass der Maschinenbau zu den Aufgabenbereichen der Baumeister oder Architekten gehörte. Dieser letzte Aspekt ging im Verlauf der fortschreitenden Berufsentwicklung verloren, so dass in jüngster Zeit zwischen Architekten oder Entwerfern keine Verbindung mehr zu der Maschinenentwicklung besteht. Eine Vernachlässigung der Bedeutung der aktiven Beteiligung des Architekten an der Maschinenentwicklung hat zu dem Herunterstufen der essentiellen Rolle der Maschine für die Architektur geführt. Die Maschine als vermittelndes Kettenglied im Prozess der Bauwerdung wurde fast völlig als ein mögliches Entwurfsparameter übersehen. Das Ignorieren der komplexen Beziehung zwischen Architekt und Maschine hat zur schrittweisen Verdrängung aus dem Bereich der Entwicklung maschinen-technischer Systeme beigetragen. Das theoretische Konzept der Machinecraft orientiert sich an dem Berufsmodell des Baumeisters. Machinecraft basiert auf dieser historischen Verankerung und stellt die Reinterpretation einer ignorierten Berufskomponente und Tätigkeit dar. Im Kontext heutiger, zur Verfügung stehender technischer Möglichkeiten und der Liberalisierung technologischer Innovationen sind die Voraussetzungen für eine Reaktivierung der maschinellen Handwerklichkeit gegeben.

Abschliessend ist festzuhalten, dass im Rahmen dieser Arbeit Maschine als ein Sammelbegriff für alle in der Fabrikation involvierten mechanischen Vorrichtungen benutzt wird, der sich nach der angegebenen Wörterbuchdefinition richtet. Innerhalb dieser Arbeit werden Roboter als eine Unterkategorie der Maschine bzw. als ein Spezialfall derer betrachtet.

## 6. Handwerk und Maschine

### Vergleich zwischen handwerklichem Werkzeug und der Maschine

In diesem Kontext werden als Werkzeug die vom Handwerker eingesetzten Utensilien bezeichnet, welche ihm das handwerkliche Arbeiten ermöglichen und direkt von der ausführenden Person betätigt werden. Der Duden definiert Werkzeug als einen „für bestimmte Zwecke geformten Gegenstand, mit dessen Hilfe etwas [handwerklich] bearbeitet oder hergestellt wird.“<sup>47</sup> Eine Maschine kann auf einer symbolischen Ebene auch als Werkzeug der Fabrikation bewertet werden, jedoch wird in diesem

---

<sup>47</sup> Duden Wörterbuch, <http://www.duden.de/node/701684/revisions/1326016/view> (Stand 02.09.2014).

Zusammenhang eine Trennlinie zwischen Werkzeug und Maschine gezogen. Diese klare Trennung wird eingeführt, um eine artikulierte Vergleichbarkeit zwischen den operationalen Unterschieden zwischen der handwerklichen und maschinellen Fertigung zu gewährleisten. Die Bedeutsamkeit der grundsätzlichen Unterscheidung zwischen der Benutzung eines Werkzeugs oder einer Maschine steht in Relation mit den von einander abweichenden Arten ihres Manövrierens, wodurch sich eine andere Art der Beziehung zwischen Nutzer und dem bedienten Mittel, sei es Werkzeug oder Maschine, ergibt. Eines der ersten Versuche zur Differenzierung zwischen beiden lässt sich erneut bei Vitruv antreffen:

*„Zwischen einer Maschine - machina, Rüstzeug - und einem Instrumente - organum, Werkzeug - scheint mir überhaupt folgender Unterscheid zu seyn: Die Maschine wird durch mehrere Leute, oder durch größere Kraft zu der bestimmten Absicht in Bewegung gesetzt; als die Balliste, und die Öl- und Weinpresse: Das Instrument hingegen wird nur durch Einen Mann [sic!], der damit umzugehen weiß, zu seinem Zweck gehandhabt.“<sup>48</sup>*

Obwohl wie bereits im vorausgehenden Abschnitt bemerkt wurde, der von den Maschinen der Zeit erreichte Entwicklungsstand sich auf einem sehr niedrigen Niveau befand und Maschinen vergleichsweise zu Werkzeugen bezüglich ihrer Verbreitung eine Minderheit darstellten, hat sich Vitruv mit dem klaren Auseinanderhalten von Werkzeug und Maschine beschäftigt. Das angeführte Differenzierungskriterium bezieht sich bei Vitruv auf Anzahl der Nutzer und somit auch auf die Art der Nutzung. Die Bedienung einer Maschine erfordert keine Handfertigkeit und setzt kein spezifisches Wissen des Benutzers voraus, während das Werkzeug ein direkt von der Hand geführtes Instrument ist, das genaue Kenntnisse und Kontrolle voraussetzt. Im weiteren Verlauf des Textes äußert sich Vitruv schlussfolgernd bezüglich Werkzeug und Maschine, dass beide demselben Zweck dienen. Der von beiden erbrachte Mehrwert fundiert darin, dass ihr Einsatz sich massgeblich erleichternd auf die auszuführenden Arbeiten auswirkt. Somit zeichnen sich beide durch ihre Funktionalität und Dienlichkeit aus.<sup>49</sup>

Größe, Simplizität oder Komplexität als ausschlaggebende Vergleichsfaktoren werden ausgeschlossen, denn sie machen keine Aussage über die Operationalität des betrachteten Objekts. Kunsthistoriker Risatti liefert als wichtigstes Unterscheidungsmerkmal zwischen den beiden Kategorien, die Art der Energiezufuhr und Energieweitergabe:

---

<sup>48</sup> Vitruv: „Baukunst“, Zweiter Band, Artemis Verlag für Architektur, Zürich und München, 1987, S. 243.

<sup>49</sup> Ebd., S. 243.

„die Maschine verändert die Richtung und/oder die Magnitude einer Kraft so, dass ein mechanischer Vorteil produziert wird.“<sup>50</sup> „Im Gegensatz dazu, verändern Werkzeuge nicht die Richtung, Geschwindigkeit oder die Magnitude einer Kraft, noch bringen sie einen mechanischen Vorteil mit sich; [...] Werkzeuge leiten die Energie in dieselbe Richtung, in der das Material bearbeitet wird.“<sup>51</sup>

Risatti argumentiert somit, dass durch den Einsatz der Maschine ein gewisser Kontrollverlust und eine Distanzierung in Kauf genommen werden muss. Daraus resultiert der Vorwurf, dass die direkte Interaktion zwischen Mensch und Material, mit der Hand als ausführende Kraft und kontrollierende Einheit über dem Werkzeug, eliminiert wird.

## Vergleich zwischen maschineller und handwerklicher Bearbeitung

### Das Repetitive und das Variierende

Betreffend des handwerklichen Arbeitens und der daraus resultierenden Objekte, spricht der Theoretiker Mario Carpo von der „*individuellen Variation des handwerklich Gemachten*“.<sup>52</sup> Darunter ist zu verstehen, dass handwerklich in Serie gefertigte Objekte, seien es alte Goldmünzen, vom Schreiner hergestellte Möbel oder vom Steinmetz gefertigte Ornamentik, bei denen der Anspruch auf formbezogener und technischer Übereinstimmung besteht, aufgrund ihrer manuellen Herstellungsart trotzdem nicht komplett identisch sind. Durch die manuelle Bearbeitung sind minimale Abweichungen bei der Fertigung unumgänglich. Daher spricht Carpo von einer Ähnlichkeit handwerklich seriell produzierter Objekte und nicht von ihrer Gleichheit. Das Handwerkliche strebt nach dem Erreichen einer visuellen Ähnlichkeit oder Gleichheit. Im Gegensatz dazu nennt er die „*indexikalische Gleichheit als ein wesentliches Charakteristikum des mechanischen Zeitalters und der mechanischen Vielfältigkeit*“.<sup>53</sup> Bei der maschinellen Nutzung ist eine hohe Präzision ein ausschlaggebender Parameter der Fertigung und ermöglicht somit die Fabrikation identischer Serien. Es wird angestrebt Variation und materielle Abweichungen bei der maschinellen Fabrikation so weit wie möglich zu reduzieren. Je höher die Identikalität zwischen den gefertigten Objekten ist, desto höher ist auch das wahrgenommene Qualitätsempfinden. Es kann noch darauf hingewiesen werden, dass auch die handwerkliche Betätigung einen repetitiven Charakter besitzt, genauso wie die maschinelle Fertigung, betrachtet man die aufeinanderfolgenden Arbeitsphasen. Dem Handwerker stehen jedoch weitaus mehr Freiheiten zur Verfügung, da er Werkzeug und Material direkt manipuliert, während bei der

<sup>50</sup> Risatti, H.: „A Theory of Craft. Function and Aesthetic Expression“, The University of North Carolina Press, 2007, S. 49.

<sup>51</sup> Risatti, H.: „A Theory of Craft. Function and Aesthetic Expression“, The University of North Carolina Press, 2007, S. 51.

<sup>52</sup> Carpo, M.: „Alphabet und Algorithmus“, transcript Verlag, Bielefeld, 2012, S. 17.

<sup>53</sup> Ebd., S. 17.

Maschine die Arbeitsschritte im Voraus festgelegt und nicht änderbar sind. Das Repetitive ist somit kennzeichnend für das Maschinelle, während beim Handwerk die Variation der Arbeitsmethodik oder -folge durch den Entwerfer unter spezifischen Umständen manipuliert werden können.

### **Material**

Um das Wesen und die definierenden Merkmale des Handwerks, des Handwerklichen besser zu veranschaulichen, stellt Howard Risatti es vergleichend der Maschine gegenüber. Risatti bezieht sich dabei vor allem auf die Art der Interaktion mit dem Material und die unterschiedlichen Arten der Verarbeitung. Während die Maschine das Material dominiert,<sup>54</sup> geht es in der Handwerkskunst darum „*das Material in Harmonie mit seinen inhärenten Eigenschaften*“<sup>55</sup> zu bearbeiten. Es wird der Vorwurf gemacht, dass bei der maschinellen Bearbeitung keine Rücksicht auf die natürlichen und spezifischen Charakteristika des Materials genommen wird. Hauptsächlich durch das Ausüben von äußeren Kräften auf das Material, wird dieses in eine vorgegebene Form gezwungen.<sup>56</sup> Die maschinelle Verarbeitung verlangt nach der Homogenisierung des Materials. Diese Homogenisierung beläuft sich nicht nur auf der Ebene des Erfüllens von Industrienormen, sondern reicht bis hin zur Mikroebene, indem Materialdichte und -beschaffenheit standardisiert werden.<sup>57</sup> Daher rührt auch der von Risatti erhobene Vorwurf der Immaterialität industriell gefertigter Objekte. Die Materialhomogenisierung führt zu einer Wahrnehmungsverzerrung des Materials und seiner Eigenschaften.<sup>58</sup> Das anfängliche Benutzen des Wortes „dominieren“ bekommt eine doppelte Bedeutung: zum einen bezieht es sich auf den durch die Maschine ausgeübten Krafteinfluss, zum anderen auf das Beseitigen sämtlicher Arten von materiellen Unregelmässigkeiten. Im Gegensatz dazu, muss sich beim Handwerk die Hand mit dem heterogenen Charakter natürlicher Materialien konfrontieren. Die Uneinheitlichkeit des Materials bestimmt sogar den kreativen Schaffensprozess mit, wenn unvorhergesehene Materialabweichungen während der Bearbeitung in den Entwurf integriert werden.<sup>59</sup>

### **Maschine als limitierender Faktor**

Die Maschine, als Medium der Fabrikation, übt Einfluss auf den Entwurfsprozess aus, selbst wenn das vom Entwerfer nicht bewusst wahrgenommen wird. Dieses indirekte Beeinflussen findet dadurch statt, dass ein zu bauender Entwurf eine Realisierbarkeit

---

<sup>54</sup> Vgl. Risatti, H.: „A Theory of Craft. Function and Aesthetic Expression“, The University of North Carolina Press, 2007, S. 194.

<sup>55</sup> Ebd., S. 195.

<sup>56</sup> Ebd., S. 195.

<sup>57</sup> Ebd., S. 197.

<sup>58</sup> Ebd., S. 197.

<sup>59</sup> Ebd., S. 195.

voraussetzt. Die Machbarkeit wird garantiert und erfüllt, indem sich der Entwerfer an den Limitierungen der Maschine orientiert:

*„Zumal der Entwerfer für die Maschine entwerfen muss, für das was die Maschine auf praktische und wirtschaftliche Weise mit dem Material machen kann, wird wiederum der Wille des Entwerfers von der Maschine gestaltet. Das bedeutet nicht nur gestaltet, durch die Tatsache, dass die Maschine nach Gleichmässigkeit und Standardisierung des Materials verlangt, sondern auch durch die Neigung zur Wiederholung.“<sup>60</sup>*

Anders formuliert, wird hier die Prädetermination bzw. Konditionierung durch die technischen Möglichkeiten der Maschine und des Materials thematisiert. Denn etwas kann nur dann gebaut werden, also eine materielle Form annehmen, wenn zum einen die Mittel der Fabrikation, in diesem Fall die Maschine inklusive ihrer technischen Einschränkungen, und zum anderen das Material, inklusive seiner spezifischen Eigenschaften, die für das Bauen relevant sind, wie Zugfestigkeit oder Elastizitätsmodul, berücksichtigt werden. Material und Maschine lassen sich somit als direkte Parameter des Entwurfs und der Fertigung identifizieren. Die technische Ausprägung der Maschine, ihre Funktionsweise, die Verarbeitungsabläufe, produzierbare Minimal- und Maximaldimensionen, all diese stellen Faktoren dar, welche sich über das Material als Fabrikationsmedium indirekt auf den Entwurf auswirken.

Eine andere Begrenzung, die sich oftmals aus der Bedienung von Maschinen ergibt, ist die strenge Vorgabe von Arbeitsabläufen und eine daraus resultierende Inflexibilität für den Arbeiter oder die bedienende Person. Diese Art der Limitierung war zu den Anfängen der maschinellen Fertigung noch sehr stark ausgeprägt, so dass *„die Arbeitsteilung und der Rhythmus der Maschinen Arbeitsinhalte und Arbeitsgeschwindigkeit vorgaben“*.<sup>61</sup> Mittlerweile kann von einer Abmilderung und einer gewissen Flexibilität dieser vorgegebenen Strenge ausgegangen werden, betrachtet man zum Beispiel das im Kapitel „Roboter“ beschriebene ANDON-System, der Toyota Corporation, bei dem der Arbeiter Geschwindigkeit und Wartezeiten direkt beeinflussen kann. Durch die Möglichkeit des Eingreifen des Arbeiters ist eine gewisse Art der Flexibilität gegeben. Zu einem gewissen Mass lässt sich dies auch als eine Art der Interaktion zwischen dem Menschen und der Maschine mittels des ANDON-Systems beschreiben. Die menschliche Arbeitskraft unterordnet sich aber trotzdem der Maschine. Operationale Inflexibilität, vorgegebene Arbeitsabläufe, gebunden an die serielle Fertigung, stellen operationale Eigenschaften und Vorgaben dar, die weiterhin bestimmend für den Maschineneinsatz sind.

---

<sup>60</sup> Risatti, H.: „A Theory of Craft. Function and Aesthetic Expression“, The University of North Carolina Press, 2007, S. 197.

<sup>61</sup> König, W.: „Technikgeschichte. Eine Einführung in ihre Konzepte und Forschungsergebnisse“, Grundzüge der Modernen Wirtschaftsgeschichte Band 7, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2009, S. 120.

## 7. Schlussfolgerungen zu Handwerk, Maschine und Machinecraft

Im Folgenden werden die wesentlichen Merkmale von Handwerk und Maschine zusammengetragen, um somit das verfolgte Ziel der Synthese zwischen Handwerk und Maschine, das hinter dem theoretischen Konzept der Machinecrafts steht, detaillierter festzuhalten. Ebenso gilt es ein sich Distanzieren von der Betrachtung der Maschine als ein reines Mittel zum Zweck zu bewirken und eine neue ideologische Wahrnehmung des Potenzials, das sich aus dem Zusammenführungsprozess von Handwerk und Maschine beim Einsatz von Robotern auf der Ebene der Architektur ergibt, zu stimulieren. Der von McCullough geprägte Ausdruck des „*Paradoxons des immateriellen Handwerks*“<sup>62</sup> fasst die Intentionen hinter der Idee der Fusion von Handwerklichkeit und Aspekten der Maschinenbautechnik am besten zusammen. Nicht die manuelle Komponente handwerklichen Arbeitens ist ausschlaggebend, sondern das Übernehmen der Charakteristika, die die handwerkliche Vorgehensweise definieren, befindet sich in einer zentralen Position. Die destillierte Essenz des handwerklichen Vorgehens vereint mit den technischen Möglichkeiten, die sich aus dem Einsatz von architektonischen Robotern ergeben, generieren das Konzept der Machinecraft.

Das Implementieren des Handwerks in dem Rahmen digitalisierter Entwurfs- und Fabrikationsprozesse erfährt seine Legitimität in einer angestrebten disziplinären Bereicherung. Eine gewollt vereinfachte Beschreibung der handwerklichen Tätigkeit im Kontext des Digitalen liefert Malcolm McCullough: „*In der digitalen Produktion, bezieht sich Handwerk auf die Gegebenheiten, in denen Personen standardisierte technische Hilfsmittel als Mittel zu einem nicht zu antizipierenden und unbeschreiblichen Zweck benutzen.*“<sup>63</sup> Ähnlich wie bei der traditionellen handwerklichen Betätigung wird das standardisierte, analoge Werkzeug durch standardisierte, jedoch digital gesteuerte Fertigungsinstrumente ersetzt, die aber keine direkte Steuerung durch die Hand des Entwerfers benötigen. Dem Resultat der Arbeit wird eine unvorhersehbar Qualität zugeordnet, da sich McCullough auf eine in ihrer Gesamtheit nicht komplett absehbare Finalität bezieht. Die Komplexität handwerklicher materieller Formgebungsprozesse ist nicht vollkommen zu antizipieren, da, anders als bei der maschinellen Bearbeitung, die Eigenheiten nicht homogenen Materials erlaubt sind und berücksichtigt werden können. Im Fall digitaler Fertigungsprozesse behält diese Feststellung weiterhin ihre Gültigkeit bei, da der Ausgang bzw. die Form des Endprodukts beispielsweise an die Variation parametrischer Lösungsansätze bzw. an iterative Prozesse gebunden ist.<sup>64</sup>

---

<sup>62</sup> McCullough, M.: „Abstracting Craft. The Practiced Digital Hand“, S. 311 In: Adamson, G. (Hrsg.): „The Craft Reader“, Berg Publishers, Oxford, 2010.

<sup>63</sup> Ebd., S. 311.

<sup>64</sup> Vgl. Kolarevic, B.: „The (Risky) Craft of Digital Making“, S. 121 In: Kolarevic, B., Klinger, K. (Hrsg.): „Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture“, Routledge Taylor and Francis, New York, 2008.

Zusammenfassend wird der Begriff des Handwerks in dem Kontext dieser Arbeit dafür benutzt, um eine Aktivität, die folgende Merkmale aufweist, zu beschreiben:

- Handwerk wird als eine Art des Arbeitens, also als ein handwerkliches Arbeiten verstanden. Handwerkliches Arbeiten wird als die direkte Interaktion zwischen dem Manuellen und dem Materiellen mittels des Werkzeuglichen interpretiert. Handwerklichkeit fasst die Komplexität der resultierenden Synergien, die sich aus diesem Zusammenspiel ergeben, zusammen.
- Das handwerkliche Arbeiten verfügt, verglichen zur maschinellen Fertigung, über mehrere Freiheitsgrade, da keine strikte Prädetermination der Arbeitsschritte besteht. Die „*Kontinuität der direkten Manipulation*“<sup>65</sup> ist eine Eigenheit des Handwerks, kann aber auf die Arbeitsweise des Architekten mittels des Einsatzes von Robotern übertragen werden. Da der Architekt die Instruktionen zur Prozessdurchführung generiert, befindet sich die Gestaltung und Manipulation der Fertigungsschritte unter seiner Kontrolle. Die Instruktionen können jederzeit aktiv verändert oder angepasst werden, so dass eine Befreiung von den maschinellen Auflagen vordefinierter Arbeitsetappen möglich ist. Des Weiteren handelt es sich beim handwerklichen Arbeiten um ein Kontinuum aus Entwurf und Fertigung. Anders als in den meisten Fällen der heutigen Architekturpraxis werden beide nicht voneinander getrennt, sondern bilden eine nicht trennbare Einheit der Prozesse.
- Handwerkliches Arbeiten beruht auf dem direkten Operieren von Werkzeug und der Auseinandersetzung mit dem Material, wobei das Werkzeug unter der direkten Kontrolle und Steuerung des Entwerfers steht. Dies lässt sich als eine direkte Partizipation an transformativen Prozessen beschreiben.
- Durch die direkte Interaktion mit dem Material wird die Akkumulation eines profunden Materialwissens ermöglicht. Der Entwerfer muss sich an den Verfahren der Materialbearbeitung direkt beteiligen, ohne dass diese Aktivität an andere Akteure delegiert wird. Die Materialhomogenisierung stellt keine allgemeine Grundbedingung für die Ausführung einer handwerklichen Arbeit dar, anders als bei der maschinellen Fertigung.
- Flexibilität und Reaktionsfähigkeit beim Auftreten unvorhergesehener Materialausprägungen oder -eigenheiten werden gefördert.
- Die diversen Handwerksberufe, seien es Schreiner, Töpfer, Maurer, Buchbinder, Hut- oder Segelmacher, bedienen sich eigener Werkzeuge, die in ihrer Funktionalität an die Anforderungen des jeweiligen Tätigkeitsgebiets angepasst sind. Das Spezifische des Werkzeugs resultiert aus seiner Abhängigkeit vom Material und benutzter Verfahrensmethodik.
- Das Handwerk verkörpert eine auf Intelligenz, Logik und Intuition basierte Vorgehensmethodik, die einem relativ flexiblen Regelkonstrukt folgt und somit bis heute dem Konzept der altgriechischen *techné* entspricht:

---

<sup>65</sup> McCullough, M.: „Abstracting Craft. The Practiced Digital Hand“, S. 313 In: Adamson, G. (Hrsg.): „The Craft Reader“, Berg Publishers, Oxford, 2010.

*„Techné begreift eine bewußte [sic!] menschliche Absicht ein, ein Verfahren, bewußt [sic!] ein zuvor ins Auge gefaßtes [sic!] Ziel mittels logischer Intelligenz und Geschicklichkeit zu erreichen. [...] techné muß rationalen Regeln folgen. Das System solcher Regeln oder das geordnete Wissen, das sich auf gewisse Arten der Produktion bezieht, ist ein wesentlicher Teil der techné.“<sup>66</sup>*

Die Signifikanz des Handwerklichen für die Disziplin ergibt sich aus der Beziehung zwischen Entwerfer, Fertigung, Material und Werkzeug, wobei all diese Faktoren über eine zirkulären Wechselwirkung miteinander verbunden sind. Die Prozesse des Entwurfs und der Fertigung sind nicht klar differenzierbar.

Die wesentlichen Merkmale der Maschine und der maschinellen Fertigung kontrastieren mit den Charakteristika des Handwerks. In der Baukultur erfuhr die Maschine mit dem Einläuten der Industrialisierung eine stetig wachsende Rolle, da sie als Synonym für die Technologieentwicklung verstanden werden konnte. Während der Industrialisierung wurde eine Maschinenkultur entwickelt, anhand derer sich der Einfluss und das Potenzial dieser für die Architekten belegen lässt. Effizienz, Geschwindigkeit, Massenproduktion und Optimierung stellen die wichtigsten Vorteile maschineller Fertigung dar. Diese beruht auf standardisierten Kriterien, die das Ziel der Generierung eines standardisierten Produktes verfolgen. Gleichzeitig bestehen technische Einschränkungen, die als eine Limitierung sowohl der Entwurfs- als auch der Fabrikationsprozesse gedeutet werden können. Die Elemente der operationalen Inflexibilität, der unnötigen Limitierung und des Behandelns des Materials als eine inaktive, passive Masse im Sinne der Gestaltgebung können durch den Einsatz von Industrierobotern oder selbst entwickelten Robotersystemen überwunden werden. Je mehr die Logik der handwerklichen Arbeitsweise als ein fester Bestandteil in die Arbeitsmethodik des Architekten integriert werden kann und auf die robotische Fertigung übertragen wird, desto größer erweist sich das prozessuale Kontrollpotenzial für den Architekten, so dass den entwurfsspezifischen und materiellen Spezifikationen Rechnung getragen wird. Aus der Perspektive des Entwerfers kann auf einen Autoritätszuwachs spekuliert werden. Durch den Einsatz von Robotern, seien es Industrieroboter oder spezifische Robotersysteme, kann ebenfalls das Spezifische der Werkzeuge beibehalten werden. Industrieroboter sind nicht-spezifische Fabrikationsinstrumente. Nicht-spezifisch, da der Industriearm am Armende mit unterschiedlichen Arten von Werkzeugen, den sogenannten Effektoren, ausgestattet werden kann, von einer Säge bis hin zu Extrusionssystemen für Polymere. An diesem Punkt interveniert die Grundsatzidee hinter dem Konzept der Machinecraft, dass durch das Auseinandersetzen des Entwerfers mit den Aspekten der Maschinenbautechnik der Architekt eigene Werkzeuge gestalten kann, die den spezifischen Anforderungen des Entwurfs angepasst werden. Im Fall von selbst entwickelten Robotersystemen kann die Idee weitergeführt werden, so dass der Architekt spezifische Fabrikationsstrategien in Abhängigkeit von Entwurf und Material entwickeln kann. Das Konzept der Machinecraft verfolgt die optimale Integration der positiven Aspekte beider Komponenten zu einer interdisziplinären

---

<sup>66</sup> Porphyrios, D.: „Klassisches Bauen“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1993, S. 30.

Wissensakkumulation. Durch eine handwerkliche Arbeitsmethodik wird das Favorisieren grenzüberschreitender Aktivitäten im Spannungsfeld des Handwerks auf der einen Seite und der Maschine auf der anderen angestossen, so dass dem Begriff der Interdisziplinarität eine neue Dimension verliehen wird.

Auf der Basis der zuvor aufgezählten Kriterien der handwerklichen Arbeitsweise wird die Strategie der Maschinenhandwerklichkeit bzw. Machinecraft aufgebaut. Das Konsolidieren des Handwerks in der Disziplin im Sinne einer Neuinterpretation im Kontext des Digitalen wird angestrebt. Während das Konzept des traditionellen Handwerks das direkte Involvieren des Manuellen in die Prozesse der Materialisierung bedeutet, bezieht sich das Konzept der Machinecraft nicht auf die direkte Einbeziehung der manuellen Komponente bei den Prozessen der Fertigung. Der Roboter nimmt die Position des Werkzeugs ein, wird aber über Instruktionen, die vom Entwerfer verfasst werden, gesteuert, wodurch der Roboter zum Vermittler zwischen Material und Mensch wird. Das Erreichen einer stärker entwurfsbezogenen Ausrichtung von Fertigungsprozessen wird verfolgt. Eine vom Entwerfer ausgehende Regulierung der Fertigungsprozesse mithilfe des Roboters im Sinne der entwurfstechnischen Anforderungen kann über ein direktes Intervenieren des Architekten problemlos sichergestellt werden. Machinecraft resultiert in einem **Prozess des sukzessiven Fusionierens des Materiellen, Prozesshaften, Entwerferischen, Maschinellen, Fabrikativen und Handwerklichen**. Simultan ergibt sich daraus das Garantieren einer Kontinuität der handwerklichen Natur der Architektur mittels der Maschine.

Der Roboter und die Beteiligung an der Entwicklung angepasster Robotersysteme kann nicht nur das Konzept des Handwerks reaktivieren sondern auch das Paradigma des Baumeisters. Denn „*das Wissen was, warum und wie man etwas anpassen muss verlangt nach einer tiefen Kenntnis der Prozesse, Werkzeuge und Techniken, genauso wie im prä-digitalen Zeitalter.*“<sup>67</sup> Die mittelalterliche Betätigung des Baumeisters beruht ebenfalls sehr stark auf der handwerklichen Komponente, dem kontinuierlichen Übergang von Entwurf und Fertigung sowie der Beschäftigung mit der Erfindung oder Weiterentwicklung von Konstruktionsmaschinen. Dieses Paradigma wird im anschließenden Kapitell aufgezeigt und näher analysiert.

---

<sup>67</sup> Kolarevic, B.: „The (Risky) Craft of Digital Making“, S. 127 In: Kolarevic, B., Klinger, K. (Hrsg.): „Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture“, Routledge Taylor and Francis, New York, 2008.

### III. Renaissance: Baumeister und Architekt

#### 1. Zwei Modelle

Ziel dieser Arbeit ist die Thematisierung der Auswirkungen, die von der direkten Auseinandersetzung des Entwerfers mit der Maschine, als ein wesentliches Mittel der Fertigung, und von dem maschinellen Einsatz ausgehen. Wie anfangs vorgestellt, wird im Rahmen dieser Argumentation die Hypothese unterstützt, dass durch den Einsatz von Robotern im Bauwesen verloren gegangene Aspekte des handwerklichen Arbeitens wiedergewonnen und in das Arbeitsfeld des Entwerfers wieder eingegliedert werden können. Das aneinander gekoppelte und sich gegenseitig bedingende Verhältnis zwischen Handwerk, Maschine und Fertigung steht im Zentrum der folgenden Betrachtung, wenn die Modelle des Baumeisters und des Architekten analysiert werden.

Der Baumeister verkörpert am besten die Symbiose, welche sich aus Handwerk und Maschine ergibt, und das immense Potenzial, das daraus resultieren kann. Bezogen auf Brunelleschi und Albertis Zeitalter, die Renaissance, spricht Galluzzi metaphorisch von dem Zeitalter der „*Maschinenrenaissance*“.<sup>68</sup> Dies deutet auf die neu entdeckte Schwerpunktsetzung der Architekten oder Baumeister auf die verstärkte Maschinenentwicklung ganz im Sinne Vitruvs hin. Die Epoche der Renaissance wird unter anderem durch das Auftreten einer breiten Masse neuer Maschinen charakterisiert und kulminierte mit der herausragenden Persönlichkeit Leonardo da Vincis, einem der versiertesten Maschinenerfinder.<sup>69</sup> Um die Besonderheiten und spezifischen Eigenheiten eines Modells evidenzieren zu können, bedarf es eines vergleichenden Gegenmodells. Als Pendant zum Modell des Baumeisters wird das Modell des Architekten benutzt. Bei der Betrachtung beider Modelle steht die Beleuchtung der Rolle der Maschine im Mittelpunkt. Baumeister und Architekt unterscheiden sich hinsichtlich zweier wesentlicher Aspekte: zum einen das individuelle Verständnis des Berufsbildes und zum anderen bezüglich der Art des Bauens, wobei bei letzterem Aspekt unmittelbar die Frage der Rolle der Maschine interveniert. Beide Modelle unterscheiden sich wesentlich in der Priorität, die der Maschine, dem Maschinenbau, dem Handwerk und der Fabrikation zugesprochen wird. Daher kann man von zwei grundverschiedenen Modellen oder sogar Paradigmen sprechen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe Baumeister und Architekt stellvertretend für zwei Arbeitsmodelle, sogar Vorgehenslogiken, benutzt. Die Erstellung eines Berufsprofils entsprechend der beiden Modelle wird in der weiteren Auseinandersetzung verfolgt.

Im Verlauf der Architekturgeschichte alternieren beide Modelle, so dass man besonders in der Übergangszeit von Mittelalter zu Renaissance von einer Koexistenz

---

<sup>68</sup> Galluzzi, P.: „Renaissance Engineers. From Brunelleschi to Leonardo da Vinci“, Giunti Verlag, Florenz, 1996, S. 11.

<sup>69</sup> Vgl. Mumford, L.: „Mythos der Maschine. Kultur, Technik und Macht. Die umfassende Darstellung der Entdeckung und Entwicklung der Technik“, Fischer Taschenbuch Verlag, Wien, 1977, S. 326.

beider Prinzipien sprechen kann. Es lassen sich verschiedene Vertreter beider Modelle benennen, wobei in der Fachliteratur bevorzugt die beiden italienischen Persönlichkeiten der Renaissance Filippo Brunelleschi (1377-1446) und Leon Battista Alberti (1404-1472) als Vertreter der zwei Prinzipien antagonistisch gegenübergestellt werden. Dies lässt sich dadurch begründen, dass beide Zeitgenossen waren und aus zeitlicher Sicht betrachtet genau an der Wende zwischen beiden Modellen gelebt haben. Somit werden Brunelleschi und Alberti, als Vertreter zweier Arbeitsweisen, die sich in ihrer grundsätzlichen Natur unterscheiden, interpretiert. Sie werden in der weiteren Argumentation als Fallbeispiele behandelt, anhand derer diese verschiedenen Haltungen veranschaulicht werden. Zusätzlich waren beide Persönlichkeiten verstärkt in Florenz tätig, wobei Florenz als „*Urquell der neuen Architektur, dieser neuen Denkweise*“<sup>70</sup> betrachtet wird. Gemeint ist damit, dass in Florenz der Ausgangspunkt einer humanistischen Weltanschauung anzusiedeln ist, deren Auswirkungen einen starken Einfluss auf das Selbstverständnis der Architektur ausgeübt haben. Berücksichtigt man die wissenschaftliche Literatur bezüglich der Berufseinordnung Brunelleschis und Albertis, so lassen sich unterschiedliche Klassifizierungsversuche erkennen. Bei den Beschreibungen Albertis findet in der Fachliteratur die Bezeichnung als Architekt eine konstante Anwendung. Während bei Alberti diese Einordnung einen klar überwiegenden Zuspruch erfährt, verhält es sich im Fall von Brunelleschi anders. Zwar wird Brunelleschi vermehrt als ein Vertreter der Berufsgruppe der Baumeister betrachtet, es lassen sich aber auch Einordnungen als Ingenieur oder Architekt antreffen. So bezieht sich Paulgerd Jesberg auf die Person Brunelleschis als auf einem Ingenieur,<sup>71</sup> während Paolo Galluzzi in seinem Werk *Brunelleschi und Leonardo da Vinci mit dem Begriff Künstleringenieuren bzw. „artist-engineers“*<sup>72</sup> adressiert. Diese Ambiguität der Begriffe liegt zum einen an einer ungenauen Definition und an dem schwierigen Auseinanderhalten der Etappen der Berufsentwicklung. Es lässt sich jedoch klar feststellen, dass es einen allgemeinen Konsens darüber gibt, dass Brunelleschi und Alberti unterschiedliche Ansätze in dem Bereich der Architektur verkörpern. Die Zuordnung von Brunelleschi dem Baumeister und die Einordnung von Alberti dem heutigen Verständnis eines Architekten, wird von einer Reihe Historikern und Theoretikern unterstützt. Bei der Gegenüberstellung der beiden Akteure und dem Zuschreiben eines Repräsentationscharakters für die jeweilige Berufsgruppe, lässt sich Mario Carpo als einer der vielleicht relevantesten gegenwärtigen Theoretiker aufzählen. Auch der Historiker Binding betrachtet beide Repräsentanten vergleichend miteinander, wobei Brunelleschi ebenfalls als Vertreter der „*mittelalterlichen, handwerklichen Tradition*“<sup>73</sup> verstanden wird. Im Gegensatz

---

<sup>70</sup> Kostof, S.: „Geschichte der Architektur. Vom Frühmittelalter bis zum Spätbarock“, Band 2, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1993, S. 379.

<sup>71</sup> Vgl. Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996, S. 44-51.

<sup>72</sup> Vgl. Galluzzi, P.: „Renaissance Engineers. From Brunelleschi to Leonardo da Vinci“, Giunti Verlag, Florenz, 1996, S. 11.

<sup>73</sup> Binding, G.: „Meister der Baukunst. Geschichte des Architekten und Ingenieurberufes“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2004, S. 146.

dazu, wird anhand unterstützender Verweise auf Albertis Schriften die Erkenntnis formuliert, dass „bei Alberti die Architektur nicht mehr das Ergebnis handwerklicher Arbeit ist“.<sup>74</sup> Auch Jesberg vertritt dasselbe Verständnis bezüglich der beruflichen Einordnung und Unterscheidung Albertis und Brunelleschis: „diese drei [Anm. d. A. Brunelleschi, Ghiberti und Filarete] sind Handwerker, Techniker und vor allem Künstler. Alberti dagegen ist Gelehrter, Wissenschaftler und Theoretiker, der personifizierte »homo universalis« des Humanismus.“<sup>75</sup> Es gibt somit eine wissenschaftliche Einigkeit bezüglich der getrennten Auffassungen der Berufsausübung. Den repräsentativen Meinungen der Historiker Mario Carpo, Günther Binding und Paulgerd Jesberg folgend, wird in diesem Kontext Brunelleschi als Baumeister und Alberti als Architekt behandelt.

### Analysemethodik

Aus methodischer Sicht betrachtet, gestaltet sich die Analyse beider Entwerfer zwecks des Herausarbeitens zweier Arbeitsmodelle unterschiedlich. Zunächst folgt die Angabe relevanter Details zu den beruflichen Hintergründen dieser zeitgleichen Persönlichkeiten. Dadurch wird das Verständnis über die Ausrichtungen der jeweiligen vertretenen Ansichten gesteigert. Um deren Ansichten bezüglich der Arbeitsmethodik des Entwerfers zu veranschaulichen bieten sich am besten ihre eigens formulierten Texte. Leon Battista Alberti hat ein Schriftenreihe, bestehend aus zehn Büchern unter dem Originaltitel „*De re aedificatoria*“ publiziert. In diesen Büchern bezieht er zu unterschiedlichen Aspekten des Entwerfens und Bauens Stellung. Daher wird bei der Analyse mehrheitlich auf dieses Traktat Bezug genommen, wobei im Anschluss darauf die dazugehörigen Interpretationsversuche unterschiedlicher Forscher aufgeführt werden. Zusammenfassend wird am Ende der Analyse das Modell nach dem Albertianischen Paradigma vorgestellt. Dieselbe Vorgehensweise kann aber bei Brunelleschi nicht in vollem Masse Anwendung finden. Da Brunelleschi seine theoretischen Ansichten nie in einem zusammenhängenden literarischen Werk gebündelt hat, wird bei seiner Analyse auf die Kommentare zweier italienischer Gelehrte zurückgegriffen. Bei diesen handelt es sich um Giorgio Vasari und Antonio di Tuccio Manetti. Giorgio Vasari (1511-1574) war ein Florentiner Architekt, der sich gleichzeitig zu seiner Bauaktivität mit dem Aufschreiben der Biographien berühmter italienischer Kunstschaffender, zu welchen auch Brunelleschi gehört, beschäftigt hat. Diese Schriftenreihe trägt den Namen „*Lebensbeschreibungen der ausgezeichnetsten Maler, Bildhauer und Architekten der Renaissance: nach Dokumenten und mündlichen Berichten*“ und behandelt unter anderem das Schaffen und Wirken von Leonardo da Vinci, Donatello und auch Lorenzo Ghiberti. Antonio Manetti (1423-1497), ebenfalls ein Florentiner Gelehrter und Zeitgenosse Brunelleschis, hat dessen Biographie, die den Originaltitel „*Vita di Filippo Brunelleschi*“ trägt, verfasst und berichtet ausführlich über Brunelleschis

<sup>74</sup> Ebd., S. 146.

<sup>75</sup> Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996, S. 44.

vertretene Ansichten bezüglich der Baukunst. In der Abwesenheit eigens von Brunelleschi formulierter Schriften wird als Fallstudie der Bau der Florentiner Domkuppel näher betrachtet, um ein angemessenes Bild seiner Arbeitsmethodik und der Rolle der Maschine und des Handwerks liefern zu können.

## 2. Vom Wandel der Berufe

Betrachtet man die wissenschaftliche Literatur, die sich mit der zeitlichen Entwicklung des Architekturberufs beschäftigt, so werden zur Beschreibung verschiedener Individuen, welche vom Altertum bis hin zum Mittelalter im Bauwesen tätig waren, alternierend die Begriffe Baumeister, Architekt oder Ingenieur benutzt. In allgemeinen Zügen betrachtet, erweist sich die Differenzierung zwischen Architekt und Ingenieur als leichter und ist aus der heutigen Sicht des Verständnisses dieser Berufsgruppen klarer nachzuvollziehen, vor allem ab dem Einsetzen der Epoche der Industrialisierung, welche mit dem Aufkommen institutioneller Einrichtungen, eine legal bindende Trennung zwischen beiden Ausbildungen zum Vorschein brachte. Doch bezieht man sich auf die Zeitspanne des Mittelalters, so erscheint selbst das Auseinanderhalten von Architekt und Ingenieur als zunehmend problematisch.

Die geschichtliche Zurückverfolgung der Differenzierung zwischen Architekt und Baumeister erweist sich als schwieriger zu verfolgen, zumal es historische Zeitspannen gibt in denen sich der Einsatz beider Bezeichnung überlagert, wobei unklare, schwammige Delimitierungen zwischen den beiden Berufsbezeichnungen entstehen und dies eher vom Verständnis und der Positionierung des Autors abhängt. In seinem Buch „Meister der Baukunst“ setzt sich Günther Binding mit dieser Thematik auseinander und liefert umfassende Literaturbelege aus diversen Schriften unterschiedlicher Autoren und Epochen. Allein diese Zusammenfassung historischer Zitate lässt aus geschichtlicher Sicht eine akkurate Trennung beider Berufsgruppen als kompliziert erscheinen, zumal auch dem geographischen Betrachtungskontext große Relevanz beigemessen werden muss. Im Zeitalter des Mittelalters lässt sich eine große Palette benutzter Bezeichnung zur Berufsbeschreibung des Architekten anführen. Dabei handelt es sich um eine alternierende Begriffsbenutzung, welche, wie zuvor bemerkt, an geographische Koordinaten gebunden ist. Ricken zählt einige der gängigsten mittelalterlichen Bezeichnungen auf, die sich in größerem Maß mit der heutigen Auffassung des Architektenberufs decken: *magister operis* (Werkmeister), *archilapicida* (Obersteinmetz), *caementarius* (Maurer), *lapicida* (Steinmetz) oder *carpentarius* (Zimmermann), wobei darauf verwiesen wird, dass eine gewisse Unschärfe bei dieser Art der Titelvergabe berücksichtigt werden muss und die Vergabe nicht immer eine nachweisbare Beständigkeit aufweist.<sup>76</sup> Parallel zu den Berufsbezeichnungen des Baumeisters und des Architekten, kursiert im Mittelalter ebenfalls der Begriff des Ingenieurs. Das English Oxford Dictionary verzeichnet

---

<sup>76</sup> Vgl. Ricken, H.: „Der Architekt. Geschichte eines Berufs“, Henschelverlag Kunst und Gesellschaft, Berlin, 1977, S. 28.

bereits um 1300 den ersten Eintrag des Begriffs,<sup>77</sup> während im 16. Jahrhundert in Frankreich eine offizielle königliche Ausschreibung für den Beruf des „Ingenieur du Roy“ (zu Deutsch: Ingenieur des Königs) anzutreffen ist.<sup>78</sup> Auf das Berufsbild des Ingenieurs und dessen Entwicklung wird in einem späteren Kapitel näher eingegangen. Der mittelalterliche Ausgangspunkt wird angedeutet, jedoch wird auf die Kontextualisierung des Ingenieurberufs in der Epoche der Industrialisierung exakter eingegangen, da sich während dieses Zeitalters ein artikuliertes Kristallisieren dieses Berufsprofils vollzogen hat, auf welche das heutige Verständnis des Berufs zurückzuführen ist. Dagegen wird im Mittelalter der Ingenieurberuf überwiegend mit dem Kriegs- und Militärwesen in Verbindung gebracht, wobei dem Festungsbau eine große Wichtigkeit zugesprochen wird.

Ungeachtet dieser Umstände benötigt es innerhalb dieser Forschungsarbeit einer präzisen Dissoziation beider Kategorien bezüglich Berufsverständnis, verfolgter Vorgehensstrategie und Arbeitsmethodik, um eine klare Ausformulierung zweier Berufsprofile zu erfassen. Dies wird erreicht, indem man sich auf allgemein gültige und auftretende Charakteristika beider Vertreter, also gemeinsame Nenner, unabhängig von lokal-geographischen Eigenheiten, bezieht. Bei der Unterscheidung zwischen Baumeister und Architekt geht es nicht um das Definieren zweier unterschiedlicher Berufsstände oder um die klare zeitliche Verankerung des Auftretens dieser Berufe. In den vorliegenden analysierenden Betrachtungen liegt das Ziel darin, zwei unterschiedliche Methodiken zu illustrieren und somit zwei verschiedene Logiken der Vorgehensweise bezüglich der Fabrikation, des Handwerks und der Maschine aufzuzeigen. Das Illustrieren der repräsentativen Prinzipien, welche beiden Modellen zugrunde liegen, wird verfolgt.

Bezüglich seiner bauhistorischen Hintergründe reiht sich der Beruf des Baumeisters in der Tradition der mittelalterlichen Bauhütte ein. Der geschichtliche Werdegang der Bauhütte lässt sich wiederum auf „*die wandernden lombardischen Steinmetze, die bis ins 11. Jahrhundert hinein die Traditionen der römischen Handwerker-gilden an die mittelalterlichen Bauhütten weitergaben*“<sup>79</sup>, zurückverfolgen. Unter der Bezeichnung Hütte versteht sich die „*kirchliche oder städtische Organisation einer Baustelle*“.<sup>80</sup>

Es ist historisch betrachtet schwierig Baumeister und Architekt auseinanderzuhalten und die genaue zeitliche Bestimmung des Wendepunkts erweist sich als unmögliches Vorgehen, da es sich dabei um einen langsamen, schleichenden Prozess handelte. Der

---

<sup>77</sup> Vgl. Gispert, K.: „Der gefesselte Prometheus: Die Ingenieure in Großbritannien und in den Vereinigten Staaten 1750-1945“, S. 127, In: Kaiser, W., König, W. (Hrsg.): „Geschichte des Ingenieurs. Ein Beruf in sechs Jahrtausenden“, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2006.

<sup>78</sup> Vgl. Popplow, M.: „Unsichere Karrieren: Ingenieure im Mittelalter und Früher Neuzeit 500-1750“, S. 95, In: Kaiser, W., König, W. (Hrsg.): „Geschichte des Ingenieurs. Ein Beruf in sechs Jahrtausenden“, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2006.

<sup>79</sup> Ricken, H.: „Der Architekt. Geschichte eines Berufs“, Henschelverlag Kunst und Gesellschaft, Berlin, 1977, S. 27.

<sup>80</sup> Binding, G.: „Baubetrieb im Mittelalter“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1993, S. 103.

Prozess des Wandels vom Baumeister zum Architekten erfolgte über eine längere Zeitspanne, so dass man laut Binding von einer kompletten Umstellung erst ab dem 16. Jh. ausgehen kann:

*„Der Wandel vom handwerklich ausgebildeten Steinmetz-Baumeister zum nur entwerfenden Architekten hatte sich in der Renaissance vollzogen und war im 16. Jh. voll ausgeformt. Der Architekt der Renaissance, umfassend gebildet, gelehrter Humanist, ein echter uomo universale, war sich voll bewusst, eine begehrte Tätigkeit auszuführen [...]“<sup>81</sup>*

Somit ist es wichtig festzuhalten, dass es einen unbestreitbaren Wandel in der Berufsausübung gegeben hat, welcher den Anlass dazu gab, dass auf unterschiedliche Berufsbezeichnungen zurückgegriffen werden konnte. Auf die Natur dieses Wechsels, dessen Charakteristika und die daraus hervorgehenden Veränderungen liegt der Schwerpunkt der vorliegenden Betrachtung.

### **Auslöser des Wandels**

Es können spezielle Momente in der Architekturgeschichte identifiziert werden, welche eindeutig und massgeblich zu dieser Veränderung, dem Übergang von der mittelalterlichen Tradition des Bauens zu einer neuen Baumethodik, beigetragen haben. Dieser Prozess der disziplinären Umgestaltung, der einen langjährigen und komplexen Vorgang darstellt, kann nicht allein durch einzeln betrachtete Faktoren legitimiert werden. Wie oft in der Geschichte lassen sich solche Vorgänge nur durch das korrelierte Auftreten diverser Faktoren, Handlungsabfolgen und Phänomene erklären, so dass erst durch die komplexe Vernetzung dieser Erscheinungen und Umstände das Erreichen eines Wendepunkts verwirklicht wird. Dabei spielt die Veränderung des kulturellen Kontexts eine wesentliche Rolle, sowie die Entwicklung neuer geistiger Strömungen, wie der Fortschritt des Humanismus an der Schwelle zwischen Mittelalter und Renaissance.<sup>82</sup> In der Architekturentwicklung des Etappenwechsels zwischen Mittelalter und Renaissance, lassen sich jedoch einige essentielle Schlüsselmomente erkennen. Diese punktuell erscheinenden, zeitlichen Instanzen waren massgeblich an der Aktivierung und dem Vorantreiben dieser Entwicklung beteiligt, wobei aus wissenschaftlicher Sicht betrachtet, es wichtig ist dass bei ihrer Identifizierung ein wissenschaftlicher Konsens betreffend ihrer Relevanz herrscht. In der weiteren Textführung werden diese Faktoren aufgeführt und in ihrem zeitlichen Zusammenhang analysierend beurteilt. Von einer globalen Ebene aus betrachtet, bestimmt Herbert Ricken den Wandel der europäischen Machtstrukturen als vorrangigen Auslöser. Ricken bindet die Veränderungen der Art

---

<sup>81</sup> Binding, G.: „Meister der Baukunst. Geschichte des Architekten und Ingenieurberufes“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2004, S. 146.

<sup>82</sup> Vgl. Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996, S. 44 ff.

der Berufsausübung des Architekten an die politisch-strukturellen Umschichtungen der Zeit:

*„Natürlich haben sich in den etwa achthundert Jahren mittelalterlichen Baukunst erhebliche Wandlungen im Beruf des Architekten vollzogen, die geprägt werden durch den Übergang vom frühmittelalterlichen, naturwissenschaftlichen Feudalismus zur spätmittelalterlichen Geldwirtschaft in den Städten. Die Herausbildung zentralistisch regierter Feudalstaaten in Frankreich und England schuf neue Bedingungen für das Wirken des Architekten.“<sup>83</sup>*

Ricken deutet damit indirekt auf die Rolle der Bauherren hin, wie auch auf die Veränderung der Wirtschaftsordnung, Herrschafts- und Gesellschaftsverhältnisse und die sich daraus ableitenden Implikationen auf der Ebene der Auftraggeber und deren finanzielle und kulturelle Potenz. Die These der graduellen Veränderung des Berufs, vom Modell des Baumeisters zum Modell des Architekten, wie zuvor von Binding formuliert, wird auch von Carpo unterstützt, wobei dieser den Bauplan als wichtigen Veränderungsgrund in den Diskurs einführt.<sup>84</sup> Eines der wesentlichen Auslöser für den Übergang vom Baumeister zum Architekten lag in der Einführung der Ausführungspläne in der Renaissance. Dies soll nicht bedeuten, dass vor der Renaissance zeichnerische Planung nicht zum Einsatz kam. Ganz im Gegenteil, die Baumeister und Steinmetze der Gotik benutzten zum Vorzeichnen Schablonen und Risse, aber *„obwohl der Architekt der Gotik verschiedene Pläne und Detailvorlagen konzipierte, fiel die von ihm eingenommene Rolle anders aus als die eines gebildeten und losgelösten Architekten der Renaissance“*.<sup>85</sup> Durch die Weitergabe der Bauinformation über die Ausführungsplanung war die Anwesenheit des Baumeisters auf der Baustelle nicht mehr zwingend, da die genauen Ausführungsvorgaben mittels der Baupläne weitergereicht werden konnten, so dass *„die räumliche Distanz Hand in Hand ging mit der wachsenden intellektuellen und sozialen Entfremdung zwischen Architekt und Baumeister“*.<sup>86</sup> Die Entwicklung des Werkplans, zu der Zeit natürlich ausschließlich manuell gezeichnet, hat somit massgeblich die Trennung zwischen dem Intellektuellen und dem Ausführenden hervorgerufen. Auch Branko Kolarevic lokalisiert das Schisma zwischen Entwerfen und Konstruktion im Zeitalter der späten Renaissance und bringt es in Verbindung mit dem Auftreten des Bauplans und der perspektivischen Darstellung.<sup>87</sup> Carpo stellt den Ausführungsplan in Relation mit dem

---

<sup>83</sup> Ricken, H.: „Der Architekt. Geschichte eines Berufs“, Henschelverlag Kunst und Gesellschaft, Berlin, 1977, S. 27.

<sup>84</sup> Carpo, M.: „Alphabet und Algorithmus“, transcript Verlag, Bielefeld, 2012, S. 32.

<sup>85</sup> Schumacher, P.: „The Autopoiesis of Architecture. A New Framework for Architecture“, Wiley Verlag, Chichester, 2011, S. 78.

<sup>86</sup> Carpo, M.: „Alphabet und Algorithmus“, transcript Verlag, Bielefeld, 2012, S. 19.

<sup>87</sup> Kolarevic, B.: „Information Master Builders“, S. 57 In: Kolarevic, B. (Hrsg.): „Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing“, Taylor and Francis, New York, 2009.

Paradigma der Identikalität.<sup>88</sup> Dies bedeutet, dass der hauptsächliche Anspruch an die Bauausführenden darin liegt ein gebautes Abbild des auf den Plänen dargestellten Bildes zu generieren. Es stimmt jedoch, dass in der Renaissance durch das Auftreten des Bauplans eine Distanzierung des Architekten von der konstruktiven Natur der Architektur stattfand, welche in der Industrialisierung mit der Trennung der Pariser *École des Beaux Arts* von der *École Polytechnique* ihren Höhepunkt fand.<sup>89</sup> Wie zuvor erwähnt, wird diese Spaltung im Bereich der Architektur- und Ingenieurwissenschaften in dem dafür designierten Kapitel bezüglich der Industrialisierung näher analysiert.

Ein weiterer bestimmender Faktor des Wandels stellt die Erfindung des Buchdrucks dar, welche ebenfalls eine essentielle Rolle bei dem Ablösen der mittelalterlichen Bautradition gespielt hat. Die enge Zusammenarbeit in den mittelalterlichen Bauhöfen beruhte auf einer interdisziplinären Kommunikation und Interaktion, wobei die Wissensweitergabe überwiegend eher mündlicher und praxisbezogener Natur war, so dass durch den Buchdruck die Wissensweitergabe über veröffentlichte Schriften erfolgen konnte: „*Holzschnitt und Kupferstich boten weit bessere Möglichkeiten zur Verbreitung architektonischer und kunsthandwerklicher Vorlagen als die handgezeichneten Musterbücher der Hüttenmeister und die sorgsam bewahrten Plansammlungen.*“<sup>90</sup> Der serielle Buchdruck öffnete die Wege zur flächendeckenden Verbreitung von „*Regelwerken, Musterbüchern und Vitruv-Kommentaren*“<sup>91</sup> Wissen bezüglich des Entwerfens oder der Fabrikation war dadurch leichter weiterzugeben, anzusammeln und zu konservieren.

### 3. Fillippo Brunelleschi - Das Paradigma des Baumeisters

#### Zum biographischen Hintergrund

Das Leben und geschaffene Werk des florentinischen Baumeisters Fillippo Brunelleschi ist, anders als bei Alberti, erst ab seinem 40. Lebensjahr detailreich dokumentiert. Zwar sind einzelne Details über seinen persönlichen und beruflichen Werdegang bekannt, viele seiner Bauten, die vor dieser Periode erschaffen wurden, wurden entweder zerstört oder sind ihm nicht mehr klar zuzuordnen.<sup>92</sup> Die Anfänge Fillippo Brunelleschis sind im Handwerk verankert, wobei er laut historischen

<sup>88</sup> Vgl. Carpo, M.: „Alphabet und Algorithmus“, transcript Verlag, Bielefeld, 2012, S. 30 ff.

<sup>89</sup> Vgl. Giedion, S.: „Raum. Zeit. Architektur. Die Entstehung einer neuen Tradition“, Birkhäuser Verlag, Basel, 1996, S. 157.

<sup>90</sup> Ricken, H.: „Der Architekt. Geschichte eines Berufs“, Henschelverlag Kunst und Gesellschaft, Berlin, 1977, S. 39.

<sup>91</sup> Ebd., S. 56.

<sup>92</sup> Vgl. Battisti, E.: „Fillippo Brunelleschi. Das Gesamtwerk“, Belser Verlag, Stuttgart Zürich, 1979, S. 13 ff.

Übermittlungen eine Ausbildung zum Goldschmied abgeschlossen hatte, so dass er 1402 als Goldschmied in die *Arte della Seta*, die Zunft der Seidenweber, aufgenommen wurde.<sup>93</sup> Ab dem 12. Jahrhundert beschreibt die Bezeichnung der Zunft, länderabhängig auch als *arti* oder *metiers* betitelt, die städtischen gewerblichen Verbände, welche die Interessen des Handwerks vertraten.<sup>94</sup> Abgesehen von der Betätigung als Goldschmied war Brunelleschi ein anerkannter Bildhauer, wobei sich das Kreuzifix in der Florentiner Kirche Santa Maria Novella zu seinen bildhauerischen Werken zählen lässt.<sup>95</sup> Brunelleschi erlangte während seiner Lebenszeit große Anerkennung und Bewunderung als Entwerfer von Baumaschinen, bei deren Entwicklung er auf seine als Goldschmied und Uhrenbauer akkumulierten Kenntnisse zurückgreifen konnte.<sup>96</sup> So wurde zum Beispiel eine der von ihm entworfenen Baumaschinen von Leonardo da Vinci übernommen und zur Positionierung der Laternenkugel, in einer Höhe von 114 Metern auf dem Florentiner Dom eingesetzt.<sup>97</sup> Zu seinem weiteren Tätigkeitsfeld gehörte das Militärwesen, der Schiffs- und Wasserbau.<sup>98</sup> Brunelleschis technisches Verständnis und seine Expertise im Bereich der Mechanik reichten so weit, dass er sich sogar ein Patent für das Erfinden einer neuartigen Schiffsart, die selbst in flachen Gewässern schwere Lasten transportieren konnten, ausstellen ließ.<sup>99</sup> Des Weiteren war Brunelleschi ein anerkannter Mauertechniker, da er sich selber mit der Ziegelproduktion befasste und die alten römischen Mauertechniken studiert hatte. Diese Bewandnis im Bereich des Ziegelbaus lässt sich durch die Aktivität Brunelleschis als offizieller Gutachter für Mauerwerk belegen. Im Jahr 1412 wurde ein Gutachten für die Domfassade aus Prato benötigt. Zum einen wurde das Mauerwerk von Technikern begutachtet, zum anderen begutachteten Architekten und Bildhauer mögliche Fassadenmodelle. Bei diesem Vorgehen fand sich Brunelleschi als Vertreter der Techniker wieder.<sup>100</sup> Dies spricht erneut für die Zuordnung Brunelleschis in die Kategorie des Baumeisters, als technisch versierte und stark Praxis orientierte Persönlichkeit.

---

<sup>93</sup> Vgl. Pizzigoni, A.: „Fillippo Brunelleschi“, Verlag für Architektur, Zürich München, 1991, S. 197; Vgl. Battisti, E.: „Fillippo Brunelleschi. Das Gesamtwerk“, Belser Verlag, Stuttgart Zürich, 1979, S. 22.

<sup>94</sup> Vgl. Binding, G.: „Baubetrieb im Mittelalter“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1993, S. 102.

<sup>95</sup> Vgl. Giovannetti, B., Martucci, R.: „Architect’s Guide to Florence, Butterworth Architecture, Oxford Venedig, 1994, S. 54.

<sup>96</sup> Vgl. Fanelli, G.: „Brunelleschi“, Scala Verlag, Florenz, 1988, S. 3; Vgl. Manetti, A.: „The Life of Brunelleschi“, The Pennsylvania State University Press, 1970, S. 52.

<sup>97</sup> Vgl. Battisti, E.: „Fillippo Brunelleschi. Das Gesamtwerk“, Belser Verlag, Stuttgart Zürich, 1979, S. 13 .

<sup>98</sup> Vgl. Fanelli, G.: „Brunelleschi“, Scala Verlag, Florenz, 1988, S. 3.

<sup>99</sup> Vgl. Galluzzi, P.: „Renaissance Engineers. From Brunelleschi to Leonardo da Vinci“, Giunti Verlag, Florenz, 1996, S. 18; Vgl. Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996, S. 47.

<sup>100</sup> Vgl. Klotz, H.: „Fillippo Brunelleschi. Seine Frühwerke und die mittelalterliche Tradition“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1990, S. 53 ff.

## Der Kuppelbau der Santa Maria del Fiore in Florenz

### Terminologie: Vorbogen und Lehrgerüst

Im Vorfeld der weiteren Betrachtungen und der Analyse ist es wichtig, eine klare Definition und Differenzierung der folgenden Begriffe anzugeben: Lehrgerüst und Vorbogen. In den verschiedenen Texten, die sich mit dem Bau der Domkuppel beschäftigen, werden diese Begriffe oftmals zur Beschreibung verschiedener technischer Konstruktionen benutzt, so dass sich ein konträres Bild bezüglich der bautechnischen Beschreibung von Brunelleschis Werk bilden kann. Das richtige Verständnis dieser Begriffe stellt die Voraussetzung dar, um zum einen Brunelleschis entwickelte Fertigungsstrategie zu verstehen und zum anderen, um den Grad der Innovation richtig bewerten zu können. Um der Fehlinterpretation entgegenzuwirken, werden in der folgenden Beschreibung diese Begriffe entsprechend der von den Forschern Prager und Scaglia gebotenen Definitionen eingesetzt. **Vorbogen** und seine fremdsprachigen Äquivalenten *centering*, *centina*, *centricum*, *cintr* oder *lagging* beschreiben „eine vorgefertigte, das Mauerwerk unterstützende, von einem Lehrgerüst verstärkte Brettstruktur, welche normalerweise beim Mauern von Gewölben eingesetzt wurde und in Position blieb bis die Bindung und das Schwinden des Mörtels weitestgehend abgeschlossen waren, um dann sorgfältig entfernt zu werden, so dass das Mauerwerk in einer selbsttragender Form bestehen konnte.“<sup>101</sup>

Das **Lehrgerüst** oder Bogengestelle, mit deren fremdsprachigen Äquivalenten *armadura*, *armatura*, *charpente*, wird von Prager und Scaglia wie folgt definiert: „Da der Vorbogen aus einer Vielzahl von Brettern besteht, bedarf es eines Lehrgerüsts, das diese Bretter untereinander verbindet und diese zu einer rigiden Struktur vereint: ein Fachwerk, das den Vorbogen unterstützt, der seinerseits das neue Mauerwerk abstützt.“<sup>102</sup>

Diese klärenden Begriffsdefinitionen erweisen sich als sehr nützlich, da sich ein falscher Gebrauch der Terminologie auch bei Übersetzungen der Originaltexte antreffen lässt, so dass ein Missverständnis der korrekten Verhältnisse gefördert wird. Als prägnantes Beispiel dafür kann die doppelsprachige Ausgabe der Biografie Brunelleschis angeführt werden.<sup>103</sup> Manetti gebraucht in seinem Originaltext das Wort *armadura* und bezieht sich damit eindeutig auf das komplexe Lehrgerüst. In der englischen Version wird jedoch *armadura* mit *centering*, also dem Vorbogen, übersetzt.

<sup>101</sup> Prager, F.D., Scaglia, G.: „Brunelleschi, Studies of his Technology and Inventions“, Dover Publications, New York, 1970, S. 47.

<sup>102</sup>Ebd., S. 47.

<sup>103</sup> Manetti, A.: „The Life of Brunelleschi“, The Pennsylvania State University Press, 1970, S. 67.



---

1. Porträtbüste von Filippo Brunelleschi, Andrea Cavalcanti, Dommuseum, Florenz

## Die Bauaufgabe

Eine der wichtigsten Bauleistungen Brunelleschis bezieht sich auf den Bau der Kuppel für die Kathedrale *Santa Maria del Fiore* in Florenz. Der Florentiner Dom wartete durch den abschließenden Bau der Kuppel auf seine Fertigstellung, so dass 1367 die zuständige Dombaubebehörde, *opera del duomo*, acht Baumeister zum Einreichen von Entwurfs- und Realisierungsvorschlägen für den Bau der Kuppel aufforderte.<sup>104</sup> Bei der Ausschreibung der Bauaufgabe wurde von dem zukünftig ausführenden Baumeister das Einhalten eines vorgegebenen Maßsystems verlangt, so dass der Kuppeldurchmesser mit 72 braccio, eine in Italien gängige Längenmasseinheit, die der Elle entspricht, also 41,97 Metern, zu beachten war.<sup>105</sup> Der Hauptschwerpunkt der ausgeschriebenen Bauaufgabe bezog sich auf die konstruktive Realisierung des Lehrgerüsts und des dazugehörigen Vorbogens. Manetti schildert, dass bei allen eingereichten Modellen die Architekten bzw. Baumeister davon ausgingen, dass der Bau der Kuppel ausschließlich durch ein immenses Lehrgerüst, im Italienischen von Manetti als *armadura* bezeichnet, gewährleistet werden konnte.<sup>106</sup> Um die Schwierigkeit der Bauaufgabe zu kontextualisieren, muss bemerkt werden, dass die Teilnehmenden bei der Bewältigung dieser baukonstruktiven Probleme nicht auf fremde Erfahrungswerte anderer europäischer Baumeister oder Architekten zurückgreifen konnten, zumal „*seit der Errichtung des Pantheons keine Kuppelbauten mit vergleichbaren Ausmaßen entstanden waren.*“<sup>107</sup> Aufgrund der Dimension des Domes mit einem Durchmesser von über 40 Metern konnte der Einsatz eines fixen hölzernen Lehrgerüsts aus wirtschaftlichen wie auch aus Realisierungsgründen nicht in Erwägung gezogen werden, so dass Brunelleschi einen anderen Lösungsansatz, dem Einsatz mobiler und verschiebbarer Gerüste, für die Sicherstellung des Baus verfolgt hat.<sup>108</sup> Brunelleschis Vorschlag zeichnete sich somit dadurch aus, dass es eine Lösung anbot, die als einzige auf den Einsatz eines Lehrgerüsts verzichtete. Aus den Dokumenten der *opera*, auf welche sich auch Prager und Scaglia berufen, geht hervor, dass Brunelleschi 1418 ein Modell, gebaut aus Ziegeln, der Dombaubebehörde vorgelegt hat, welches ohne den Einsatz eines zentralen Lehrgerüsts zur Unterstützung der Vorbögen auskam.<sup>109</sup> Dieses Modell, das bislang als verschollen gilt, wurde von vier Maurern im Maßstab 1:20 innerhalb von 90 Tagen

---

<sup>104</sup> Vgl. Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996, S. 46.

<sup>105</sup> Ebd., S. 51

<sup>106</sup> Vgl. Manetti, A.: „The Life of Brunelleschi“, The Pennsylvania State University Press, 1970, S. 66.

<sup>107</sup> Fanelli, G.: „Brunelleschi“, Scala Verlag, Florenz, 1988, S. 11.

<sup>108</sup> Vgl. Giovannetti, B., Martucci, R.: „Architect’s Guide to Florence, Butterworth Architecture, Oxford Venedig, 1994, S. 55.

<sup>109</sup> Vgl. Prager, F.D., Scaglia, G.: „Brunelleschi, Studies of his Technology and Inventions“, Dover Publications, New York, 1970, S. 27.

angefertigt und wies einen hohen Detaillierungsgrad auf.<sup>110</sup> Im Anschluss darauf, wurden im Jahr 1420 Fillippo Brunelleschi, Lorenzo Ghiberti und Antonio di Battista für den Kuppelbau als ausführende Baumeister ernannt.<sup>111</sup> Während sich Brunelleschi mit dem Bau und der Baustelle beschäftigte, kann Ghibertis Rolle als ein „*Garant der Erfüllung von Bauherreninteressen*“<sup>112</sup> gesehen werden. Sowohl Manetti als auch Vasari beschreiben die Zusammenarbeit zwischen Brunelleschi und Ghiberti als konfliktreich und obwohl beide als theoretisch gleichrangige Bauleiter galten, so bestätigen die Chroniken dass Brunelleschi die führende Position zuzuschreiben ist, während Ghiberti ab 1427 aus seiner Position verdrängt wurde, so dass sämtliche Autorität an Brunelleschi übertragen wird.<sup>113</sup> Bevor Brunelleschi als offizieller Baumeister durch die *opera del duomo* ernannt wurde, hatte er Schwierigkeiten öffentliche Behörden, Prüfer und Handwerker von der Machbarkeit seiner Strategie zu überzeugen, so dass der Prozess der offiziellen Beauftragung durch die *opera* als komplex und langwierig einzuschätzen ist. In diesem Zusammenhang berichtet Manetti von mehreren Treffen im Zeitraum von 1417 und 1419 zwischen Brunelleschi und den Vertretern der Dombaubebehörde.<sup>114</sup> Diese Treffen dienten dazu die *opera* von seinen Kompetenzen, Fähigkeiten und der technischen Machbarkeit seiner Bautechnologie zu überzeugen. Nach der Erwägung und Analyse unterschiedlicher Bauvorschläge wurde Brunelleschi, der zu seiner Zeit den Ruf eines vollendeten Bautechnikers und Erfinders genoss, mit dem Bau der Kuppel beauftragt, wobei nachzuweisen war, „*dass er die technischen Voraussetzungen beherrschte, den Tambour, der nahezu dem Durchmesser des Pantheon entsprach, mit Hilfe eines Lehrgerüsts zu überwölben. Das Konstruktionsverfahren stand im Vordergrund der Überlegungen.*“<sup>115</sup> Diesen Nachweis erbrachte er durch das Vorzeigen eines Modells und das Zusammenstellen eines von ihm eigens um 1420 geschriebenen Berichts, in welchem er seine vorgeschlagene Bautechnik umschreibt. Manetti zitiert in der, über Brunelleschi verfassten, Biografie umfangreich aus diesem Dokument, welches das Modell unterstützend bedient.<sup>116</sup> Die Einheit aus Modell und erklärendem Bericht wurde mit dem Namen *modellum* bezeichnet, wobei es keine weiterführenden

<sup>110</sup> Vgl. Prager, F.D., Scaglia, G.: „Brunelleschi, Studies of his Technology and Inventions“, Dover Publications, New York, 1970, S. 30-31.

<sup>111</sup> Vgl. Battisti, E.: „Fillippo Brunelleschi. Das Gesamtwerk“, Belser Verlag, Stuttgart Zürich, 1979, S. 122; Vgl. Prager, F.D., Scaglia, G.: „Brunelleschi, Studies of his Technology and Inventions“, Dover Publications, New York, 1970, S. 30.

<sup>112</sup> Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996, S. 46.

<sup>113</sup> Vgl. Manetti, A.: „The Life of Brunelleschi“, The Pennsylvania State University Press, 1970, S. 88-90; Vgl. Galluzzi, P.: „Renaissance Engineers. From Brunelleschi to Leonardo da Vinci“, Giunti Verlag, Florenz, 1996, S. 20.

<sup>114</sup> Vgl. Manetti, A.: „The Life of Brunelleschi“, The Pennsylvania State University Press, 1970, S. 62-66.

<sup>115</sup> Klotz, H.: „Fillippo Brunelleschi. Seine Frühwerke und die mittelalterliche Tradition“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1990, S. 53.

<sup>116</sup> Vgl. Manetti, A.: „The Life of Brunelleschi“, The Pennsylvania State University Press, 1970, S. 70-76.

Aufzeichnungen über das Einreichen von Bauplänen gibt.<sup>117</sup> Daraus ist zu entnehmen, dass Brunelleschi tatsächlich eine ausgereifte Baustrategie vorzuweisen hatte, da er in der schriftlichen Beschreibung die wesentlichen bautechnischen Aspekte aufzählt, ohne sie jedoch näher detailliert auszuführen: Aspekte betreffend der wichtigsten Charakteristika des Baus wie Kuppeldimension, Rippen, Doppelschaligkeit, Ringanker aus Stein und Holz, Materialität der Kuppel und Wasserrinnen werden erwähnt. Trotz dieses ausführlichen Berichts wurden von der *opera* weitere Sicherheitsmassnahmen getroffen. Aufgrund des hohen Innovationsgrades der von Brunelleschi vorgeschlagenen Bauweise und dem Fehlen vorausgehender Erfahrungen mit solchen Strukturen bestand eine gewisse Zurückhaltung bei der Dombaubebehörde bezüglich der spekulierten Erfolgsaussichten. Aus diesem Grund wurde zunächst nur ein erster Bauabschnitt der gemauerten Kuppel bis zu einer Höhe von 14 braccia genehmigt.<sup>118</sup> Bereits nach dem Erreichen der Hälfte der vorgegebenen Bauhöhe war die Dombaubebehörde von Brunelleschis technischem Können weitestgehend überzeugt, so dass er anschließend allein mit der Leitung der Baustelle, dem Bau der Laterne und anderen, die Kirche betreffenden, Bauarbeiten beauftragt wurde.<sup>119</sup>

### **Baustrategie und Ausführung**

Einleitend muss spezifiziert werden, dass mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen wird, dass bei dem Bau der Kuppel die im Folgenden beschriebenen Techniken und Methoden betreffend Bau- und Lehrgerüste, Schalung, Vorbögen und den aussteifenden Stein- und Holz-Ringanker benutzt wurden. Jedoch aufgrund einer lückenhaften Dokumentation ist eine absolute Sicherheit nicht gegeben und im Nachhinein nicht möglich zu erreichen.<sup>120</sup>

Der Baubeginn der Domkuppel lässt sich auf das Jahr 1420 datieren, wobei ihre vollständige Errichtung sechzehn Jahre in Anspruch genommen hat. Um die Dimension der bautechnischen Leistung Brunelleschis besser zu veranschaulichen, kann die Bemerkung gemacht werden, dass es sich bei der Florentiner Kuppel um den größten Dom handelt, der ohne den Einsatz eines zentralen und fixen hölzernen Lehrgerüsts gebaut wurde.<sup>121</sup> Wie zuvor erwähnt, gab es seit dem Pantheon keinen in seinem Durchmesser vergleichbaren Kuppelbau. Dadurch stand auch keine angemessene Bautechnologie und kein Modell für die damit einhergehende

<sup>117</sup> Vgl. Prager, F.D., Scaglia, G.: „Brunelleschi, Studies of his Technology and Inventions“, Dover Publications, New York, 1970, S. 31.

<sup>118</sup> Vgl. Manetti, A.: „The Life of Brunelleschi“, The Pennsylvania State University Press, 1970, S. 76.

<sup>119</sup> Ebd., S. 90.

<sup>120</sup> Vgl. Galluzzi, P.: „Renaissance Engineers. From Brunelleschi to Leonardo da Vinci“, Giunti Verlag, Florenz, 1996, S. 21; Vgl. Prager, F.D., Scaglia, G.: „Brunelleschi, Studies of his Technology and Inventions“, Dover Publications, New York, 1970, S. 51.

<sup>121</sup> Vgl. Galluzzi, P.: „Renaissance Engineers. From Brunelleschi to Leonardo da Vinci“, Giunti Verlag, Florenz, 1996, S. 94.

Bauorganisation zur Verfügung, so dass Brunelleschi innovative Lösungen für beide Problematiken entwickeln musste.<sup>122</sup>

### Die Gerüste

Um den hohen Grad an Innovation in der Fertigung würdigen zu können, muss die zu der Zeit gängige Bautradition bei dem Errichten von Kuppelbauten umschrieben werden. Der Einsatz eines außenliegenden Baugerüsts und eines innenliegenden Lehrgerüsts war beim Kuppelbau üblich.<sup>123</sup> Dies brachte erhebliche Nachteile mit sich, da das Lehrgerüst einen großen Materialaufwand voraussetzte und das Arbeiten der Handwerker im Inneren einer Kuppel unmöglich wurde, so dass sämtliche Arbeiten nach Außen verlagert werden mussten. Dieser Schritt verlangte unumgänglich nach dem Einsatz eines außenliegenden Baugerüsts als Arbeitsebene, so dass erneut ein nicht unerheblicher Materialeinsatz notwendig war. Zusätzlich dazu, wurden bei den in der Gotik gebauten Kuppeln ein außenliegendes Strebewerk zur Aussteifung und Stabilisierung gebaut.<sup>124</sup> Der Florentiner Baumeister entschied sich für den Bau einer doppelschaligen Kuppel, wollte jedoch auf das Benutzen von Strebe Pfeilern und -bögen verzichten. Brunelleschis Baustrategie sieht den Einsatz eines großen Baugerüsts im Inneren der Kuppel vor. Bei diesem Baugerüst handelt es sich nicht um ein Lehrgerüst, sondern um ein Arbeitsgerüst, denn es erfüllt die Funktion einer Arbeitsplattform von der aus die Handwerker das Mauern der Kuppel vornehmen können.<sup>125</sup> Auch verzichtet Brunelleschi auf die klassische Art des Vorbogens. Er entwickelt die Methode des Freihandbauens von Gewölben, „*die als eine Weiterentwicklung der gotischen cintre permanent - Methode betrachtet werden kann.*“<sup>126</sup> Prager und Scaglia gehen aufgrund fehlender historischer Befunde, die eine solche Methode des Mauerns erwähnen, davon aus, dass Brunelleschi als der Erfinder dieser gelten kann.<sup>127</sup>

Eine der wichtigsten bautechnischen Innovationen, die Brunelleschi zugeschrieben wird, ist der Bau von Gewölben ohne den Einsatz eines Lehrgerüsts.<sup>128</sup> Laut Prager und Scaglia kam diese Art der Mauertechnik auch bei der Florentiner Kuppel zum

---

<sup>122</sup> Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996, S. 46.

<sup>123</sup> Prager, F.D., Scaglia, G.: „Brunelleschi, Studies of his Technology and Inventions“, Dover Publications, New York, 1970, S. 50.

<sup>124</sup> Ebd., S. 58-59.

<sup>125</sup> Ebd., S. 24.

<sup>126</sup> Ebd., S. 50.

<sup>127</sup> Ebd., S. 51.

<sup>128</sup> Ebd., S. 47.

Einsatz, so dass der Einsatz von Ankern und eines außenliegenden Gerüsts umgangen wurde und anstelle dessen nur ein innenliegendes Gerüst eingesetzt wurde.<sup>129</sup>

### Die Doppelschaligkeit der Kuppel

In der Abwesenheit eines Präzedenzfalls, eines ihm zeitnahen Bauvorhabens ähnlicher Natur, orientierte sich Brunelleschi an den römischen und teilweise auch islamischen Fertigungstechniken im Bereich des Bogenbaus und der Mauerungstechnik.<sup>130</sup> Manetti bestätigt Brunelleschi Auseinandersetzung mit der römischen Architektur und den spezifischen Bauweisen, so dass Brunelleschi die Wiederentdeckung einer, zu seiner Zeit von den Bautätigen vergessenen, römischen Bautechnik bezüglich des Einsatzes von metallenen Zugankern und Ringankern beim Bau einschaliger Kuppeln zugesprochen wird.<sup>131</sup> Brunelleschi vermischte diese römische mit der gotischen Bautechnik und führte aussteifende, über Metall- und Holzanker verbundene Ringanker mit der Doppelschalenbauweise der Gotik zusammen, was in einer technischen Innovation mündete.<sup>132</sup> Dieses Hybrid der Bauformen generiert Strukturen mit einer erhöhten statischen Stabilität, was sich nur vorteilhaft auf den geplanten Kuppelbau auswirken konnte.<sup>133</sup> Im Rahmen dieser technischen Erfindung, sprechen Prager und Scaglia von der durch Brunelleschi initiierten „*Erneuerung des römischen Mauerwerks*“.<sup>134</sup> Zur Maximierung der statischen Stabilität der Kuppel führte Brunelleschi über Metallanker miteinander verbundene Ringe aus Sandsteinblöcken ein:

*„Die Kuppel beinhaltet Ringe aus Sandsteinblöcken, miteinander verbunden über Metallklemmen und welche die Wände und ihre Rippen gegen seitliches Ausdehnen schützt.“*<sup>135</sup>

Abgesehen davon wird auch die Doppelschalenkonstruktion den statischen Ansprüchen angepasst. Die Doppelschalen der Kuppel unterscheiden sich in ihrer Dicke, denn während die innere Schale eine konstante Dicke aufweist, ist die

---

<sup>129</sup> Prager, F.D., Scaglia, G.: „Brunelleschi, Studies of his Technology and Inventions“, Dover Publications, New York, 1970, S. 71.

<sup>130</sup> Vgl. Fanelli, G.: „Brunelleschi“, Scala Verlag, Florenz, 1988, S. 11; Vgl. Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996, S. 50.

<sup>131</sup> Prager, F.D., Scaglia, G.: „Brunelleschi, Studies of his Technology and Inventions“, Dover Publications, New York, 1970, S. 58.

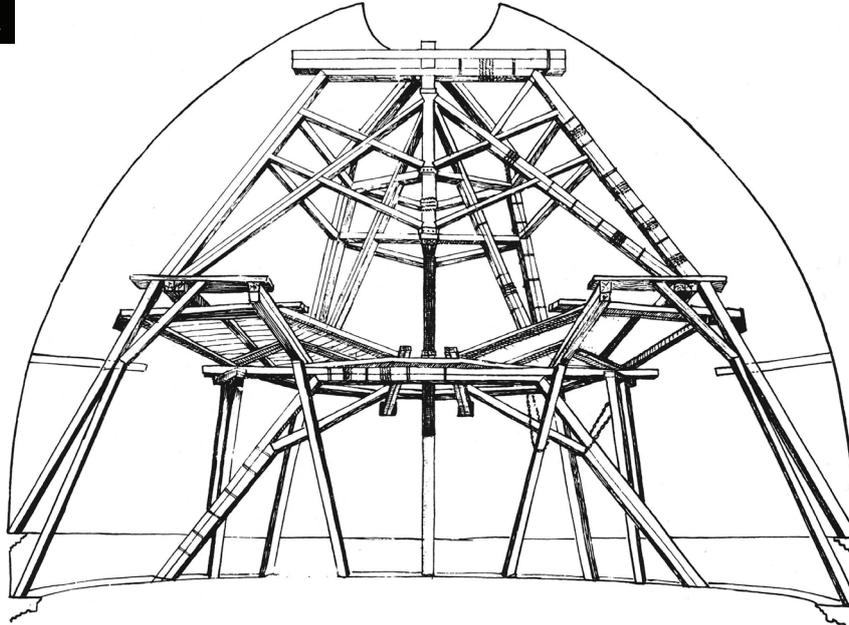
<sup>132</sup> Ebd., S. 59.

<sup>133</sup> Ebd., S. 59.

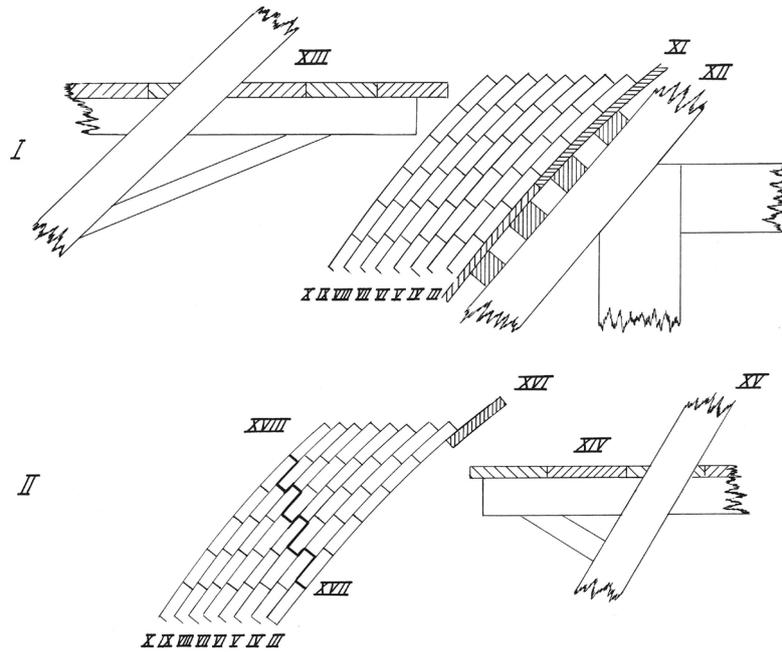
<sup>134</sup> Ebd., S. 59.

<sup>135</sup> Ebd., S. 57.

2.



3.



2. Mögliche Variante des Lehrgerüsts bzw. der *armadura*
3. Die Version des innenliegenden Gerüsts, verglichen mit der außenliegenden Option

Aussenschale von einer sich nach oben hin verjüngenden Materialstärke geprägt.<sup>136</sup> Durch das Treffen der Entscheidung zum Bau einer doppelschaligen Kuppel und durch die gewählte Mauerungstechnik entstand eine in ihrer Gesamtheit selbsttragende Kuppel.<sup>137</sup> Fanelli bezeichnet diese als eine „*wachsende selbsttragende Strukturform*“.<sup>138</sup> Bei den Mauerungsarbeiten wurden beide Schalen zeitgleich hochgemauert.<sup>139</sup> Es handelt sich um ein zum größten Teil schalungsfrei gebautes Mauerwerk, was durchaus bemerkenswert ist, berücksichtigt man die Dimension der Wölbung. Eine Schalung wurde erst in der letzten Etappe des Kuppelbaus benötigt, „*als die oben erläuterte Kegelneigung so steil wurde, dass trotz der Kohäsion des frischen Mörtels die Ziegel zwischen den eingebundenen, senkrechten Verbänden herauszurutschen drohten.*“<sup>140</sup>

Abgesehen von der primären statischen Funktion der Doppelschale erfüllt diese zusätzlich eine wichtige Rolle bezüglich des Temperatur- und Feuchtigkeitsausgleichs zwischen Innen- und Aussenraum.<sup>141</sup> Der Zwischenraum funktioniert wie eine dämmende Luftschicht, welche eine regulierende Wirkung auf die Raumklima hat. Beide Schalen weisen Löcher auf, welche zur Positionierung der Gerüste benutzt wurden und die gleichzeitig als Perforationen der Schalen einen wichtigen Zweck im Sinne eines vereinfachten Systems zur Lüftungs- und Raumkonditionierung erfüllen. Der Raum zwischen beiden Schalen ist begehbar und beinhaltet vier gestaffelte innenliegende Gänge. Während der Bauzeit wurde dieser Zwischenraum auf Anweisung von Brunelleschi zur Verpflegung der ausführenden Bauarbeiter und Handwerker benutzt, wobei dort selbst eine Küche untergebracht war.<sup>142</sup> Die Beweggründe des Florentiners zum Treffen dieser Entscheidung lagen in der Sicherung eines kontinuierlichen Arbeitsablaufs und der Zufriedenstellung der Ausführenden, so dass dadurch eine Prozessoptimierung und -effizientisierung erreicht wurde.

Brunelleschi widmete sich nicht nur den Themen der Baukonstruktion und der Bautechnik, sondern auch der Materialität der Kuppel. Durch seine Anwesenheit bei den Ziegeleien, beschäftigte sich Brunelleschi ebenfalls intensiv mit den Hauptbaumaterialien für die Kuppel, den Ziegeln und dem Mörtel, ihren

---

<sup>136</sup> Vgl. Galluzzi, P.: „Renaissance Engineers. From Brunelleschi to Leonardo da Vinci“, Giunti Verlag, Florenz, 1996, S. 95.

<sup>137</sup> Vgl. Giovannetti, B., Martucci, R.: „Architect’s Guide to Florence, Butterworth Architecture, Oxford Venedig, 1994, S. 55.

<sup>138</sup> Fanelli, G.: „Brunelleschi“, Scala Verlag, Florenz, 1988, S. 11.

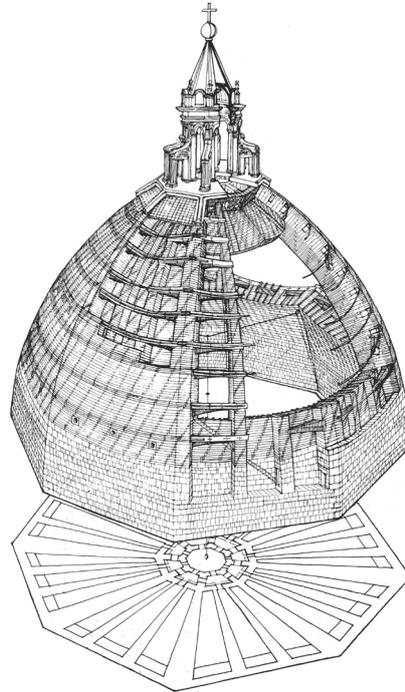
<sup>139</sup> Vgl. Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996, S. 51.

<sup>140</sup> Ebd., S. 50.

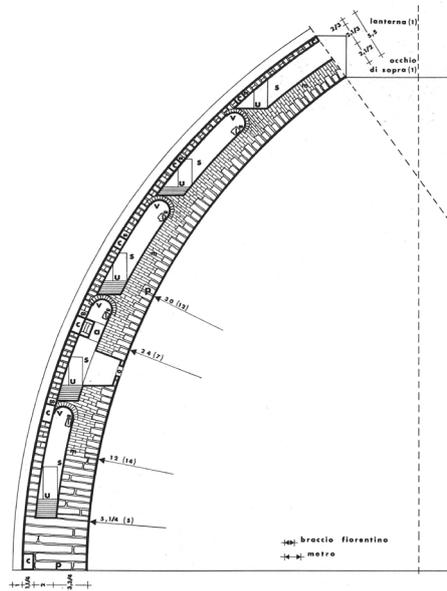
<sup>141</sup> Vgl. Fanelli, G.: „Brunelleschi“, Scala Verlag, Florenz, 1988, S. 21; Vgl. Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996, S. 50.

<sup>142</sup> Ebd., S. 51.

4.



5.



- 4. Gesamtstruktur der Domkuppel
- 5. Aufbau der Doppelschale

Herstellungsweisen, dem Brennverfahren bis hin zur Materialbeschaffenheit und dem gewählten Mischverhältnis.<sup>143</sup>

### **Modelle**

Ebenso wie heute, stellten auch im Quattrocento Modelle ein wichtiges Entwurfsinstrument dar, so dass bei öffentlichen Wettbewerben oftmals ausschließlich Modelle als Übermittler der Entwurfsidee eingereicht wurden.<sup>144</sup> In diesem Zusammenhang unterscheidet der Forscher Henry Millon zwischen den verschiedenen Zwecken, die von den Modellen erfüllt werden mussten. Abgesehen von Wettbewerbsmodellen, identifiziert dieser Präsentations-, Ausführungs- und Detailmodelle.<sup>145</sup> Für Brunelleschi stellten die Ausführungsmodelle während des Bauvorgangs ein essentielles Glied in der Kette der Entwicklung einer Bautechnik und Baustrategie dar, sowie auch für die Informationsweitergabe. Die Entwicklungen auf der Baustelle wurden von der parallelen Fertigung diverser Modelle des Doms begleitet. Diese Modellserien wurden parallel zu unterschiedlichen Bauphasen angefertigt und spiegeln die Etappen der Bauphasen wieder. Das Modell war dadurch Brunelleschis wichtigstes Planungswerkzeug. Die Modelle wurden zum erklärenden Veranschaulichen der Baustrategie gegenüber den Handwerkern, als auch der Dombaubebehörde, benutzt. Manetti erwähnt mehrfach den Einsatz von Modellen. So spricht er zum Beispiel im Jahr 1418 von einem für die Dombaubebehörde gefertigten Holzmodell, das den Kuppelbau veranschaulichen sollte.<sup>146</sup> Um den Steinmetzmeistern und den Stahlhändlern die Ausführungs- und Funktionsweise seiner Sandstein- und Stahlringe näher zu erläutern, ließ Brunelleschi mehrere Modelle aus Lehm, Wachs, Holz und selbst aus Rüben anfertigen, um seine verfolgte Baustrategie verständlich zu machen.<sup>147</sup> Ein beispielsweise 1421 angefertigtes Modell veranschaulichte die Art der Fixierung der steinernen Ringanker mit den Domrippen.

### **Bautechnische Innovationen bei Brunelleschi**

Paulgerd Jesberg ordnet die Entwicklung vier wesentlicher bautechnischer Innovationen Brunelleschi zu: »spina pesce«, *„ein Mauerwerksverband im Fischgratmuster, der vermutlich aus orientalischer Handwerkstradition stammt und der die konstruktive Verzahnung zum schichtweisen Aufbau von Gewölberingen*

---

<sup>143</sup> Vgl. Manetti, A.: „The Life of Brunelleschi“, The Pennsylvania State University Press, 1970, S. 94.

<sup>144</sup> Vgl. Millon, H. A.: „Italienische Architekturmodelle im 16. Jh.“, S. 25, In: Evers, B. (Hrsg.): „Architekturmodelle der Renaissance. Die Harmonie des Bauens von Alberti bis Michelangelo“, Prestel Verlag, München, New York, 1995.

<sup>145</sup> Ebd., S. 26.

<sup>146</sup> Manetti, A.: „The Life of Brunelleschi“, The Pennsylvania State University Press, 1970, S. 80; Prager, F.D., Scaglia, G.: „Brunelleschi, Studies of his Technology and Inventions“, Dover Publications, New York, 1970, S. 60.

<sup>147</sup> Vgl. Manetti, A.: „The Life of Brunelleschi“, The Pennsylvania State University Press, 1970, S. 92.

nutzt“<sup>148</sup> und die »corda branda«, „Zuganker, aus einer Kombination von Eichenbrettern und schmiedeeisernen Ketten“.<sup>149</sup> Eine weitere Innovation Brunelleschis ist die Mauertechnik »cresce e vela«, der steigenden Segel. Der Name bezeichnet eine Methode zur Vermeidung des Auftretens von Rissen im Mauerwerk, so dass zur Stabilitätssteigerung die beiden Kuppelschalen über ineinandergreifend gemauerte vertikale und horizontale Rippen miteinander verbunden werden.<sup>150</sup> Manetti erwähnt ebenfalls diese Technik des Mauern in Brunelleschis Biographie und fügt dabei hinzu, dass es sich beim dem Dom um das erste Florentinische Bauwerk handelt, bei dem diese Technik zum Einsatz kam.<sup>151</sup> Zu der von Jesberg genannten Reihe gehört noch ein Maßsystem namens »qualendrive con tre cordas«. Um beim Bau die Berücksichtigung und das Einhalten der Kuppelgeometrie zu garantieren, benutzte Brunelleschi „ein gleichschenkliges Dreieck, aus Ketten gebildet, das an Fußpunkten im Tambour befestigt wird.“<sup>152</sup>

### **Brunelleschi und der Maschinenbau**

Die Weiterentwicklung und das Erfinden unterschiedlichster Maschinen war fester Bestandteil von Brunelleschis Arbeitsspektrum. Die Baubarkeit der Kuppel wurde erst durch die Entwicklung von Brunelleschis Baumaschinen garantiert.<sup>153</sup> Brunelleschi hat keine Zeichnungen oder Notizen zu den von ihm entwickelten Maschinen hinterlassen. Andere Ingenieure der Zeit, die von der Funktionsweise seiner Maschinen beeindruckt waren, haben ihre technische Ausprägung und Funktionsweise mit Zeichnungen dokumentiert, so wie Francesco di Giorgio, Bonaccorso Ghiberti oder Leonardo da Vinci.<sup>154</sup>

Zu den wichtigsten Baumaschinen, die Brunelleschi erfunden hat, zählen seine Baukräne. Der von Brunelleschi entwickelte Drehkran wurde bei dem Bau der zentralen Kuppelöffnung und der darauf liegenden Laterne eingesetzt. Der Kran war zu einer 360-Grad-Umdrehung in der Lage und erreichte eine Mindesthöhe von 20 Metern.<sup>155</sup> Für die Bedienung des Krans waren vier Arbeitsgruppen notwendig. Um die technische Leistung Brunelleschis besser zu realisieren, muss diese in Relation zu

---

<sup>148</sup> Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996, S. 48.

<sup>149</sup> Ebd., S. 48.

<sup>150</sup> Ebd., S. 48.

<sup>151</sup> Manetti, A.: „The Life of Brunelleschi“, The Pennsylvania State University Press, 1970, S. 68.

<sup>152</sup> Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996, S. 48.

<sup>153</sup> Vgl. Fanelli, G.: „Brunelleschi“, Scala Verlag, Florenz, 1988, S. 11.

<sup>154</sup> Vgl. Galluzzi, P.: „Renaissance Engineers. From Brunelleschi to Leonardo da Vinci“, Giunti Verlag, Florenz, 1996, S. 99.

<sup>155</sup> Ebd., S. 104.

den im Mittelalter gängigen Baukränen gesetzt werden: „Beide Grundformen - Galgenkran oder Lastenkran mit T-förmigem Ausleger - sind vom 12. Jh. bis zum Ausgang des Mittelalters nebeneinander zu beobachten und werden mitunter auf derselben Baustelle gemeinsam verwendet.“<sup>156</sup>

Brunelleschi hat seine Baumaschinen an die spezifischen Anforderungen seines Entwurfs und der Baustelle angepasst. Nur so konnte die Baubarkeit der Kuppel, ihre Form und Dimension sichergestellt werden:

*„Das auffälligste Merkmal an Brunelleschis Konstruktionsmaschinen ist die enge Wechselbeziehung zwischen ihrer Struktur und den operationalen Anforderungen der Baustelle. Man kann sich des Eindrucks nicht erwehren, dass in Brunelleschis Verstand, die Definition der strukturellen Anordnung des Projekts und der Entwurf der wesentlichen Konstruktionsmaschinen auf parallelen, strikt symmetrischen Ebenen stattfanden. Ausgehend von der Ausformulierung des Projektkonzepts, muss er direkt zu dem Definieren der Techniken und Instrumente, die für ein wirtschaftliches, schnelles und sicheres Realisieren notwendig waren, übergegangen sein.“<sup>157</sup>*

### **Interdisziplinarität des mittelalterlichen Baugewerbes**

Während die verschiedenen Handwerksgruppen zumeist entkoppelt voneinander agierten und von einem parallelen Nebeneinander geprägt waren, verhielt es sich anders mit den im Baugewerbe verankerten Handwerksgruppen:

*„Abgesehen von der Landwirtschaft und der Baukunst lag die größte Schwäche des alten Handwerks in seiner übermäßigen fachlichen Spezialisierung, die die freie Verbreitung von Wissen und Können behinderte und die einzelnen Handwerkszweige, das Baugewerbe ausgenommen, des großen kollektiven Wissensfonds beraubte, der die Glanzleistungen der Kathedralenerbauer zu so wunderbaren Trägern kultureller Aussagen gemacht hatte.“<sup>158</sup>*

Lewis Mumford verweist somit auf den grundlegenden Charakter der Interdisziplinarität des Baugewerbes. Eine vernetzter Informationskreislauf zwischen den unterschiedlichen ausführenden Handwerksgruppen und dem Baumeister war fundamental für die Realisierung von Bauwerken. Das Erschaffen eines kollektiven Wissensfonds, wie ihn Mumford nennt, stellt Grundlage und Ausgangspunkt dar. Kann die Phase der Konzeptualisierung, also des Entwurfs, individuell bewältigt werden, so setzt die Phase der Baurealisierung ein kollektives Interagieren voraus. Herbert

---

<sup>156</sup> Binding, G.: „Baubetrieb im Mittelalter“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1993, S. 397.

<sup>157</sup> Galluzzi, P.: „Renaissance Engineers. From Brunelleschi to Leonardo da Vinci“, Giunti Verlag, Florenz, 1996, S. 21.

<sup>158</sup> Mumford, L.: „Mythos der Maschine. Kultur, Technik und Macht. Die umfassende Darstellung der Entdeckung und Entwicklung der Technik“, Fischer Taschenbuch Verlag, Wien, 1977, S. 492.

Ricken unterstützt die von Mumford formulierte These, wenn er die Architektur des Mittelalters als „*das Ergebnis eines unbewußt [sic!] ablaufenden, kollektiven Prozesses*“<sup>159</sup> bezeichnet. Um den hohen Grad der Interdisziplinarität dieser „kollektiven Prozesse“ zu veranschaulichen liefert Binding eine Zusammenfassung der Mitglieder einer mittelalterlichen Hütte: „*Zu der Hütte gehörten der Werkmeister und die verschiedenen Handwerker, u.a. Steinmetz, Zimmermann, Maurer, Schmied und Glaser, soweit sie längerfristig auf der Baustelle erforderlich waren, sowie der Hüttenknecht und weiteres Personal zur Aufrechterhaltung des Kirchenbetriebes und für die Versorgung der Hütte.*“<sup>160</sup> An dieser Aufzählung lässt sich die enge Verflochtenheit aller Baubeteiligten, inklusive des Baumeisters, als den Bau leitende und den Entwurf generierende Autorität, ablesen. In diesem Zusammenhang und im Gegensatz zu Mumfords allgemein gültiger Einschätzung, unterstellt Pizzigoni Brunelleschi die „*einzelgängerische, kryptische Geisteshaltung des mittelalterlichen Handwerks, der die eigenen Berufsgeheimnisse eifersüchtig zu bewahren suchte, selbst auf das Risiko hin, dass diese im Dunkel des Vergessens anheimfielen*“.<sup>161</sup> Pizzigonis Bewertung ist jedoch einseitig und zeugt von einem fehlgeleiteten Verständnis der baumeisterlichen Berufsausübung. Die Informationsweitergabe an Aussenstehende der Branche wurde aus Gründen der Wettbewerbsfähigkeit vermieden, wobei im Mittelalter dies sogar in bindender Form durch die Hüttenordnung verboten wurde.<sup>162</sup> Die verständliche Bewahrung des Fachwissens innerhalb eines eingeweihten Kreises ist nachvollziehbar, jedoch im Fall des Bauwesens nicht anwendbar, da Interaktion und Informationsaustausch zwingend sind. Ein intensiver Informationsaustausch zwischen den Baubeteiligten war aber zwingend notwendig und unumgänglich. Die Zusammenarbeit mit Schreibern, Steinmetzen und Maurermeistern, die Beteiligung an der Materialproduktion, das Bestellen von Modellen zur konzeptionellen und technischen Veranschaulichung für die Handwerker sind ausreichende Beweise um Brunelleschi als einen Katalysator des interdisziplinären Agierens, der an einer kohärenten Wissensweitergabe zwischen allen Baubeteiligten interessiert war, zu betrachten.<sup>163</sup> Abgesehen von der interdisziplinär geprägten Arbeit an dem Dombau, lässt sich Pizzigonis Behauptung durch Brunelleschis Bemühungen „*seine Methode des perspektivischen Zeichnens*

---

<sup>159</sup> Vgl. Ricken, H.: „Der Architekt. Geschichte eines Berufs“, Henschelverlag Kunst und Gesellschaft, Berlin, 1977, S. 27.

<sup>160</sup> Binding, G.: „Baubetrieb im Mittelalter“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1993, S. 102.

<sup>161</sup> Pizzigoni, A.: „Fillippo Brunelleschi“, Verlag für Architektur, Zürich München, 1991, S. 10.

<sup>162</sup> Vgl. Ricken, H.: „Der Architekt. Geschichte eines Berufs“, Henschelverlag Kunst und Gesellschaft, Berlin, 1977, S. 36.

<sup>163</sup> Vgl. Prager, F.D., Scaglia, G.: „Brunelleschi, Studies of his Technology and Inventions“, Dover Publications, New York, 1970, S. 42.

*Malern, Bildhauern und Intarsienhersteller beizubringen, welche ihrerseits technische Zeichner darüber belehrten“*,<sup>164</sup> widerlegen.

Der Maschinenbau erweist sich als ein wesentlicher Berufsschwerpunkt bei Brunelleschi. Wie zuvor erwähnt galt Brunelleschi unter seinen Zeitgenossen als fähiger und geschickter Entwickler von Maschinen. Der Maschinenbau galt somit als integraler Bestandteil seiner Berufsauffassung und entspricht der von Vitruv formulierten These, dass die Maschinenbautechnik als ein wesentlicher Teil der Architekturdiziplin zu verstehen ist.

### **Das Modell des Baumeisters**

Zusammenfassend umreißt Paulgerd Jesberg die Komplexität der sich aus der Handwerklichkeit ergebenden Qualifikationen und Kenntnisse in folgendem Paragraphen äußerst treffend:

*„Der Bildungsweg eines Brunelleschi vom Goldschmied und Bronzegießer zum konstruktionsbegabten Ingenieur oder eines Ghiberti auf demselben Wege zum mehr künstlerisch orientierten Architekten bestätigt, dass handwerkliche Ausbildung umfassendes und entwicklungsfähiges allgemeines Wissen vermittelte und dabei gleichzeitig eine humanistische Persönlichkeitsbildung einschloß [sic!]. Zu den Elementarkenntnissen der Ausbildung beider Männer gehört das Wissen um und die Erfahrung mit Werkstoffen und ihrer Festigkeit, Belastbarkeit und Bruchsicherheit, ihrer Elastizität und Dehnbarkeit, ihrer Bearbeitbarkeit im ganzen und ihrer Oberflächenstruktur. Die individuelle Gewandtheit in der Beherrschung der Produktionsmittel, der Geräte, der Werkzeuge und Maschinen - auch in ihrer Herstellung - sowie die Anwendung mechanischer Verfahren und chemischer Prozesse erschließen immer mehr technische und gestalterische Erfahrungen und künstlerische Fähigkeiten. Der Umgang mit einer Vielzahl von Werkstoffen und deren Kombination führen zu Erkenntnissen über allgemeingültige und besondere werkstoffgebundene Gesetzmäßigkeiten, denen wiederum axiomatische Sätze zugrunde liegen.“*<sup>165</sup>

Dadurch dass Brunelleschis professioneller Werdegang seinen Ursprung im Handwerklichen hat, resultiert eine sehr breit gefächerte Kompetenz in den Bereichen der Materialkunde, Statik, Mechanik und des Maschinenbaus. Das Wichtigste daran ist das vertiefte Verständnis der benutzten Werkzeuge, zu denen auch selbstentwickelte Maschinen zählen und die dadurch resultierende Kontrolle über diese. Handwerkliches Arbeiten übersetzt sich als eine direkte Auseinandersetzung des Schaffenden mit dem Material und dem Werkzeug. Aus dieser Aktivität ergeben sich eine Reihe Erkenntnisse, die auf theoretischer Ebene nur begrenzt anzueignen

---

<sup>164</sup> Prager, F.D., Scaglia, G.: „Brunelleschi, Studies of his Technology and Inventions“, Dover Publications, New York, 1970, S. 45.

<sup>165</sup> Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996, S. 45.

sind. Werkzeuge und Maschinen stellen die Mittel der Fertigung dar, durch welche der gedachte Entwurf seine Materialisierung erlangt. Verfügt der Entwerfer über das benötigte Fachwissen zur Entwicklung von Maschinen gemäß den entwerferischen Anforderungen können die Möglichkeiten im Bereich des Gestalterischen ausgedehnt werden. Der direkte Umgang des Entwerfers mit dem Material und den Fertigungsinstrumenten, mit Werkzeugen und Maschinen, ermöglicht ein profundes Verständnis der konstruktiven Natur der Architektur und führt zu der Anwendung, Weiterentwicklung oder Erfindung für den Entwurf angemessener Bautechnologien und -verfahren. Die Verwirklichung einer künstlerischen Idee ist abhängig von ihrer technischen Umsetzbarkeit. Die Realisierung einer Idee, eines Entwurfs, in seine materielle Form ist an die Existenz von Werkzeugen und Maschinen gebunden, welche dessen Machbarkeit garantieren. Wenn die zur Verfügung stehenden Instrumente nur eine beschränkte Baubarkeit erlauben, also das Eingehen bestimmter Kompromisse im Bereich des Entwurfs und der Fertigung aufzwingen, ist eine Limitierung der gestalterischen Kapazitäten vorhanden. Durch die Erweiterung des bautechnischen Vokabulars können diese Grenzen aufgelöst oder erweitert werden. Bestimmend für Brunelleschis Arbeitsmethodik ist das Zurückgreifen auf seine Kenntnisse im Bereich des Materialverhaltens, Materialtechnik, Bautechnik und Maschinenbau. Der Hintergrund einer handwerklichen Ausbildung äußert sich in all diesen Bereichen, wobei Maschinen eine aktive Rolle im Realisierungsprozess einnehmen.

Fanelli thematisiert in seinen Betrachtungen Brunelleschis Vorgehensmethodik in Bezug auf die Baustellenprozesse und deren Organisation und konkludiert, dass Brunelleschi durch das Bauvorhaben des Doms eine Neuerung der Berufsausübung im Vergleich zur gängigen Vorgehensweise des Mittelalters determiniert hat. Doch diese Evaluierung basiert auf einer Fehlinterpretation der mittelalterlichen Bauverhältnisse und der von Brunelleschi ausgehenden innovativen Impulse. Fanelli betrachtet die von Brunelleschi ausgeübte Autorität auf der Baustelle als eine grundsätzliche Umgestaltung gängiger Arbeitsverhältnisse.

*Laut Fanelli „musste sich Brunelleschi für die Bewältigung seiner technisch-formalen Erfindungen von der traditionell gehandhabten Bauweise lösen. Der Architekt musste nun für das Bauvorhaben allein verantwortlich zeichnen und die Arbeitskräfte der Baustelle waren lediglich Ausführende. Dieser revolutionäre Ansatz in den Beziehungen zwischen dem neugeschaffenen Berufsbild des Architekten als Bauleiter einerseits und der Arbeitskräfte, die sich daraufhin in einer völlig untergeordneten Rangfolge wiederfanden, andererseits, erklärt die Auseinandersetzung Brunelleschis mit der verantwortlichen Bauhütte, der ‘Opera del Duomo’, mit Ghiberti und der Handwerkschaft.“<sup>166</sup>*

In dieser Argumentation wird der Umstand ignoriert, dass der mittelalterlichen Bautradition lange vor Brunelleschi eine hierarchische Organisationsstruktur nachzuweisen ist, wie es die organisatorische Struktur der Bauhütte veranschaulicht.

---

<sup>166</sup> Fanelli, G.: „Brunelleschi“, Scala Verlag, Florenz, 1988, S. 11.

Um einen schematischen Überblick der Organisationsstruktur der mittelalterlichen Hütte und der hierarchischen Positionierung des Baumeisters zu vermitteln, eignet sich folgende zusammenfassende Darstellung:

*„Die städtische Hütte stand unter der obersten Leitung und Aufsicht eines oder mehrerer „Baumeister“, hoher Verwaltungs- und Finanzbeamter; diese wurden unterstützt von dem Schaffer, auch Anschicker oder Anweiser genannt, einem Baufachmann, zumeist Maurer- oder Steinmetzmeister und einem Zimmermeister“.*<sup>167</sup>

Daher kann bezüglich der dargelegten Aspekte von keinem Bruch mit der bestehenden Bautradition gesprochen werden. Die von Fanelli thematisierte Auseinandersetzung Brunelleschis mit der Handwerkschaft und Ghiberti, bezieht sich auf die von Vasari übermittelten Beschreibungen, die Konflikte zwischen den Bauplanern und den Ausführenden beschreiben, wobei die historische Akkuratess nicht bestätigt ist. Durch seine Äußerungen deutet Fanelli eine, was den Informationskreislauf anbelangt, Distanzierung und Entkopplung zwischen dem Entwerfer und den Ausführenden an. Die zentrale Rolle Brunelleschis bei den Bauarbeiten ist unbestreitbar, er nimmt die Rolle eines Dirigenten an, der sämtliche Bauabläufe und Prozesse miteinander korreliert und aufeinander abstimmt, da er als Generator einer komplexen Baustrategie agiert. Kontrolle und Autorität über das Bauvorhaben sind in einer Person vereint, die zusätzlich Verfasser des Entwurfs ist:

*„Brunelleschi hat in der Organisation und im Baubetrieb so viel geleistet, dass ohne ihn die Baustelle praktisch stillstand. Die Zünfte konnten nicht mehr selbstständig und abgegrenzt arbeiten.“*<sup>168</sup>

Es darf jedoch nicht angenommen werden, dass die Gesamtheit aller Lösungsansätze oder Verfahrensweisen allein Brunelleschis Fachwissen entstammt. Dies würde einer unbedachten Überbewertung entsprechen und nicht die Realität der baulichen Umstände reflektieren, wobei die Disziplinen übergreifende Natur der Dombaustelle ignoriert werden würde. Galluzzi attestiert Brunelleschi ein umfassendes Mass an fachlichem Wissen und aussergewöhnliche interdisziplinäre Fähigkeiten, jedoch verweist er gleichzeitig darauf, dass neben Brunelleschi auch andere Baubeteiligte einen wichtigen Einfluss auf das Bauvorgehen ausgeübt haben, so dass Brunelleschi auf zusätzliche Wissens- und Erfahrungswerte von Seiten der ausführenden Handwerker angewiesen war.<sup>169</sup> Dies unterstützt die These der stark geförderten Interdisziplinarität zwischen den Ausführenden und bestätigt Brunelleschi in seiner Rolle des Gesamtkoordinators. Diese Art des Wissenstransfers und der operationalen Struktur der Baustelle überlagert sich in großen Massen mit der Struktur der

---

<sup>167</sup> Binding, G.: „Baubetrieb im Mittelalter“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1993, S. 103.

<sup>168</sup> Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996, S. 51.

<sup>169</sup> Galluzzi, P.: „Renaissance Engineers. From Brunelleschi to Leonardo da Vinci“, Giunti Verlag, Florenz, 1996, S. 19.

vorausgehenden gotischen Bauhütte. Die gotischen Baumeister des Mittelalters waren in allen Bereichen der Fertigung eingebunden und ihre Präsenz auf der Baustelle obligatorisch für das Voranschreiten des Vorhabens.<sup>170</sup> Brunelleschi, in seiner Position als Gesamtkoordinator, verfügt über die Gesamtkontrolle und Autorität der Baustelle. Somit gewährleistet er ein Kontinuum zwischen Entwurf und Fabrikation, das keine Trennung erfährt und von ihm orchestriert wird, so dass Entwurf und Fabrikation eine Einheit darstellen. Eine Gesamtstrategie wird erarbeitet, jedoch stehen die Details der Planung nicht fest, da auch keine Baupläne, die dem heutigen Verständnis entsprechen würden, verwendet werden. Die Fertigungsdetails werden im Verlauf der Bauaktivität entwickelt und ergeben sich aus den ausführungsspezifischen Umständen. Somit hat die Ausführungsplanung einen progressiven und flexiblen Charakter.

Brunelleschi und das Fallbeispiel des Florentiner Kuppelbaus illustrieren auf beeindruckende Art und Weise die definierenden Züge des Baumeister-Modells. Kennzeichnend dafür sind die direkte Anwesenheit auf der Baustelle, die Ausarbeitung von Entwurf, Fertigungsstrategien, Baustellenorganisation sowie -koordination, und das Erfinden und Weiterentwickeln von Baumaschinen und den damit einhergehenden Prozessen. Die oft ignorierte Beziehung zwischen Architektur und Maschinenbau wird veranschaulicht. Darüber hinaus wird der Entwerfer in der Position des Maschinenentwicklers präsentiert.

#### 4. Leon Battista Alberti - Das Paradigma des Architekten

##### De re aedificatoria

Leon Battista Alberti entsprang einer der wohlhabendsten Kaufmannsfamilien aus Florenz und genoss ab frühesten Kindheit eine humanistisch orientierte Erziehung, so dass er bereits mit 24 Jahren einen Dokortitel in kanonischem Recht inne hatte.<sup>171</sup> Während Brunelleschi als ausgebildeter Goldschmied und Bildhauer beruflich gesehen einen handwerklichen Hintergrund besitzt, muss Alberti als Gelehrter verstanden werden,<sup>172</sup> der sich bevorzugt mit der Thematik des Bauens auf einer theoretischen Ebene auseinandersetzt. Die Interessen Albertis und seine beruflichen Tätigkeiten sind breit gefächert. Um ein aussagekräftiges Bild seiner Aktivität zu vermitteln, lassen sich folgende Beschäftigungsfelder aufzählen, denen er Zeit seines Lebens nachging: *„Kenner der Antike, Schriftsteller, päpstlicher Sekretär, Kunsttheoretiker, Grammatiker und Sozialkommentator der Architektur.“*<sup>173</sup> Alberti ist

<sup>170</sup> Kostof, S.: „Geschichte der Architektur. Vom Frühmittelalter bis zum Spätbarock“, Band 2, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1993, S. 381.

<sup>171</sup> Ungers, L.: „Über Architekten. Leben, Werk & Theorie“, DuMont Literatur und Kunst Verlag, Köln, 2002, S. 30-31.

<sup>172</sup> Vgl. Klemm, F.: „Geschichte der Technik: der Mensch und seine Erfindungen im Bereich des Abendlandes“, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1998, S. 72.

<sup>173</sup> Kostof, S.: „Geschichte der Architektur. Vom Frühmittelalter bis zum Spätbarock“, Band 2, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1993, S. 381.

somit als ein vielseitig ausgebildeter Literat zu verstehen, wobei diese Hintergrundinformationen bei der Betrachtung und Deutung seines literarischen Werks und der von ihm vertretenen theoretischen Position berücksichtigt werden müssen.

Es wird angenommen, dass Alberti sein Hauptwerk, das Traktat „*Die zehn Bücher über die Baukunst*“ oder das im Lateinischen betitelte „*De re aedificatoria*“, in dem Zeitraum 1443 bis 1452 verfasst hat. Zunächst wurde das Buch in der Form von handschriftlichen Kopien verbreitet, bevor das Traktat seine posthume Veröffentlichung erfuhr, da es erst um 1485 in den Druck kam.<sup>174</sup> Während die zehn Bücher des Vitruvs als erstes verfasstes Architekturtraktat betrachtet werden, gilt Albertis Werk als „*das erste gedruckte Buch über das Bauwesen*“.<sup>175</sup> Bei „*De re aedificatoria*“, das in seiner Originalfassung auf Latein verfasst wurde, handelt es sich um ein theoretisches vielschichtiges Werk, das eine Vielzahl von Thematiken berührt und zu seiner Zeit einen starken Einfluss auf die Architekturdebatte und deren weitere Entwicklungsphasen ausübte. Im Kontext der Renaissance werden dem Traktat verschiedene Rollen und Wichtigkeitsgrade beigemessen, die im weiteren Verlauf erwähnt werden..

Das Ziel der folgenden Analyse liegt nicht in der theoretischen Ausarbeitung von Albertis „*De re aedificatoria*“ sondern in der Beleuchtung des Gegenmodells zum Paradigma des Baumeisters. Die Intention dieser Betrachtung liegt in der Formulierung des konzeptionellen Arbeitsmodells des Architekten, das auf den von Alberti formulierten Anschauungen basiert. Dabei werden Handwerk, Maschinenbau, und das exponierte Berufsverständnis als relevante Parameter zum Vergleich herangezogen.

### Kontext und Architekturtraktate

In der Renaissance erlebte die Architekturtheorie einen neuen Höhepunkt, welcher mit dem Verfassen und der Publikation einer Vielzahl von Architekturtraktaten einhergeht. Zu den wichtigsten und einflussreichsten dieser Traktate lassen sich Filaretos „*Trattato d'architettura*“, Palladios „*Quattro libri dell'architettura*“, Francesco di Giorgos „*Trattato di architettura civile e militare*“ oder Scamozzis „*L'idea della architettura universale*“ aufzählen. Diese Schriften widmen sich der Theoretisierung der Baukunst, sind aber gleichzeitig von einem enzyklopädischen Charakter geprägt, da oftmals bautechnische Prozesse bezüglich unterschiedlicher Bautypologien detailliert beschrieben werden. Die Reihe dieser Schriften wurde von Leon Battistas Traktat „*Über die Baukunst*“ angeführt. Durch das Auseinandersetzen mit den theoretischen Hintergründen der Architektur während der Renaissancezeit wird laut Patrick Schumacher der Prozess der Selbstfindung der Architektur und ihre

<sup>174</sup> Vgl. Thoenes, C.: „Anmerkungen zur Architekturtheorie“, S. 34 ff., In: Evers, B. (Hrsg.): „Architekturmodelle der Renaissance. Die Harmonie des Bauens von Alberti bis Michelangelo“, Prestel Verlag, München New York, 1995.

<sup>175</sup> Vgl. Klemm, F.: „Geschichte der Technik: der Mensch und seine Erfindungen im Bereich des Abendlandes“, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1998, S. 73.

Entwicklung zu einer eigenständigen disziplinären Identität erneut angestoßen.<sup>176</sup> Erneut deswegen, weil zwischen der Zeit der klassischen Antike und der Renaissance die disziplinäre Selbstreflexion in der Architektur aufgegeben wurde. Zwischen Vitruvs Traktat und Albertis Buch, welches das zuvor genannte Werk als Vorlage benutzt, sind keine ähnlichen theoretisierenden Bemühungen bekannt oder übermittelt worden. In seiner Argumentation beruft sich Schumacher auf das philosophische Konzept der Autopoiese, einem Konzept das, vereinfacht ausgedrückt, einen Prozess der Selbstschöpfung bzw. Selbsterschaffung beschreibt. Er vertritt ebenfalls die Position, dass bis zum Eintreten der Renaissance nur in der klassischen Antike ähnliche Prozesse der fachlichen Selbstbesinnung ausgemacht werden können.<sup>177</sup> Diese Aussage hat durchaus ihre Validität, bedenkt man das Ausmaß der Zeitspanne zwischen Vitruvs Werk und Albertis Traktat.

Während Schumacher die Implikationen auf einer globalen Ebene betrachtet und sich auf die gesamtdisziplinären Konsequenzen bezieht, die von Albertis Werk und der Renaissancetheorie ausgehen, beleuchten andere Forscher die Auswirkungen in einem reduzierteren Rahmen. So beurteilt Christof Thoenes, dass der wichtigste Beitrag der Renaissancetheorie in dem Einbinden und der Erziehung des Bauherrn im Sinne der Baukunst, also in der Entstehung „*einer neuen Kommunikationsebene zwischen Architekten und Arbeitgebern*“<sup>178</sup> zu sehen ist. Auch der Architekturtheoretiker Spiro Kostof sieht in dem Vorhaben Albertis die Intention zur Erziehung der Öffentlichkeit und der Bauherren über „*den erhabenen Beruf der Architekten und deren Rang im öffentlichen Leben*“<sup>179</sup> verankert. Verfolgt wird eher eine Offenlegung der disziplinären Komplexität der Architektur und ihrer gesellschaftlichen Relevanz, wobei die bautechnische Anleitung eher eine sekundäre Rolle einnimmt.

Was Alberti also hauptsächlich von den Vertretern des Baumeisterbildes unterscheidet, ist seine intensive Auseinandersetzung mit den theoretischen Aspekten der Architektur. Albertis Neuverlagerung des Betrachtungsschwerpunkts in Richtung theoretischer Systematisierung und Funktionsbestimmung des Handwerks, der Künste und der Architektur spiegelt den Zeitgeist der Frührenaissance dar.<sup>180</sup> Aufgrund der Tatsache, dass Alberti sich als Erster der klaren Theoretisierung und Kategorisierung von bildenden Künsten und Architektur gewidmet hat, wird er oft als Exponent des

---

<sup>176</sup> Vgl. Schumacher, P.: „The Autopoiesis of Architecture. A New Framework for Architecture“, Wiley Verlag, Chichester, 2011, S. 77-82.

<sup>177</sup> Ebd., S. 77.

<sup>178</sup> Thoenes, C.: „Anmerkungen zur Architekturtheorie“, S. 30, In: Evers, B. (Hrsg.): „Architekturmodelle der Renaissance. Die Harmonie des Bauens von Alberti bis Michelangelo“, Prestel Verlag, München New York, 1995.

<sup>179</sup> Kostof, S.: „Geschichte der Architektur. Vom Frühmittelalter bis zum Spätbarock“, Band 2, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1993, S. 383.

<sup>180</sup> Vgl. Binding, G.: „Meister der Baukunst. Geschichte des Architekten und Ingenieurberufes“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2004, S. 146.

Paradigmenwechsels von Baumeister zu Architekt gehandhabt.<sup>181</sup> Es ist von großer Relevanz darauf hinzuweisen, dass das Entstehen eines theoretischen Bewusstseins, bezüglich des eigenen Schaffens und von der erbrachten intellektuellen Leistung ausgehend vom Entwerfer bzw. vom Architekten, den Moment einer neuen Richtungseinnahme in der Architektur markiert. Es handelt es sich jedoch dabei nicht um eine plötzliche und vollkommene Emergenz des Architektenprofils, das dem heutigen modernen Verständnis entspricht; die Renaissancetheorie stellt lediglich den historischen Ausgangspunkt dieser komplexen Prozesse dar.<sup>182</sup>

### Vitruv in seiner Vorbildfunktion

Während der aus Genua stammende Alberti sich um die Theoretisierung seiner vertretenen Positionen zur Architektur bemühte und eine Vielzahl von Schriften publizierte, allen voran sein krönendes Meisterwerk, die „*Zehn Bücher über die Baukunst*“ bzw. „*De re aedificatoria*“, ignorierte Brunelleschi die methodisch-theoretische Zusammenfassung seiner Anschauungen bezüglich der Baukunst. Bei seinen „*Zehn Büchern über die Baukunst*“ orientiert sich Alberti bei Form und Inhalt an dem Traktat „*De architectura*“, das von dem römischen Architekten Vitruv verfasst wurde. Von Vitruv übernimmt Alberti den Grundaufbau aus zehn Büchern, wobei es selbst bei der Themenvergabe der einzelnen Bücher Übereinstimmungen gibt. So widmet Alberti, seinem Vorbild folgend, das zweite Buch ebenfalls dem Thema des Materials. Während Vitruv im fünften und sechsten Buch den Bau von jeweils öffentlichen und privaten Gebäuden behandelt, verteilt Alberti diese Themenschwerpunkte auf das vierte und fünfte Volumen. Durch diese Referenzen an „*De architectura*“ versteht sich Alberti als Nachfolger von Vitruvs Tradition und weist seinem Werk einen Vorbildcharakter zu.

### Dualität des Diskurses

Bei der Lektüre von Albertis Traktat macht sich ein gewisser Grad an Unstimmigkeit bezüglich der präsentierten Inhalte bemerkbar. Zwar suggeriert Alberti, dass das Entwerferische, also das Intellektuelle die Hauptaufgabe und Hauptkompetenz des Architekten sein sollte, trotzdem widmet er sich auch ausgiebig den Fragen der Bautechnik. Allein der Blick auf die übergeordneten thematischen Inhalte seiner zehn Bücher veranschaulicht das. Das zweite und dritte Buch widmen sich ausschließlich den Themen des Materials und der Konstruktion. Alberti behandelt somit in seinen zehn Büchern in einem sehr großen Umfang Problematiken der Bautechnik und Bauausführung, wobei der philosophisch-theoretische Diskurs, bezogen auf das Textvolumen, einen deutlich begrenzteren Rahmen ausfüllt. So bietet Alberti ausführliche und nuancierte Beschreibungen zu der Gewinnung von Baustoffen, zu

---

<sup>181</sup> Vgl. Binding, G.: „Meister der Baukunst. Geschichte des Architekten und Ingenieurberufes“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2004, S. 146.

<sup>182</sup> Vgl. Schumacher, P.: „The Autopoiesis of Architecture. A New Framework for Architecture“, Wiley Verlag, Chichester, 2011, S. 85.

den Arten des Mauerwerks,<sup>183</sup> der Auswahl der richtigen Bindemittel für den Mörtel,<sup>184</sup> sogar über die Arten von Schrauben und ihren Gewinden beim Lastentransport<sup>185</sup>, bis hin zum Brückenbau. Berücksichtigt man Albertis bauliches Inventar, so wurde er überwiegend mit Teilaufgaben beauftragt, vermehrt mit der Fassadengestaltung oder -änderung, jedoch war er nie an der Planung großmaßstäblicher Projekte, die dem Maßstab des Florentiner Doms entsprechen würden, beteiligt. Somit belehrt er sein Publikum über den Kuppelbau, ohne über eigene Erfahrungen in diesem Gebiet zu verfügen. Gleichzeitig geht er auf die Techniken handwerklichen Arbeitens ein, wenn er über die Verarbeitung von Steinen oder Ziegeln berichtet,<sup>186</sup> verlangt aber im Gegenzug nach einer Trennung des Architekten von den Ausführenden. Diese Dualität, die eventuell auch als ein Symptom argumentativer Inkonsequenz bewertet werden könnte, fällt auch der Historikerin Françoise Choay auf. Sie sieht eine Widersprüchlichkeit in Albertis Traktat bezüglich der Thematik des Handwerks und des Handwerkers:

*„Das andere, weniger betrachtete Paradoxon ergibt sich aus Albertis Interesse am Handwerk des Bauens in einem Traktat, der dieses tendenziell entwertet, um die geistige Tätigkeit des Architekten zu unterstreichen.“<sup>187</sup>*

Die Abwesenheit exemplifizierender Zeichnungen führt die Forscherin Chaoy zu der Schlussfolgerung, dass Albertis primäre Absicht gar nicht darin besteht *„den Praktiker anzuleiten“*<sup>188</sup> und dass somit sein Traktat nicht in der Gattung des bautechnischen Führers einzugliedern ist, sondern als *„eine Erforschung dessen, was der Ordnung der Gesellschaft zu Grunde liegt, eine Art elementare Anthropologie also, die in der Tätigkeit des Architekten ihr grundlegendes und wegweisendes Paradigma findet.“*<sup>189</sup> In seinem Traktat verweist Alberti vermehrt auf die gesellschaftliche Rolle der Architektur und des Architekten und ordnet diesen eine primäre Wichtigkeit für das Entstehen eines sozialen Gesamtgefüges zu. Den Anfang aller gesellschaftlichen Ordnung verbindet Alberti nicht mit dem Aufkommen der Feuerstätte, sondern mit dem Auftreten von Wand und Decke, wodurch er seine Überzeugung offen legt, *„dass diese [Anm. d. A.: Wand und Decke] in viel höherem Grade dazu beigetragen haben, die Menschen zu vereinigen und*

<sup>183</sup> Vgl. Alberti, L.B.: „Die zehn Bücher der Architektur“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2005, S. 132 ff.

<sup>184</sup> Ebd., S. 143 ff.

<sup>185</sup> Ebd., S. 316 ff.

<sup>186</sup> Ebd., S. 91 ff.

<sup>187</sup> Choay, F.: „De re aedificatoria als Metapher einer Disziplin“, S. 220, In: Forster, K. W., Locher, H. (Hrsg.): „Theorie der Praxis. Leon Battista Alberti als Humanist und Theoretiker der bildenden Künste“, Akademie Verlag, Berlin, 1999, S. 217-231.

<sup>188</sup> Ebd., S. 227.

<sup>189</sup> Ebd., S. 220.

*zusammenzuhalten.*<sup>190</sup> Architektur schafft nicht nur den zum Bewohnen benötigten physischen Raum, sondern viel wichtiger, es bietet den Rahmen für eine geordnete soziale Kommunikation.<sup>191</sup> Darüber hinaus bewertet er die gesellschaftliche Bedeutsamkeit des Architekten als unanfechtbar und ordnet dieser den höchst möglichen Stellenwert zu: „*Endlich sei noch gesagt, daß [sic!] die Beständigkeit, das Ansehen und die Zier eines Gemeinwesens am meisten des Architekten bedürfte.*“<sup>192</sup> Somit können Albertis Schrift und argumentatives Vorgehen in einem sozial-anthropologischen Kontext mit einem entsprechendem Interpretationsansatz verankert werden. Die Beschreibung der technischen Komplexität von Bauaufgaben erfüllt eine sekundäre Rolle und dient eher dem Evidenzieren und der Untermauerung der Wichtigkeit des Architektenstatus. Dieses Hervorheben des Wertes des Architekten ist auch durch die Abhängigkeit vom Bauherrn und der Sicherung von Aufträgen motiviert, wodurch sich auch die Tendenz zur Marginalisierung der konkreten Beteiligung an den Fabrikationsphasen erklären lässt, da das Traktat „*in erster Linie für den Bauherrn bestimmt ist*“.<sup>193</sup> Die Wahl der Sprache unterstützt diese Annahme, da davon ausgegangen werden kann, dass nur ein sehr geringer Anteil der Handwerker über die sprachlichen Fertigkeiten verfügte, um sich den Inhalt anzueignen.<sup>194</sup>

Im Gegensatz dazu empfindet der Theoretiker Mario Carpo diese strukturelle Eigenheit von Albertis Argumentationsaufbau nicht als eine sich widersprechende Dualität, sondern attestiert dass „*von Beginn an Albertis Entwurfsprozess [...] von einem mechanischen Geist durchdrungen war*“.<sup>195</sup> Natürlich muss beim architektonischen Entwerfen die Baubarkeit des Gedachten berücksichtigt und auch sichergestellt werden. Dies stellt ein allgemein gültiges Prinzip für jede Art von handwerklicher oder baulicher Betätigung dar. Allein die Beschreibung diverser Arten der baulichen Umsetzung, die sich im Laufe der Praxis bewährt haben, signalisiert keinen durchdringenden mechanischen Geist, sondern entspricht eher einer Beschreibung des Status quo und verweist den Leser auf das Zurückgreifen auf erprobte Techniken. Im Gegensatz dazu kann eine mechanische Durchdrungenheit, die Entwurfs- und Fabrikationsprozesse miteinander verschmelzen lässt, bei Brunelleschi erahnt werden, bei der die Bewältigung der Mechanik und die Lösung bautechnischer Problematiken die Realisierung des Entwurfs direkt konditionieren.

---

<sup>190</sup> Alberti, L.B.: „Die zehn Bücher der Architektur“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2005, S. 10.

<sup>191</sup> Vgl. Schumacher, P.: „The Autopoiesis of Architecture. A New Framework for Architecture“, Wiley Verlag, Chichester, 2011, S. 514.

<sup>192</sup> Alberti, L.B.: „Die zehn Bücher der Architektur“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2005, S. 13.

<sup>193</sup> Borsi, F.: „Leon Battista Alberti. Das Gesamtwerk“, Belser Verlag, Stuttgart Zürich, 1982, S. 320.

<sup>194</sup> Vgl. Grafton, A.: „Leon Battista Alberti. Baumeister der Renaissance“, Berlin Verlag, Berlin, 2002, S. 407.

<sup>195</sup> Carpo, M.: „Alphabet und Algorithmus“, transcript Verlag, Bielefeld, 2012, S. 43.

Dem entgegensetzen ist der Interpretationsansatz, der von dem Forscher Branko Kolarevic geliefert wird. Dieser bewertet die Doppeldeutigkeit in Albertis Traktat wie folgt: „*Die Theorie stellte die Essenz der Architektur bereit und nicht das praktische Wissen über das Konstruieren.*“<sup>196</sup> Der dargelegten Auffassung folgend ist festzustellen, dass Alberti sich verpflichtet fühlt der konstruktiven Natur der Architektur gerecht zu werden, indem er technische und handwerkliche Prozesse zwar beschreibt, es aber vermissen lässt vom Architekten den Übergang von der deskriptiven zur ausführenden Ebene zu verlangen. Die konstruktive Natur der Architektur lässt sich nicht verneinen, auch gehört sie als Disziplin nicht nur dem philosophisch-theoretischen Bereich an, sondern stellt ein Konglomerat aus Theorie und Praxis dar. Zusätzlich zu den präsentierten Erklärungsansätzen kann davon ausgegangen werden, dass Alberti den Versuch einer gewissen Art der Theoretisierung der konstruktiven Natur der Architektur unternimmt, da er sich der Dualität der Disziplin durchaus bewusst ist und die baulich-angewandte Komponente nicht ignoriert. Die anfängliche Publikation als ein bilderloses Traktat, das Verfassen des Textes auf Latein, um es einem breiten ausländischen Publikum zugänglich zu machen, das sich Konzentrieren auf das Primat des Intellektuellen über dem Handwerklichen, das intensive Beleuchten der sozialen Relevanz der Disziplin und des Berufes, die Thematisierung der Rolle des Bauherrn und der deskriptiv bautechnische Anteil verweisen darauf, dass Alberti darum bemüht ist, die diversen, ineinander greifenden Komplexitätsebenen der Architektur aufzuzeichnen und ihren Status als übergeordnete Disziplin, die dem humanistischen Konzept der Renaissance entspricht, zu etablieren. Die bautechnische Komponente vervollständigt nur das geschaffene Identitätsbild, woraus ein zunächst dualer Diskurs zu resultieren scheint. Der Entwerfer bzw. der Architekt wird mit der intellektuellen Leistung assoziiert, muss aber gleichzeitig einen Einblick über die technische Materie besitzen, so dass intelligente, den Entwurf unterstützende Baumassnahmen von diesem vorgegeben werden können.

### **Trennung von Planung und Ausführung**

Die innovative Komponente in Albertis Traktat ist die Art der Auffassung des Architektenberufs. Diese steht in einem starken Gegensatz zu der vorausgehenden, in der Gotik angewandten Arbeitsmethodik. Alberti promoviert die strikte Trennung zwischen der Planung und der Ausführung, zwischen Entwerfen und Fabrikation, zwischen dem Architekten und den Bauausführenden. Das von ihm postulierte Verständnis des Berufsbildes entspricht dem eines Gelehrten, nicht eines Praktikers. Die Abwendung von dem Arbeitsmodell des Baumeisters und von dessen handwerklich geprägter Vorgehensmethodik durchzieht sein Traktat wie ein roter Leitfaden. Albertis elitäres Selbstverständnis als Architekt tritt sehr klar zum Vorschein, wenn er die folgende Darstellung der Qualitäten eines Architekten formuliert:

---

<sup>196</sup> Kolarevic, B.: „Information Master Builders“, S. 57 In: Kolarevic, B. (Hrsg.): „Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing“, Taylor and Francis, New York, 2009.

*„Eine große Sache ist die Architektur, und es kommt nicht allen zu, eine so gewaltige Sache in Angriff zu nehmen. Einen hohen Geist, unermüdlichen Fleiß, höchste Gelehrsamkeit und größte Erfahrung muss jener besitzen und vor allem eine ernste und gründliche Urteilskraft und Einsicht haben, der es wagt sich Architekt zu nennen.“*<sup>197</sup>

Er versteht Architektur als eine Disziplin, die aufgrund der zu erbringenden intellektuellen Tätigkeit nicht jedem zugänglich ist. Die Betätigung als Architekt verlangt nach einer geistigen Leistung, zu der nur Gelehrte und in den geistigen Wissenschaften Initiierte fähig sind. Diese Form der dargelegten disziplinären Evaluierung entspricht dem humanistischen Geist der Renaissancezeit, durch welchen die Architektur als *„ein Bestandteil der neuen Gelehrsamkeit“*<sup>198</sup> behandelt wird. In Konsens mit dieser Haltung steht auch die folgende Beschreibung:

*„Pflicht eines überlegten Mannes ist es daher, alles vorher innerlich in Gedanken überdacht und fertiggestellt zu haben.“*<sup>199</sup>

Die wesentliche Leistung des Architekten besteht nach Albertis Auffassung in seiner planerischen Aktivität. Alberti verlangt demzufolge, dass sämtliche Details der Planung in ihrer Gesamtheit im Voraus vom Planer berücksichtigt und geregelt werden. Im Gegensatz zum Modell des Baumeisters, stellt dies einen komplett verschiedenen methodischen Vorgehensansatz dar. Beim Florentiner Kuppelbau entwickelte Brunelleschi zwar eine grundsätzliche Baustrategie, deren Details aber erst mit dem Voranschreiten der Baustellentätigkeit ausgearbeitet wurden. Bei den mittelalterlichen Baumeistern, spielen sich Planung und Fertigung als sich korrelierende Prozesse ab, die sich gegenseitig beeinflussen, so dass eine Art von Interdependenz zwischen beiden zustande kommt. Diese Relation wird durch die albertianische Anschauung aufgehoben. Zudem lässt sich die kritische Frage nach der Praktikabilität einer solchen Methodik stellen. Bezieht man sich auf Bauvorhaben, die in ihrer Größe ein bestimmtes, eher reduziertes Volumen nicht überschreiten, so mag Albertis segmentierende Vorgehensweise anwendbar sein. Bei einem Projekt, das den Ausmaßen des Florentiner Doms entsprechen würde, ist ein derartiger Ansatz nicht zielführend. Entwurf, Technik, Handwerk, Fabrikation und Maschine formen ein komplexes, sich gegenseitig konditionierendes Geflecht. Diese einzelnen Faktoren können als wesentliche Projektparameter illustriert werden, die in einer zirkulären Abhängigkeit zueinander stehen. Aufgrund dieser bestehenden Interdependenz kann der Entwurf in seiner Relevanz nicht priorisiert werden. Die Gesamtheit dieser

---

<sup>197</sup> Alberti, L.B.: „Die zehn Bücher der Architektur“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2005, S. 515.

<sup>198</sup> Kostof, S.: „Geschichte der Architektur. Vom Frühmittelalter bis zum Spätbarock“, Band 2, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1993, S. 381.

<sup>199</sup> Alberti, L.B.: „Die zehn Bücher der Architektur“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2005, S. 68.

Parameter formt ein logisches und prozessuales Kontinuum, das keine segmentierende Trennung erlaubt.

Die gewissermassen überhebliche Selbstwahrnehmung erreicht einen Höhepunkt wenn Alberti so weit geht, indem er selbst bei der Anfertigung von Modellen auf ihre Schlichtheit und das reduzierte Erscheinen verweist, da *„der Geist des Erfinders, nicht aber die Hand des Verfertigers bewundert werden soll“*.<sup>200</sup> Als essentiell und relevant begreift Alberti ausschließlich die entwerferische Leistung, die per se einen intellektuellen Akt darstellt. Das handwerkliche Können wird so stark reduziert, als dass es bewusst eingegrenzt werden muss, um nicht vom *Geist des Erfinders* abzulenken. Ein weiteres Indiz für Albertis Art des Priorisierens des Intellektuellen gegenüber dem Ausführenden, ist die Art und Weise wie, gemäss seiner Auffassung, Wert und Leistung des Architekten allein an der Qualität der planerischen Tätigkeit bemessen werden, wenn er sich Formulierungen wie *„die Welle des Abscheus und Unwillens über Deine Planlosigkeit“*<sup>201</sup> bedient. Nicht die Qualität der Umsetzung gilt als Evaluierungskriterium sondern die Präsenz oder Abwesenheit einer umfangreichen ausgereiften Planung. Zwar beschäftigt sich Alberti auf der theoretischen Ebene mit Aspekten der Bautechnik, doch ist es wichtig erneut festzuhalten, dass dieser die Beschäftigung des Architekten mit den Prozessen der Baustelle aus seinen Betrachtungen ausklammert. Die detaillierte Planung stellt die Hauptaufgabe des Architekten dar. Alberti beschreibt in seinen *„Zehn Büchern über die Baukunst“* die erforderlichen Kenntnisse des Architekten:

*„Was aber noch zuträglich ist, oder vielmehr, was für den Architekten von den Künsten unumgänglich notwendig ist, das sind Malerei und Mathematik. Dass er in den übrigen erfahren sei fordere ich nicht unbedingt. Denn wenn einer behauptet, der Architekt müsse rechtskundig sein, weil beim Bauen das Recht der Wasserableitung, die Absteckung der Grenzen, die Bauanzeige und was dergleichen durch Vorschriften geregelt ist, vorkommt, den werde ich nicht anhören“*.<sup>202</sup>

Diese Art der Beschreibung ist durch ihren stark selektiven Charakter geprägt. Mathematik und Kunstfertigkeit repräsentieren die notwendigen Bausteine zum Entwickeln von harmonischen, wohl proportionierten Entwürfen und Plänen. Aufgabenbereiche, die mit der Aktivität des Architekten tangieren, aber nicht der intellektuellen Berufsauffassung Albertis entsprechen, werden aus dem Aufgabenbereich des Architekten eliminiert.

Zu Beginn seines Schreibens liefert Alberti eine Definition der zu entwerfenden Gebäude, die er wie folgt begreift: *„Körper aus Linien und der Materie. Die ersteren*

---

<sup>200</sup> Alberti, L.B.: *„Die zehn Bücher der Architektur“*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2005, S. 69.

<sup>201</sup> Ebd., S. 321.

<sup>202</sup> Ebd., S. 518.

*werden vom Geiste hervorgebracht, die letzteren gewinnen wir aus der Natur.*<sup>203</sup> Der Prozess der Planung beinhaltet bei Alberti zwei Dimensionen, die Dimension des Entwurfs und die Vorplanung für die Baustelle. Eine abgeschlossene Vorplanung beinhaltet auch die Auswahl der Materialien durch den Architekten, da *„es nicht so sehr Sache des Handwerks ist, das geeignetere Material auszuwählen.“*<sup>204</sup> Die Kompetenzen der Handwerker werden ausschließlich auf die Bauausführung eingeschränkt. Carpo fasst Albertis Beschreibung und Auffassung der vom Architekten durchlaufenen Entwurfsprozesse zusammen. Der Prozess des Entwerfens beinhaltet ein kontinuierliches Verändern und Anpassen der aus Plänen und in Modellen dargestellten Entwurfsidee, unter dem Einholen unterschiedlicher Meinungen und Expertenschätzungen, bis letztlich der Punkt erreicht wird, an dem der Entwurf eine finale Form annimmt. Ab diesem Moment sind keine weiteren Änderungen mehr zulässig, wobei die Entwurfs- und Bauinformation in der Form von Plänen an den oder die Bauleitenden weitergegeben wird, wobei Carpo explizit darauf hinweist, dass der Baumeister keinen Einfluss auf die Entwurfsentwicklung hat noch ist es ihm erlaubt im Nachhinein Änderungen an diesem vorzunehmen.<sup>205</sup> Diesen Aspekt unterstreicht Carpo mehrfach in seinem Buch *„Alphabet und Algorithmus“*, da es ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zum Modell des Baumeisters darstellt. Während im Fall des Baumeisters und der Dombauhütte Planung und Fabrikation als parallele, sich ergänzende Prozesse stattfinden, wird dahingegen vom Architekten eine, komplett im Voraus zur Phase der Fabrikation abgeschlossene, Planung erwartet. Eine klare Trennung zwischen Entwurf und Fabrikation, also der baulichen Umsetzung, zeichnet sich ab. Darüber hinaus, *„riet Alberti den Architekten davon ab, die Baustelle selbst zu leiten: Seiner Meinung nach ist das Bauen allein Sache der Arbeiter und der Bauleiter.“*<sup>206</sup> Carpo deutet darauf hin, dass diese Art des Bauens, *„seine neue, auf Notation gegründete Art zu Bauen“*<sup>207</sup>, zu Albertis Zeit keineswegs eine verbreitete und übliche Methode darstellte, sondern eher als neue, unorthodoxe Herangehensweise verstanden wurde. Carpo fasst zusammen, was laut seinem Verständnis der Kerngedanke von Albertis Architekturdiskurs betreffend der Thematik des Entwurfs ist:

*„Albertis Architekturtheorie basiert gänzlich auf der Idee notationaler Identität von Entwurf und Gebäude, mit der Vorgabe, dass Zeichnungen identisch in*

---

<sup>203</sup> Alberti, L.B.: „Die zehn Bücher der Architektur“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2005, S. 14.

<sup>204</sup> Ebd., S. 143.

<sup>205</sup> Carpo, M.: „Alphabet und Algorithmus“, transcript Verlag, Bielefeld, 2012, S. 37.

<sup>206</sup> Carpo, M.: „Alphabet und Algorithmus“, transcript Verlag, Bielefeld, 2012, S. 37 zitiert nach Alberti, L.B.: „Zehn Bücher über die Baukunst“ übers. v. M. Theuer, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2005 S. 521.

<sup>207</sup> Ebd., S. 40.

*dreidimensionale Objekte übersetzt werden können und müssen. In Albertis Theorie ist der Entwurf eines Gebäudes das Original und das Gebäude die Kopie.*<sup>208</sup>

Bei der Formulierung dieser These stützt sich Carpo auf das von Nelson Goodman eingeführte Konzept der Differenzierung zwischen autographischen und allographischen Künsten.<sup>209</sup> Goodman benutzt diese Termini, um zwischen Künsten zu unterscheiden, bei denen das Objekt der Kunst vom Autor selber produziert wird oder von einer zweiten Person ausgeführt wird: „*So ist die Malerei autographisch, Musik nicht-autographisch oder allographisch.*“<sup>210</sup> Goodman erläutert dieses Konzept weiter, wenn er erklärt, dass „*die Malerei in diesem Sinne eine einphasige und die Musik eine zweiphasige Kunst ist.*“<sup>211</sup> Der Künstler befasst sich selber mit dem Zeichnen und Malen seiner Bilder, es handelt sich dabei um einen einphasigen Prozess des Schaffens, während Musikpartituren von einem Komponisten verfasst werden, es aber eines Orchesters bedarf, das die Noten spielt und somit die Musik als Klangerlebnis produziert. Die Entstehung von Musik benötigt somit zwei Phasen: das Komponieren und im Anschluss das Spielen. Eine weitere implizite Kondition damit eine Kunst als allographisch bezeichnet werden kann, ist wenn „*sie sich für eine Notation eignet*“<sup>212</sup> Gemeint ist damit, dass die Möglichkeit bestehen muss, die Instruktionen zur Durchführung der Kunst an andere in einer präzisen, schriftlichen Form weiterzugeben. Erst durch das Einführen der Ausführungsplanung erreicht die Architektur in der Renaissance einen allographischen Status, da anders als beim mittelalterlichen Baumeister, der Architekt nicht mehr direkt am Bauen beteiligt ist, sondern ausführende Handwerker die Plananweisungen befolgen. Daher kommt es darauf an, dass das graphische Abbild des Gebäudes, welches auf den Plänen festgehalten wird, mit der gebauten Form übereinstimmt.

## Der Plan

Alberti argumentiert in seinem Werk „*De re aedificatoria*“ zugunsten des Plans als ein notationales Werkzeug. Das Benutzen von Bauplänen zur Weitergabe der Entwurfsdaten gilt heute als Selbstverständlichkeit und erfährt keine weitere Beachtung, da dies ein Standardvorgehen im Baugewerbe darstellt. Carpo verweist darauf, dass „*Albertis offensichtliche Bevorzugung von Zeichnungen gegenüber Modellen als primären Notationsinstrumenten eine bedeutende Weiterentwicklung der spätmittelalterlichen Tradition darstellt.*“<sup>213</sup> Erste Arten von Bauplänen sind bereits

<sup>208</sup> Carpo, M.: „Alphabet und Algorithmus“, transcript Verlag, Bielefeld, 2012, S. 43.

<sup>209</sup> Ebd., S. 31.

<sup>210</sup> Goodman, N.: „Sprachen der Kunst. Entwurf einer Symboltheorie“, Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main, 1995, S. 113.

<sup>211</sup> Ebd., S. 114.

<sup>212</sup> Ebd., S. 120.

<sup>213</sup> Carpo, M.: „Alphabet und Algorithmus“, transcript Verlag, Bielefeld, 2012, S. 39.

aus dem alten Mesopotamien bekannt und stammen aus der Zeit um 2500 v. Chr.,<sup>214</sup> jedoch setzte sich diese Art der Darstellungstechnik über die Jahrhunderte nicht durch, so dass im europäischen Mittelalter die verbale Bauinstruktion Usus war. In der Epoche des Mittelalters wurden beispielsweise bei dem Bau von Kathedralen oder Kirchen keine Pläne eingesetzt, da die notwendigen geometrischen Erkenntnisse nicht zur Verfügung standen, um die dreidimensionalen Schnittvorgaben für Steine zu erfassen.<sup>215</sup> Meistens wurden Pläne zu Zwecken der Visualisierung und Präsentation eines Entwurfs benutzt, wobei erst durch Alberti dem Plan die Dimension einer bautechnischen Ausführungsanleitung zugesprochen wird.<sup>216</sup> Darin besteht einer der wichtigsten Beiträge, die Alberti und die Renaissance für die Architekturdiziplin hervorgebracht haben, denn *„vielmehr war in Bezug auf die Ausführungspläne die einzige technologische Innovation der Renaissance deren Erfindung - oder die Erfindung der Art und Weise, wie sie gebraucht wurden“*.<sup>217</sup> Es muss aber präzisiert werden, dass der Plantypus der Alberti vorschwebte nicht in vollem Maße der heutigen Werk- oder Ausführungsplanung entspricht. Das Ausarbeiten von Ausführungsdetails wurde den in der Praxis versierteren Handwerkern überlassen:

*„Außerdem zu tun, was für den Bedarf zu passen scheint und was ohne Zweifel dem Vorhaben und den Geldmitteln zufolge ausgeführt werden kann, das ist nicht mehr Sache des Architekten als des Handwerkers.“*<sup>218</sup>

Priorität hat das Einhalten der visuellen Bauform, es geht um die Materialwerdung des zeichnerischen Bildes, die im Detail durchgeplante konstruktive Ausarbeitung erhält eine sekundäre Position. Die Einführung des Plans als fester Bestandteil der Instrumentenpalette des Architekten führte gleichzeitig zur seiner Abwesenheit auf der Baustelle.<sup>219</sup> Die imperative Präsenz, wie beim Modell des Baumeisters, war durch das abverlangte Befolgen der Pläne nicht mehr erforderlich. Daraus ergibt sich das Überlassen konstruktiver Problematiken anderen Akteuren. Diese Trennung und Distanzierung von der Baustelle impliziert ein sich Abwenden von der konstruktiven Identität der Architektur.

### **Der Plan als Informationsmedium und Instruktion**

---

<sup>214</sup> Vgl. Rutishauser, S.: „Zukunftspläne. Von der grafischen Darstellung zum digitalen Code“, S. 281 In: Spiro, A., Ganzoni, D. (Hrsg.): „Der Bauplan. Werkzeug des Architekten“, Park Books, Zürich, 2013.

<sup>215</sup> Vgl. Carpo, M.: „Vom Handwerker zum Zeichner. Das Alberti'sche Paradigma und die Erfindung des Bauplans in der Moderne“, S. 278 In: Spiro, A., Ganzoni, D. (Hrsg.): „Der Bauplan. Werkzeug des Architekten“, Park Books, Zürich, 2013.

<sup>216</sup> Ebd., S. 279.

<sup>217</sup> Carpo, M.: „Alphabet und Algorithmus“, transcript Verlag, Bielefeld, 2012, S. 31.

<sup>218</sup> Alberti, L.B.: „Die zehn Bücher der Architektur“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2005, S. 515.

<sup>219</sup> Vgl. Kolarevic, B.: „Information Master Builders“, S. 58 In: Kolarevic, B. (Hrsg.): „Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing“, Taylor and Francis, New York, 2009.

Der Plan entspricht auch einer neuen Methodik der Informationsweitergabe, das für den Baumeister charakteristische verbale Medium wird von einem zeichnerischen ersetzt. Doch Alberti erweitert dieses Konzept, indem er das simultane Benutzen von Plan und Baubeschreibung vorschlägt:

*„Aber nicht allein, was Du beginnst, sondern auch was während der Ausführung nötig ist, sollen wir an Hand der Kopien vorerwägen und bereiten, damit wir wenn der Bau bereits begonnen ist, nicht zögern, nicht ändern, [...] nachdem die ganze Sache in einer kurzen und bündigen Erklärung deutlich auseinandergesetzt ist.“<sup>220</sup>*

Um möglichen Fehlinterpretationen der Pläne entgegenzuwirken, da wahrscheinlich davon auszugehen ist, dass nicht alle Handwerker im Lesen von solchen geschult waren, zumal maßstabsgetreue Pläne in diesem Kontext eine Neuheit darstellten, fügt Alberti die schriftliche Baubeschreibung hinzu. Dennoch stellt in Albertis Auffassung der Plan selbst das wichtigste Werkzeug des Architekten zur Informationsweitergabe dar. Zwar erwähnt Alberti in seinem Traktat auch das Modell, das eher als ein dem Bauplan untergeordnetes Hilfsmittel verstanden wird. Das Modell bzw. das Arbeiten mit Modellen wird als *„Brauch der alten tüchtigen Baumeister“<sup>221</sup>* beschrieben, ganz im Sinne Brunelleschis. Alberti beschreibt den disziplinären Schnitt und das Auseinanderhalten des Konzeptionellen und des Ausführenden, wobei der Plan die essentielle Vermittlerrolle zwischen dem Architekten und den Handwerkern bzw. den ausführenden Kräften einnimmt: *„Und vor allem halte ich es für notwendig, Arbeiter auszuwählen, [...], denen Du das richtig vorgezeichnete Bauwerk zur sorgfältigen Ausführung überträgst und anvertraust zur gewissenhaften Durchführung.“<sup>222</sup>* Das Bauen wird an die Ausführenden delegiert, wobei ein Informationskontinuum wie im Fall des Baumeisterparadigmas aufgehoben wird. Die Trennung von Planung und Ausführung wird konsequent auf allen Ebenen verfolgt, wobei der Plan das einzige Verbindungsglied zwischen Architekt und Handwerker repräsentiert.

### **Der Plan als Instrument der Hierarchisierung**

Bedingt durch das sich Durchsetzen des Bauplans als wesentliches Entwurfs- und Kommunikationsinstrument während der Renaissance, trat im Folgenden auch die Differenzierung zwischen dem Akt des Zeichnens und dem des Bauens auf, was wiederum zu einer breiteren Differenzierung innerhalb der Baubranche selber geführt hat.<sup>223</sup> Der Architekt wird mit dem Planerischen, dem Fertigstellen von Bauplänen assoziiert, während das Fertigen und Bauen anderen überlassen wird. Dies führt zu einer ausgeprägteren Hierarchisierung der Prozessbeteiligten und der Aktivitäten. Der

---

<sup>220</sup> Alberti, L.B.: „Die zehn Bücher der Architektur“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2005, S. 514.

<sup>221</sup> Ebd., S. 68.

<sup>222</sup> Ebd., S. 76.

<sup>223</sup> Vgl. Schumacher, P.: „The Autopoiesis of Architecture. A New Framework for Architecture“, Wiley Verlag, Chichester, 2011, S. 81.

Gestaltung, Komposition und dem Entwurf wird eine höhere Priorität und Wertschätzung und Leistung zugesprochen, als den bauausführenden Aktivitäten. Der Plan wird zum Dreh- und Angelpunkt der gesamten Bauprozesse, aber er wird ausschließlich der intellektuellen Leistung des Architekten zugeordnet. Die Organisation der mittelalterlichen Dombauhütte hatte auch einen hierarchischen Aufbau, der sich aber auf die Autorität im Sinne der Bauleitung bezog. Das Albertianische Paradigma sieht eine Art von Zwei-Klassen-System vor, bei dem Handwerker die für den Intellekt des Architekten unwürdige bauliche Aufgabe übernehmen und somit eine rein instrumentale Rolle erfüllen.

### **Plan als Garant der Autorenschaft**

Alberti begreift den Plan auch als zeitlosen Informationsträger, der selbst nach dem Ableben des Architekten zur Vollendung der vorgesehenen Massnahmen benutzt werden kann und soll, ohne dass abweichende Änderungen vorgenommen werden müssen.<sup>224</sup> Er schreibt dem Plan eine bindende vertragliche Dimension zu, wobei der im Plan festgehaltene Entwurfsstand als geistiges Eigentum des Architekten eingestuft wird. Dem Architekten wird implizit der Autorenstatus zugesprochen. Die Kompetenz und intellektuelle Leistung des Architekten darf nicht von anderen Parteien in Frage gestellt werden oder Veränderungen durch zum Bauen zwar qualifizierte, aber darüber hinaus nicht als planerisch kompetent eingestufte Projektbeteiligte müssen gemieden werden. Den Status des Architekten als Autor setzt Carpo mit dem Plan als notationales Instrument in Verbindung: *„Wenn diese Bedingung der notationalen Identikalität erfüllt ist, dann wird der Autor einer Zeichnung zum Autor eines Gebäudes.“*<sup>225</sup> Da Alberti nach der Übereinstimmung von dem Abbild des Entwurfs, festgehalten auf dem Plan, und dem Abbild des Materiellen, also dem gebauten Entwurf, verlangt, hängt die Autorenschaft von dem Grad der Übereinstimmung ab. Der Plan spielt nicht nur eine erklärende Rolle für die Ausführung, sondern ihm wird die neue Dimension des intellektuellen Eigentums zugesprochen.

### **Das durch Pragmatismus begründete Schisma**

Das von Alberti verlangte Schisma zwischen dem Planen und dem Bauen wird äußerst deutlich vorgeführt, wenn er die ausführende Ebene komplett den Handwerkern überlässt und sich für die potentiell durch diese verursachten baulichen Irrtümer in keiner Weise verantwortlich sieht: *„Die handwerklichen Irrtümer brauche ich nicht aufzuzählen, sondern die Handwerker sollen es sich selbst angelegen sein lassen, sich des Lotes, der Schnur, der Lehre und des rechten Winkels richtig zu*

---

<sup>224</sup> Alberti, L.B.: „Die zehn Bücher der Architektur“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2005, S. 521.

<sup>225</sup> Carpo, M.: „Alphabet und Algorithmus“, transcript Verlag, Bielefeld, 2012, S. 39.

*bedienen.*<sup>226</sup> Einer der Gründe für die vehement postulierte strikte Trennung zwischen Planung und Ausführung wird von Alberti am Ende des neunten Buches erläutert. Wird der Architekt direkt in die Ausführung impliziert, so können ihm jede beim Bauen auftauchende Fehler, die durch die minderwertige Ausführung anderer verschuldet sind, direkt diesem vorgeworfen und angerechnet werden.<sup>227</sup> Der Eindruck wird vermittelt, dass es Alberti eher um die Distanzierung von auftretenden Mängeln während der Bauausführung geht und dass somit die von ihm formulierte Trennung der Planungs- und Bauphasen teilweise auch in einem scharfkantigen Pragmatismus verwurzelt ist.

### **Zur Maschine und zum Erfindungsgeist**

Anders als bei Vitruv, der den Maschinenbau als Teilgebiet der Architektur definierte, ignoriert Alberti die Thematik des Maschinenbaus und der Maschine und erwähnt nicht die Notwendigkeit ihrer Beherrschung. Herbert Ricken erklärt dies indem er die Meinung äußert, dass die Angehörigkeit des Maschinenbaus zur Architektur für Alberti als eine Selbstverständlichkeit galt, so dass die Notwendigkeit des klaren Benennens dieser Kompetenz seiner Auffassung nach gar nicht erst bestand.<sup>228</sup> Diese Argumentationsart ist jedoch anzuzweifeln, zumal andere Aktivitäten, wie das Zeichnen, Vermessen usw. auch als selbstverständliche Qualifikationen betrachtet werden können, Alberti diese aber trotzdem erwähnt und ihre Wichtigkeit für die Disziplin einzeln erläutert. Während Vitruv dem Thema des Maschinenbaus und der Maschine ein ganzes Buch widmet, adressiert Alberti diese Thematik nicht, obwohl er sich detailliert mit Themen, die heute dem Ingenieurbau zuzuweisen sind, befasst, wie es auch Herbert Ricken feststellt. An einigen Stellen werden Maschinen und ihre Funktionsweise skizzierend beschrieben, wie wenn beispielsweise „*die Maschinen zum Schlagen der Pfähle*“ bei Gründungen umschrieben werden.<sup>229</sup> In dem sechsten Buch seines Traktats, das eigentlich dem Schmuck also dem Ornament gewidmet ist, befasst sich Alberti parallel mit der Thematik des Hebens von Lasten. Die unterschiedlichen Arten von Hebe- und Positionierungsmechanismen begreift Alberti als Maschinen, bei deren Beschreibung er einen Ansatz biologischer Mimetik offenlegt:

*„Doch hier wollte ich nur zeigen, daß [sic!] die Maschinen Lebewesen mit sehr kräftigen Händen gleichen und daß [sic!] sie die Lasten fast auf keine andere Art bewegen, als wie wir sie selbst bewegen würden. Daher müssen wir die Bewegung*

---

<sup>226</sup> Alberti, L.B.: „Die zehn Bücher der Architektur“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2005, S. 514.

<sup>227</sup> Ebd., S. 520.

<sup>228</sup> Vgl. Ricken, H.: „Der Architekt. Geschichte eines Berufs“, Henschelverlag Kunst und Gesellschaft, Berlin, 1977, S. 53.

<sup>229</sup> Vgl. Alberti, L.B.: „Die zehn Bücher der Architektur“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2005, S. 125.

*unserer Glieder und Sehnen, die wir beim Wegwerfen, Stoßen, Ziehen, Versetzen anwenden, auch bei den Maschinen nachahmen.*<sup>230</sup>

Die Nachahmung der menschlichen Bewegungsmechanismen im Sinne der Bionik entspricht dem wissenschaftlich-technischen Aufbruchgeist der Renaissance, jedoch verweilt das Thema der Maschine auf einer deskriptiven Ebene. In „*De re aedificatoria*“ geht Alberti in keiner Weise auf das Potenzial des Architekten in der Position als Maschinenentwickler ein. Genauso wenig wird der Einfluss der Maschine als den Entwurf begünstigendes Instrument veranschaulicht. Zwar äußert er sich Ende seines neunten Buches zum Thema der durch den Architekten generierten technischen Innovation, wenn er folgende Feststellung zum Ausdruck bringt:

*„Es wird auch gern gesehen, wenn man etwas Neues eigener Erfindung veröffentlicht, was wir bewundern können, vielleicht wie die Erfindung desjenigen, der ein Heiligtum ohne irgendein Eisengerät baute.“*<sup>231</sup>

Bautechnischer Fortschritt ausgehend vom Architekten wird also als erstrebenswert aufgefasst. Die Thematik der technischen Innovation, die als Treiber der Gesamtdisziplin agieren kann, wird aber nicht näher kommentiert. Ebenso wenig wird darauf Bezug genommen, wie die Erweiterung der Fabrikationsmöglichkeiten sich auf den Entwurfsprozess auswirken kann und welche Interdependenz zwischen beiden besteht. Zudem wird die Rolle des Architekten als Erfinder und die Relevanz der Äußerung drastisch entschärft, wenn im darauffolgenden Satz der Einsatz von vierundzwanzig Elefanten zum Errichten einer Statue auf einem öffentlichen Platz ebenfalls als erfinderisch kategorisiert wird, da es „*auch Aufsehen machte*“<sup>232</sup> Diese Juxtaposition relativiert den Wert der vorherigen Aussage, wobei der Eindruck erweckt wird, dass es eher um die öffentliche Zurschaustellung origineller Methoden geht, die, so man will, bei dem Laienpublikum Bewunderung für den Beruf auslösen. Als Endeffekt wird somit der gehobene Status des Architekten untermauert. Das Inszenieren technischer Versiertheit scheint in diesem Kontext eher der Absicht Albertis zu entsprechen, als der disziplinäre Wert der Innovation selbst. Somit kann davon ausgegangen werden, dass Alberti dem Maschinenbau als Arbeitsfeld des Architekten keine größere Bedeutung beimisst und er ihn weder als relevantes Instrument des Entwurfs noch der Fabrikation versteht.

## **5. Schlussfolgerungen, im Kontext der digitalen Praxis**

Albertis wichtigster Beitrag bestand zweifelsohne in der Auseinandersetzung mit den theoretischen Aspekten der Architektur und dem Reaktivieren, wenn man so will, des

---

<sup>230</sup> Alberti, L.B.: „Die zehn Bücher der Architektur“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2005, S. 320.

<sup>231</sup> Ebd., S. 517.

<sup>232</sup> Ebd., S. 517.

Konstrukts der disziplinären Selbstreflexion und implizit der Architekturtheorie. Die Signifikanz seiner Leistung wird von Patrick Schumacher treffend zusammengefasst:

„ [Anm. d. A.: Alberti] half dabei den Beruf von dem Status eines Handwerks auf dem Status eines gelernten Diskurses anzuheben, der auf Grundsätzen und Argumenten basiert, die auf der Basis des Geschriebenen ausgearbeitet, einstudiert, kritisiert und vorangebracht wurden.“<sup>233</sup>

Der Enthusiasmus diese Leistung betreffend muss jedoch eingegrenzt werden. Die Wiederentdeckung der theoretisierenden Natur kann Alberti angerechnet werden, aber es muss gleichzeitig daran erinnert werden, dass im Gegensatz dazu die handwerklich-konstruktive Natur der Architektur aufgegeben bzw. stark vernachlässigt wurde. Zwar hat sich Alberti nachweislich dem Studium der alten griechischen und römischen Architektur gewidmet, jedoch wendet er sich von dem Konzept der *techné* als Einheit von Wissen, Intellekt und praktischen Fertigkeiten ab, indem er die Qualitäten des Umsetzenden ignoriert. Architektur als Reflexion des menschlichen Intellekts zu interpretieren besitzt durchaus seine Validität. Die Fähigkeit zur Theoretisierung der eigenen gestalterischen Handlungen definiert die Architektur als eigenständige Disziplin, jedoch ist das Umsetzende weiterhin der Architektur inhärent. Alberti stuft die Handwerker als „*alleinige Instrumente der Ausführung*“<sup>234</sup> ein. Das Handwerkliche wurde in seiner Wahrnehmung degradiert, gewissermaßen als irrelevant eingeordnet. Denn „*die Abwertung des Handwerkers steht in Einklang mit Albertis elitärem Bewußtsein [sic!]*“<sup>235</sup> Eine im Elitarismus, nicht zwingend in der Autorität, wie im weiteren Verlauf noch argumentiert wird, verankerte Hierarchisierung der Berufsstände wird somit generiert. Diese mündet in dem Nichtwürdigen der schaffenden Komponente. Diese Art der Hierarchisierung kann als ein Symptom der Notwendigkeit einer Delimitierung des Architekten vom Bauhandwerk interpretiert werden.<sup>236</sup> Das Etablieren und Durchsetzen eines neuen Berufsprofils ist legitim und nachvollziehbar, da zwischen Baumeister oder Architekt und den Handwerkern professionelle Unterschiede im Bereich ihrer Kompetenzen bestehen, jedoch kommt bei Alberti der Eindruck herablassender Überlegenheit auf. Das dringende Ablösen von einer niedrigen Zunft wird suggeriert, wobei der Architekt dem Status eines Gelehrten gleichgesetzt wird.

Diese Form elitären Bewusstseins kann einerseits gelobt werden, da es der Disziplin der Architektur einen neuen separaten Status verleiht, aber auch andererseits angeklagt werden. Denn es setzte die Disziplin und den Beruf des Architekten „auf

<sup>233</sup> Schumacher, P.: „The Autopoiesis of Architecture. A New Framework for Architecture“, Wiley Verlag, Chichester, 2011, S. 512.

<sup>234</sup> Ebd., S. 517.

<sup>235</sup> Choay, F.: „De re aedificatoria als Metapher einer Disziplin“, S. 228, In: Forster, K. W., Locher, H. (Hrsg.): „Theorie der Praxis. Leon Battista Alberti als Humanist und Theoretiker der bildenden Künste“, Akademie Verlag, Berlin, 1999, S. 217-231.

<sup>236</sup> Vgl. Schumacher, P.: „The Autopoiesis of Architecture. A New Framework for Architecture“, Wiley Verlag, Chichester, 2011, S. 516.

dem Weg einer stetig wachsenden Irrelevanz im 20. Jahrhundert“.<sup>237</sup> Es hat zu einer selbstausgehängten Isolation aus dem Bereich des Konstruktiven geführt, die in der Abwendung vom Baulichen fundiert ist. Schumacher argumentiert, dass dem Architekten durch die Einnahme der Position eines reflektierenden Entwerfers „eine neue Stufe der Kontrolle und Voraussicht ermöglicht wird im Vergleich zu den Methoden des Baumeisters.“<sup>238</sup> Dem ist zu widersprechen, da das Überlassen bautechnischer und ausführender Aspekte nicht ein Äquivalent zu einer Steigerung seiner Potenz darstellen kann. Das Erschaffen „eines perfekten Entwurfs entsprechend logisch aufgebauter, theoretischer Prinzipien“<sup>239</sup> findet nicht immer die gewünschte Bestätigung in der Praxis, da selten im Voraus die Berücksichtigung aller Faktoren einkalkuliert werden kann. Zudem befasst sich der Architekt nicht mehr mit der Entwicklung einer zusammenhängenden Baustrategie, da die Details der Ausführung den Bauenden überlassen werden. Zwar bemüht sich Alberti in seinem umfangreichen Werk die Baupraxis in ihrer Gesamtheit zu erfassen, trotzdem liest sich sein Traktat eher als „eine Analyse der Voraussetzungen, die den Bauabsichten und dem Bauen zugrundeliegen“.<sup>240</sup> Die Loslösung von der konstruktiven Ebene korreliert in effectu mit Einbussen im Bereich der Autorität des Architekten, da er nicht länger als Spezialist in Fragen der Bautechnik und Umsetzung seiner Entwürfe gilt. Diese Position wurde somit an andere Spezialisten abgetreten. Anders als beim Paradigma des Baumeisters entfallen die Aufgaben der Baustellenorganisation und -koordination in ihrer Gänze. Der Autoritätsverlust korreliert mit einem Verlust der Kontrolle über die Prozessgestaltung der Fertigung. Schon ab diesem Moment werden die Fugen für die disziplinäre Trennung zwischen dem Architekten und dem heutigen Bauingenieur geschaffen. Mit seiner Abhandlung hat Alberti das Fundament für die moderne Arbeitsmethodik gelegt, da die Trennung der Entwurfs- und Fabrikationsphase weiterhin überwiegend präsent in der heutigen Praxis ist.<sup>241</sup> Das Entkoppeln beider Etappen voneinander hat Konsequenzen für die Art der Berufsausübung, da der Architekt ausschließlich für das Entwerferische und eventuell für die Vorplanung der Bauphase zuständig ist.

Das Separieren der Phasen geht mit einer anderen Unterbrechung, nämlich der informativen, einher. Einschließlich das Informationskontinuum wird einer Fraktion unterzogen. Während bei dem Baumeisterparadigma die Entwurfs- und Fabrikationsinformation sich gegenseitig generieren, wird dieses zirkuläre Modell beim albertianischen Paradigma durch das Einführen des Plans als reiner Vermittler, der zur Datenweitergabe zwischen dem Intellektuellen und dem Ausführenden dient,

---

<sup>237</sup> Kolarevic, B.: „Information Master Builders“, S. 58 In: Kolarevic, B. (Hrsg.): „Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing“, Taylor and Francis, New York, 2009.

<sup>238</sup> Schumacher, P.: „The Autopoiesis of Architecture. A New Framework for Architecture“, Wiley Verlag, Chichester, 2011, S. 517.

<sup>239</sup> Ebd., S. 517.

<sup>240</sup> Borsi, F.: „Leon Battista Alberti. Das Gesamtwerk“, Belser Verlag, Stuttgart Zürich, 1982, S. 320.

<sup>241</sup> Vgl. Carpo, M.: „Alphabet und Algorithmus“, transcript Verlag, Bielefeld, 2012, S. 87.

durchtrennt. Aus dem reichen instrumentalen Vokabular der Baumeister oder Handwerker verbleibt der Plan als Hauptwerkzeug für den Architekten. Die Signifikanz des Bauplans wird somit zweifellos über allen anderen Instrumenten positioniert. Das Codieren von Entwurfsinformation in der Form eines notationalen Systems entspricht der heutigen Arbeitsmethodik. Das Vermitteln von Instruktionen spielt sich nicht mehr wie zuvor auf einer überwiegend verbalen Ebene ab, wie es der Fall bei den gotischen Baumeistern war, sondern nimmt eine zeichnerische Form an. Entwurfsinformation nimmt die codierte Form des Bauplans an. Wenn der Bauplan als eine „*konstruktive Absicht*“<sup>242</sup> definiert wird, dann ist damit eine reduziertere Form der heutigen Werkplanung gemeint. Zu Albertis Zeit beinhaltete der Plan hauptsächlich die formale Vorgabe zur Materialisierung, nicht aber die gesamte Dimension der konstruktiven Detaillierung. Die Gewährleistung der notationalen Identikalität zwischen dem Gezeichneten und dem Gebauten steht bei Alberti an erster Stelle. Dieses Verhältnis besteht teilweise noch heute in der gegenwärtigen Praxis. Carpo argumentiert jedoch, bezogen auf das Digitale, dass die Wichtigkeit der visuellen Gleichheit fortlaufend irrelevanter wird, da es auf eine Übereinstimmung digitaler Datensätze ankommt und somit die optische Identikalität zu einem Kriterium wird das eher der Trivialität angehört.<sup>243</sup> Bei dem Einsatz von Robotern verändert sich das Verhältnis zur codierten Information. Der Roboter stellt zwar kein passives, zweidimensionales Zeicheninstrument dar, sondern eine aktive Maschine, der Handlungsinstruktionen in Form von tatsächlichem Code zugespielt werden. In diesem Kontext entspricht der Roboter dem ausführenden Handwerker, während der Plan durch den digitalen Code ersetzt wird, der die konstruktive Absicht in Form von numerischen Instruktionen beinhaltet. Der Roboter wird zu einer Erweiterung des Architekten selber, da die Ausführung nicht mehr an andere Personen, die als Vermittler agieren würden, delegiert wird. Die Instruktionen zur Ausführung werden vom Entwerfer formuliert und sind Teil der von ihm entwickelten Baumethodik und übergeordneten Baustrategie. Das Handwerkliche wird direkt vom Architekten auf dem Roboter transferiert.

Durch das bei Alberti postulierte Schisma zwischen Entwurf und Fabrikation wird die konstruktive Integrität der Disziplin aufgehoben. Der Architekt entwickelt sich zu einem Gestalter von Raum, Raumsequenzen, räumlichen Qualitäten, alles verbunden mit der Komponente einer gesellschaftlichen Verantwortung. „*Das Projektieren als reine Gedankenarbeit*“<sup>244</sup> generiert das Schisma zwischen Entwerfen und Fertigen. Durch das Abstufen der handwerklichen Betätigung und das Abkapseln der Bautechnik aus der Sphäre des Architekten, verliert die Entwicklung einer durchgehenden entwerferischen und konstruktiven Strategie ihre Tiefe, da dem Gestalterischen die primäre Signifikanz zugesprochen wird. Diese Entwicklung kann

---

<sup>242</sup> Esch, P.: „Mit etwas Abstand betrachtet. Möglichkeiten des Vermittelns“, S. 307 In: Spiro, A., Ganzoni, D. (Hrsg.): „Der Bauplan. Werkzeug des Architekten“, Park Books, Zürich, 2013.

<sup>243</sup> Vgl. Carpo, M.: „Alphabet und Algorithmus“, transcript Verlag, Bielefeld, 2012, S. 18.

<sup>244</sup> Borsi, F.: „Leon Battista Alberti. Das Gesamtwerk“, Belser Verlag, Stuttgart Zürich, 1982, S. 332.

aus zwei Perspektiven betrachtet werden. Zum einen kann dies so gedeutet werden, dass das Konstruktive als entwurfsbestimmender Parameter entfällt. Ein anderer Interpretationsansatz wäre, dass ganz im Gegensatz der Entwurf sich von vornherein den konstruktiven Limitierungen und den Grenzen der Fabrikation beugt. Denn wie im Fallbeispiel von Brunelleschis Domkuppel führt die Entwicklung neuer Techniken der Montage, der Fabrikation und die Entwicklung neuer Maschinentypen zu einer gestalterischen Mitbestimmung, da diese Prozesse parallel zur Entwurfsphase ablaufen. Ungeachtet zu welchem Betrachtungswinkel man geneigt ist, das Resultat besteht in dem Einbüßen der entwerferischen Freiheitsgrade. Denn sowohl für den digitalen als auch den nicht-digitalen Kontext gilt, dass das Ausmaß geometrischer Freiheitsgrade bezüglich des Entwurfs mit der Kontrolle über eine wachsende Anzahl von Parametern korreliert.<sup>245</sup> Das Erweitern der gestalterischen Freiheit wird durch das intensive Auseinandersetzen mit Material-, Fabrikations-, Strategie- und Maschinen- und Montagefragen konditioniert. Bei der Sicherstellung und Konservierung der entwerferischen Freiheit spielt die Komponente der Maschine eine Schlüsselrolle. Denn die Umsetzbarkeit ist an die Fähigkeiten des Maschinellen gebunden. Aus diesem Gesichtspunkt, kann das Entwerfen als ein obsoleter Akt betrachtet werden, wenn die technische Realisierbarkeit nicht gegeben ist. Der Architekt verfügt über das Wissen und Urteilsvermögen eine Fabrikationsstrategie aufzubauen, die dem Spezifischen seines Entwurfs entspricht, so dass keine Einschränkungen in Kauf genommen werden müssen. Das Maschinelle wird bei Alberti in seiner Gesamtheit verdrängt, die Rolle des Architekten als Erfinder oder Entwickler von Maschinen wird ignoriert. An Brunelleschis Beispiel lässt sich das Potenzial des Architekten als Erfinder neuer Baumaschinen und -strategien illustrieren. Zudem wird durch das proklamierte Schisma zwischen Entwurf und Ausführung der interdisziplinäre Charakter der Architektur abgeschwächt. Wenn die Interaktion zwischen Entwerfer und Ausführenden auf ein Minimum reduziert wird, erzeugt dies den Effekt, dass das Erarbeiten neuer konstruktiver Lösungsansätze eingeschränkt wird.

Eines der weiteren grundlegenden Unterschiede zwischen beiden Modellen liegt im Bereich der Information und der Informationsweitergabe. Da beim Modell des Baumeisters der Einsatz von Ausführungsplänen nicht integrierter Teil der Arbeitsmethodik war, stimmen Entwurfs- und Fertigungsinformation überein.<sup>246</sup> In diesem Sinn sind beide Begriffe als Synonyme zu betrachten. Die Bauinformation beeinflusst die Ausprägung des Entwurfs, wobei zwischen beiden keine Hierarchisierung besteht. Im Fall vom albertianischen Paradigma sind Entwurfs- und Fabrikationsinformation entkoppelt. Die Entwurfsinformation nimmt die primäre Position ein, während die Fertigungsinformation dieser untergeordnet ist. Der Bauplan gibt hauptsächlich Form und ästhetische Ausprägung an, während die Fertigungsinformation zum größten Teil von den Ausführenden entwickelt wird.

---

<sup>245</sup> Vgl. Mitchell, J. W.: „Design Worlds and Fabrication Machines“, S. 76 In: Kolarevic, B. (Hrsg.): „Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing“, Taylor and Francis, New York, 2009.

<sup>246</sup> Vgl. Kolarevic, B.: „Information Master Builders“, S. 57 In: Kolarevic, B. (Hrsg.): „Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing“, Taylor and Francis, New York, 2009.

Leonardo Benevolo erfasst die Natur der Arbeitsmethodik, gebunden an die verschieden aufgefassten Informationskreisläufe, in folgenden Formulierungen äußerst treffend. Beim Paradigma des Baumeisters „*richtet sich die Planung nach der Ausführung*“<sup>247</sup>, während das albertianische Paradigma dieses Verhältnis umdreht, so dass sich „*Ausführung nach der Planung*“<sup>248</sup> richtet. Die Rolle des Plans und somit der Planung bei beiden Modellen ergibt sich daraus. Die zentrale Position beim albertianischen Paradigma nimmt der Plan ein, als eine Notation der intellektuellen planerischen Leistung, die vom Entwerfer erbracht wurde.

Das Ausklammern einer handwerklichen Betätigung seitens des Architekten beim albertianischen Paradigma verkörpert einen weiteren Schritt bezüglich der disziplinären Entfremdung vom Konstruktiven. Das Verfolgen handwerklicher Arbeitsweisen stellt beim Paradigma des Baumeisters ein Schlüsselement dar, denn es bezieht sich auf die Kontrolle über die Werkzeuge der Fabrikation, die aktive Entwurfparameter personifizieren. Bezogen auf das digitale Medium lassen sich ähnliche Verhältnisse feststellen. Branko Kolarevic beschreibt wie folgt das im Digitalen verankerte Handwerk:

*„ein Set wohl durchdachter Aktionen basierend auf kontinuierlichen, iterativen Versuchsdurchführungen, Irrtümern und Modifikationen, die zu innovativen, unerwarteten und unvorhersehbaren Ergebnissen führen, welche in den verflochtenen Prozessen der Konzeption und Produktion entstehen.“*<sup>249</sup>

Die Parallelitäten zur handwerklichen Betätigung und zum Baumeisterparadigma sind leicht zu identifizieren. Im Mittelpunkt steht das Kontinuum von Entwurf und Fertigung, dem sowohl experimentelle als auch methodisch erprobte Prozesse zugrunde liegen. Dabei sind angeeignete Erfahrungswerte bezüglich des Materials, des Programmierens und des Maschineneinsatzes von größter Relevanz und Signifikanz. Ganz im Sinne von Albertis Paradigma animiert das Benutzen digitaler Fabrikationswerkzeuge, zu denen auch der Roboter gezählt wird, zu einer vertieften intellektuellen Betätigung des Architekten, sowohl auf der Ebene des Entwurfs als auch auf der Ebene der Umsetzung, da, wie bereits argumentiert, erweiterte Fabrikationsmöglichkeiten die Sphäre des Entwurfs erweitern und neue konzeptuelle Vorhaben ermöglichen.<sup>250</sup> Zudem erkennt auch Carpo Gemeinsamkeiten zwischen der manuellen und digitalen Produktion, wobei er zwischen beiden einen hohen

<sup>247</sup> Vgl. Benevolo, L.: „Geschichte der Architektur des 19. und 20. Jahrhunderts“, Band 1, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, München, 1990, S. 28.

<sup>248</sup> Ebd., S. 28.

<sup>249</sup> Vgl. Kolarevic, B.: „The (Risky) Craft of Digital Making“, S. 127 In: Kolarevic, B., Klinger, K. (Hrsg.): „Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture“, Routledge Taylor and Francis, New York (2008).

<sup>250</sup> Vgl. Denari, N.: „Precise Form for an Imprecise World“, S. 32 In: Marble, S. (Hrsg.): „Digital Workflows in Architecture. Designing Design - Designing Assembly - Designing Industry“, Birkhäuser, Basel, 2012.

Verwandtschaftsgrad identifiziert. Das Manuelle und Digitale stellt er der mechanischen Produktion, im Sinne der Industrialisierung, gegenüber. In seinen Reflexionen geht er so weit, dass er folgende Äußerung formuliert:

*„Zusammenfassend scheint es so auszusehen, als ob aus der Perspektive der longue durée der historischen Zeit das Zeitalter der massenproduzierten, standardisierten, mechanischen und identischen Kopien als kurzes Zwischenspiel betrachtet werden muss, mit einem relativ kurzen Zeitalter der manuellen Produktion und einem Zeitalter der digitalen Produktion, das dieses ersetzt. [...] aber spezifisch für die heutige, digitale Zeit ist die Fähigkeit, serielle Variation und Differentialität bewusst zu gestalten und in Masse zu produzieren.“<sup>251</sup>*

Auf diese Art assoziiert er somit das Digitale mit dem Potenzial sich sowohl die Fertigungseigenschaften des Manuellen als auch des Mechanischen anzueignen. Die manuelle, handwerkliche Fertigung führt zur Entstehung ähnlicher Produkte, die mechanisch-maschinelle Produktion zur standardisierten Serie, während die digitalen Produktionsverfahren sowohl serielle Vorfertigung als auch spezifisch-individuelle Massenproduktion ermöglichen. Mit Letzterem ist der Grad der kontrollierten Veränderbarkeit ähnlicher Objekte gemeint, die allesamt der gleichen Serie angehören. Manueller und digitale Fertigung unterschieden sich bezüglich der Variation. *„Aber der Grad der Variabilität und vor allem der Interaktivität, der der Weitergabe und Manipulation von digitalen Signalen eigen ist, ist unvergleichbar höher.“<sup>252</sup>* Der Gedanke der Variabilität kann von den digitalen, parametrischen Entwurfswerkzeuge auf digital gesteuerte Fertigungsmaschinen wie Industrieroboter und selbst entwickelte Robotersysteme übertragen werden. Robotersysteme stellen Mechanismen dar, die mittels eines reduzierten Eingreifens so verändert werden können, dass sie den spezifischen Ansprüchen eines jeden Entwurfs genügen. Durch das Platzen des Architekten in die Rolle eines Erfinders verfügt er über die notwendigen Mittel diese Manipulationen vorzunehmen und somit die Idee der Variabilität von der Ebene des Entwurfs auf die, oft als untergeordnet empfundene oder betrachtete, Ebene der Fabrikation zu übertragen.

Die gegenwärtigen Entwicklungen in der digitalen Praxis weisen einen hohen Verwandtschaftsgrad mit der mittelalterlichen Baupraxis auf. Sie beruhen auf denselben Vorgehensmethoden und übergeordneten Logiken. Das Digitale und das Handwerklich-Manuelle klammern sich nicht gegenseitig aus. Das Digital-Maschinelle kann als eine Weiterentwicklung des Manuellen gedeutet werden. Das Paradigma nach Brunelleschis Vorbild demonstriert zudem die von der Maschine eingenommene Rolle. Die Partizipation des Architekten bei der Entwicklung und dem Erfinden von Baumaschinen nimmt eine zentrale Rolle ein und vermittelt zwischen Entwurf und Fertigung.

---

<sup>251</sup> Carpo, M.: „Alphabet und Algorithmus“, transcript Verlag, Bielefeld, 2012, S. 25.

<sup>252</sup> Ebd., S. 21.

Im nachfolgenden Kapitell wird vertieft auf die technische Innovation als Auslöser zur Einnahme neuer Entwicklungsrichtungen in der Architektur eingegangen.

## IV. Industrialisierung

### 1. Ein neuer Kontext

Im weiteren Verlauf wird der Versuch unternommen, durch eine Untersuchung der Industriellen Revolution die existierenden Zusammenhänge zwischen der technologischen Entwicklung, dem vermehrten Auftreten technologischer Inventionen und Material- und Verfahrensinnovationen, zu veranschaulichen. Das Ziel besteht in der Konstruktion eines Gesamtbildes, das die Implikationen solcher Synergien für die Architektur oder Teilbereiche dieser verdeutlicht. Zum Illustrieren solcher kausalen Verknüpfungen und Interdependenzen eignet sich die Industrielle Revolution, da nur wenige andere Epochen so stark vom technologischen Wandel geprägt wurden.

Die Industrialisierung stellt eine Phase im 19. Jahrhundert dar, welcher in einem komplexen Netzwerk sozialer, ökonomischer und politischer Vernetzungen eingebettet ist. Der durch die Industrielle Revolution eingeleitete Wandel hat vor allem in den Bereichen der Technik, Wirtschaft, Gesundheit und Gesellschaft gegriffen.<sup>253</sup> Gekennzeichnet wird dieser Abschnitt der Menschheitsgeschichte vor allem durch das Auftreten einer Vielzahl von technischen Erfindungen und Verfahren, wie die Dampfmaschine oder neue Verfahren zur Herstellung von Eisen und Stahl. In diesem Zusammenhang gibt es eine andauernde Debatte in welchem Maße die Industrielle Revolution von Innovation in dem Bereich der Wissenschaft oder Technik geprägt wurde, wobei festzuhalten ist, dass *„die meisten [Anm. d. A. Innovationen] der Tätigkeit von Handwerkern und Tüflern entstammten, die wenigsten der von Naturwissenschaftlern. [...] Der Beitrag der Naturwissenschaften zur Industriellen Revolution dürfte mehr indirekt als direkt gewesen sein. Sie wirkten daran mit, dass sie innovative Mentalitäten verbreiteten“*.<sup>254</sup>

Der wissenschaftliche Fortschritt ist, bezogen auf die Architektur, in den Bereichen der Materialforschung, wie bei Stahl, Glas oder Zement, oder im Bereich der Geometrie von großer Relevanz.<sup>255</sup> Wenn während der Renaissance Architekten wie Alberti mit den Problemen der graphischen Darstellung komplexer geometrischer Verhältnisse bei der Realisierung von Bauplänen konfrontiert wurden, so wird durch das Erfinden der darstellenden Geometrie und der Einführung des metrischen Dezimalsystems der Prozess der Darstellung erheblich erleichtert.<sup>256</sup> Dennoch ist es wichtig die differenzierte Betrachtung von wissenschaftlichen technischen

---

<sup>253</sup> Vgl. Klemm, F.: „Geschichte der Technik: der Mensch und seine Erfindungen im Bereich des Abendlandes“, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1998, S. 142; Vgl. König, W.: „Technikgeschichte. Eine Einführung in ihre Konzepte und Forschungsergebnisse“, Grundzüge der Modernen Wirtschaftsgeschichte Band 7, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2009, S. 111.

<sup>254</sup> König, W.: „Technikgeschichte. Eine Einführung in ihre Konzepte und Forschungsergebnisse“, Grundzüge der Modernen Wirtschaftsgeschichte Band 7, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2009, S. 116.

<sup>255</sup> Vgl. Benevolo, L.: „Geschichte der Architektur des 19. und 20. Jahrhunderts“, Band 1, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, München, 1990, S. 37.

<sup>256</sup> Ebd., S. 40.

Innovationen festzuhalten. Die vorliegende Arbeit verfolgt die Auswirkungen technischer, und nicht wissenschaftlicher, Evolution auf die Industrie und speziell auf Fabrikation und Produktion zu verdeutlichen. Das Veranschaulichen der Implikationen, die sich aus diesen Entwicklungen ableiten lassen, steht dabei im Fokus.

Die Mechanisierung der Produktion und das vermehrte Auftreten unterschiedlicher Arten von Fabriken und Produktionsstätten, verschuldet durch die Erfindung neuer Maschinen und Verfahren, führten zu einer Verlagerung der Arbeitskräfte und ihrer Arbeitsweise:

*„Zwischen 1750 und 1840 ging der Anteil der in der Landwirtschaft Beschäftigten von etwa 50 auf 15% zurück. Der Anteil der in der Industrie, Bergbau und Gewerbe Tätigen stieg von etwa 25 auf 63%. [...] Zudem fand besonders nach 1830 eine Verschiebung zwischen Handwerk und Industrie statt.“<sup>257</sup>*

Mit dem schnellen Voranschreiten der Industrialisierung wurden das Handwerk und die Handwerksbetriebe durch das Auftreten der Fabrik verdrängt. Wie veranschaulicht, war die Einführung der Fabrik einer der wichtigsten Motoren der Industrialisierung und führte zur Verdrängung des Handwerks. Ein weiterer Faktor, der das Handwerk zu einer Nischenaktivität hat werden lassen, war die Dimensionen und die Kosten, die mit der Akquise der neuen Fabrikationsmittel in Verbindung standen, da der Erwerb der neuen Fertigungsmaschinen für eine Einzelperson als ausgeschlossen galt.<sup>258</sup> Wolfgang König sieht einen der wesentlichen Unterschiede, zwischen der Arbeitsweise in der Fabrik und der Arbeitsweise im Handwerk, darin, dass die Fabrik die operationale Logik der Arbeitsaufteilung verfolgte. Zudem wurden in der Produktion „*Maschinensysteme mit der Kombination von Kraft- und Arbeitsmaschinen*“ eingesetzt, während in den Manufakturen, welche zwar auch das Prinzip der Arbeitsaufteilung vertraten, weiterhin das handwerkliche Arbeiten vorherrschte.<sup>259</sup>

## 2. Ablösung des Werkzeugs durch die Maschine

König setzt sich mit der Relation zwischen Werkzeug und Maschine auseinander und beleuchtet die Vorgänge der Transition von dem Werkzeug der Handwerker zu der Maschine. Bezüglich der Industrialisierung, unterscheidet König zwischen dem Auftreten von Arbeitsmaschinen, Kraftmaschinen und Werkzeugmaschinen. Unter Arbeitsmaschinen werden Maschinen verstanden, welche ehemalige in mechanisierter

---

<sup>257</sup> König, W.: „Technikgeschichte. Eine Einführung in ihre Konzepte und Forschungsergebnisse“, Grundzüge der Modernen Wirtschaftsgeschichte Band 7, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2009, S. 111.

<sup>258</sup> Vgl. McCullough, M.: „Abstracting Craft. The Practiced Digital Hand“, S. 315 In: Adamson, G. (Hrsg.): „The Craft Reader“, Berg Publishers, Oxford, 2010.

<sup>259</sup> König, W.: „Technikgeschichte. Eine Einführung in ihre Konzepte und Forschungsergebnisse“, Grundzüge der Modernen Wirtschaftsgeschichte Band 7, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2009, S. 120.

Form handwerkliche Arbeitsprozesse übernehmen, wie zum Beispiel der Spinn- oder Webmaschinen. Kraftmaschinen sind solche Maschinen, deren Funktionsweise an den Einsatz von beispielsweise Wasser- oder Dampfkraft gebunden ist, wie im Fall der Dampfmaschinen. Der Begriff der Werkzeugmaschinen verkörpert, in vereinfachter Form ausgedrückt, die Translation einzelner Objektwerkzeuge zu mechanisierten Maschinen. Eine technisch akkurate Begriffserklärung wird definiert wie folgt:

*„Unter einer Werkzeugmaschine sind alle Maschinen zu verstehen, die der Fertigung mechanischer Komponenten definierter, reproduzierbarer Form mit Hilfe von Werkzeugen dienen.“*<sup>260</sup>

Als bekannte Beispiele der Zeit hierfür lassen sich Dreh-, Bohr-, Hobel- und Fräsmaschinen nennen.<sup>261</sup> Diese Arten der Werkzeugmaschinen sind die technischen Vorgänger heutiger Vertreter, wie den Fünf-Achs-Fräsen, die sich zu *„komplexen Fertigungssystemen mit meist hohem Automatisierungsgrad entwickelt haben.“*<sup>262</sup> Durch die vielseitige werkzeugliche und somit auch funktionale Ausrichtung dieser Maschinen resultiert ein umfassendes Generierungsvermögen, bis hin zur Möglichkeit der Selbstgenerierung, denn *„aus fertigungstechnischer Sicht sind Werkzeugmaschinen die einzige Maschinenklasse, die sich selbst herstellen kann.“*<sup>263</sup> Werkzeugmaschinen wurden somit beim Bauen der Arbeits- und Kraftmaschinen eingesetzt, so dass *„die neue Maschinen-Werkzeug-Technik die alte Hand-Werkzeug-Technik abzulösen begann“*.<sup>264</sup> Ein bemerkenswertes Phänomen setzte ein, denn das Werkzeug, welches zuvor im Dienste der handwerklichen Objektgenerierung stand, wurde nun mehrheitlich zur Herstellung von Maschinen eingesetzt, so dass diese die Objektfertigung übernehmen konnten. Das Werkzeug, welches zur Materialisierung der Maschine beiträgt, überträgt seine ursprüngliche Funktion auf eben diese. Eine neue Linie der Fertigung hat sich daraus ergeben, die Maschinen-Werkzeug-Technik. Dadurch wurde implizit folgendes Phänomen in Gang gesetzt: *„In einem längeren historischen Prozess löste das System der Maschinenarbeit das System der Handarbeit ab.“*<sup>265</sup> König beschreibt somit die Kausalitätskette, welche zur Verdrängung des Handwerks und der ihm eigenen Werkzeuge geführt hat und das

<sup>260</sup> Neugebauer, R.: „Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen“, Springer Vieweg, Berlin, 2012, S. 4.

<sup>261</sup> Vgl. König, W.: „Technikgeschichte. Eine Einführung in ihre Konzepte und Forschungsergebnisse“, Grundzüge der Modernen Wirtschaftsgeschichte Band 7, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2009, S. 118 ff., S. 141.

<sup>262</sup> Bahmann, W.: „Werkzeugmaschinen kompakt. Baugruppen, Einsatz und Trends“, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013, S. 1.

<sup>263</sup> Neugebauer, R.: „Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen“, Springer Vieweg, Berlin, 2012, S. 4.

<sup>264</sup> König, W.: „Technikgeschichte. Eine Einführung in ihre Konzepte und Forschungsergebnisse“, Grundzüge der Modernen Wirtschaftsgeschichte Band 7, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2009, S. 118.

<sup>265</sup> Ebd., S. 141.

Vorkommen der Maschinen als neue Werkzeuge der Produktion in die Wege geleitet hat. Dies unterstützend urteilt Friedrich Klemm, dass „*das Zusammentreffen beider [Anm. d. A. der Dampfmaschine, stellvertretend für die Kraftmaschinen und der Arbeitsmaschinen] ermöglichte erst jene ungeheuer rasche Mechanisierung und Industrialisierung, die wir als industrielle Revolution bezeichnen*“.<sup>266</sup>

### 3. Der Einfluss von Eisen und Stahl

Die Evolution der Industriellen Revolution ist unzertrennbar an die Erfindung und Entwicklung verschiedenster Maschinen, aber auch an die Stahlproduktion und dessen uneingeschränkte Zurverfügungstellung, gebunden.<sup>267</sup> Als Material ist Eisen bereits seit der prähistorischen Ära gebräuchlich, allerdings war bis zur Industrialisierung kein Verfahren bekannt, das die Produktion grosser Eisenmengen ermöglichte, weswegen es im Bauwesen nur in einer statisch-funktional ergänzenden Form zum Einsatz kam.<sup>268</sup> Durch die Erfindung des Puddelofens und des Puddelverfahrens 1784 durch den Briten Henry Cort wurde es möglich, unter dem Einsatz von Steinkohle, anstelle der bis zu dem Zeitpunkt verwendeten und viel teureren Holzkohle, Roheisen in Schmiedestahl zu verwandeln.<sup>269</sup> Die Sprödigkeit des Materials wurde durch das neue Verfahren signifikant reduziert, so dass die möglichen Zug- und Druckbeanspruchungen gesteigert werden konnten.<sup>270</sup> Bezüglich des erwähnten Einsatzes von Stahlkohle, entstand Ende des 18. Jahrhunderts eine Konkurrenz zwischen den möglichen Einsatzbereichen von Holz. Der Holzeinsatz zur intensiven Holzkohlegewinnung für die Stahlproduktion führte zu dessen Gefährdung als Rohmaterial und zu einer bedrückenden Ressourcenknappheit. Die Entwicklung des Puddelverfahrens entlastete auf essentielle Art und Weise die Holznachfrage anderer Wirtschaftsbereiche, wie der Möbelherstellung, des Maschinenbaus oder des Heizens.<sup>271</sup> Henry Bessemer, ein weiterer englischer Ingenieur, entwickelte zwischen 1855 und 1856 ein Verfahren, auch Bessemer- oder Windfrischverfahren genannt, bei dem „*Stahl durch blosses Einleiten von Luft in flüssiges Roheisen*“<sup>272</sup> verwandelt

<sup>266</sup> Klemm, F.: „Geschichte der Technik: der Mensch und seine Erfindungen im Bereich des Abendlandes“, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1998, S. 148.

<sup>267</sup> Ebd., S. 141.

<sup>268</sup> Vgl. Giedion, S.: „Raum. Zeit. Architektur. Die Entstehung einer neuen Tradition“, Birkhäuser Verlag, Basel, 1996, S. 130.

<sup>269</sup> Vgl. König, W.: „Technikgeschichte. Eine Einführung in ihre Konzepte und Forschungsergebnisse“, Grundzüge der Modernen Wirtschaftsgeschichte Band 7, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2009, S. 119.

<sup>270</sup> Vgl. Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996, S. 129.

<sup>271</sup> Vgl. Stark, J., Wicht, B.: „Geschichte der Baustoffe“, Bauverlag, Berlin, 1998, S. 110.

<sup>272</sup> Klemm, F.: „Geschichte der Technik: der Mensch und seine Erfindungen im Bereich des Abendlandes“, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1998, S. 151.

wurde. Weitere wichtige Meilensteine in der Stahlproduktion stellten das Thomas-Verfahren von 1878 und das Herdfrischverfahren von 1864 dar. Dabei ist die Entwicklung dieser neuen Verfahren für die Stahlproduktion sowohl wissenschaftlichen als auch technologischen Entwicklungen zuzuschreiben sind.<sup>273</sup> Durch die Entwicklung dieser Verfahren war es möglich Stahl in den für die Massenproduktion angemessenen Größen effizient und kostengünstig zur Verfügung zu stellen. Das Aufstellen einer industriellen konstanten und verlässlichen Stahlproduktion schaffte überhaupt die Voraussetzungen für das ausgedehnte Bauen von Stahlkonstruktionen im 19. Jahrhundert. Um das quantitative Ausmaß der bemerkenswert rapiden Entwicklung in den Bereichen der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung besser erfassen zu können, lassen sich exemplarisch die Zahlen betreffend der Eisenproduktion angeben. In einem Zeitraum von nur 70 Jahren, stieg die Eisenproduktion von 20000 Tonnen um 1760 auf 700000 Tonnen um 1830 an.<sup>274</sup> Das Auftreten einer solchen Produktionskurve ist nur durch die Entwicklung von neuen Verfahrenstechniken und Produktionsmaschinen möglich gewesen.

Abgesehen von Stahl, stellten Gusseisen und die Entwicklung des Stahlgusses weitere bedeutende Wendepunkte der Materialentwicklung dar. Im 19. Jahrhundert wurde Gusseisen mehrheitlich im Maschinenbau verwendet, während beim Brückenbau im 18. und 19. Jahrhundert vor allem Gusseisen eingesetzt wurde. Gusseisen, der Stahl-, Perlit- und Kugelgraphitguss stellen die unterschiedlichen Etappen in der Optimierung des Materials, bezüglich seiner statischen Materialeigenschaften, dar, allen voran die Zugfestigkeit.<sup>275</sup> Als repräsentatives Beispiel für den Brückenbau lässt sich die Severn-Brücke in England aufzählen, die erste gusseiserne Brücke der Welt, welche 1779 fertiggestellt wurde.<sup>276</sup> Bei dem Bauwerk, welches vor allem unter dem Namen Ironbridge bekannt wurde, handelte es sich von der Konstruktionsform her um eine Bogenbrücke, mit einer Spannweite von 30 Metern.<sup>277</sup> Von grösster Relevanz für das Bauwesen war jedoch die „*Massenerzeugung von Formeisen*“<sup>278</sup>, also die serielle Produktion standardisierter Bauelemente aus Eisen. Durch das Durchsetzen dieses Fertigungsprinzips wurden für die Epoche kennzeichnende Stahlkonstruktionen, wie der Londoner Kristallpalast, der Pariser Eiffelturm oder der Innenraum der Bibliotheque National in Paris realisierbar. Die Mehrheit der Nutzbauten des 19.

<sup>273</sup> Vgl. Giedion, S.: „Raum. Zeit. Architektur. Die Entstehung einer neuen Tradition“, Birkhäuser Verlag, Basel, 1996, S. 130.

<sup>274</sup> Vgl. Benevolo, L.: „Geschichte der Architektur des 19. und 20. Jahrhunderts“, Band 1, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, München, 1990, S. 16.

<sup>275</sup> Vgl. Stark, J., Wicht, B.: „Geschichte der Baustoffe“, Bauverlag, Berlin, 1998, S. 112 ff.

<sup>276</sup> Vgl. Giedion, S.: „Raum. Zeit. Architektur. Die Entstehung einer neuen Tradition“, Birkhäuser Verlag, Basel, 1996, S. 130 zitiert nach John L. und Hammond, B.: „The Rise of Modern Industry“, London, 1925, S.136.

<sup>277</sup> Vgl. Gispert, K.: „Der gefesselte Prometheus: Die Ingenieure in Großbritannien und in den Vereinigten Staaten 1750-1945“, S. 136 In: Kaiser, W., König, W. (Hrsg.): „Geschichte des Ingenieurs. Ein Beruf in sechs Jahrtausenden“, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2006.

<sup>278</sup> Vgl. Stark, J., Wicht, B.: „Geschichte der Baustoffe“, Bauverlag, Berlin, 1998, S. 113.

Jahrhunderts, wie Brücken, Markt- und Ausstellungshallen, Gewächshäuser oder Bahnhöfe stellen Stahlkonstruktionen dar, welche auf dem repetitiven Einsatz seriell gefertigter Bauelemente basieren. Aus architektonischer Sicht betrachtet stellt Siegfried Giedion die Behauptung auf, dass es sich bei der gusseisernen Säule um „*das erste konstruktive Material, das durch die neuen industriellen Methoden erzeugt wurde und als neues Bauelement Verwendung fand*“, handeln würde.<sup>279</sup> Doch nicht nur die Entwicklung einer optimierten und effizienten Eisen- und Stahlproduktion war für die Industrialisierung und das Bauwesen von ausschlaggebender Bedeutung, sondern auch die damit einhergehende Entwicklung von Walzwerken, die bereits ab den 1780er Jahren ihren Kurs nahm. Durch das Ablösen der traditionellen Hammerwerke durch das mechanisierte Walzwerk war es möglich Stahl-Halbfertigprodukte vereinfacht seriell zu produzieren.<sup>280</sup>

Im Verlauf der Menschheitsgeschichte durchlief Eisen eine beachtliche Evolution als Baustoff und eine facettenreiche Erweiterung seiner Einsatzgebiete. Anfangs erfuhr es einen ergänzenden Einsatz im Bauwesen, wobei es für die Fertigung von Verankerungen, Nägeln, Pfählen und ähnlicher kleinteiliger Elemente eingesetzt wurde, ohne als konstruktives Baumaterial in Erwägung gezogen zu werden. Eisen und Stahl bahnten sich, im Kontext einer rapiden Mechanisierung der Industrie, ihren Weg von dem Einsatz als Element der Verankerung in Dachstühlen zum Hauptbaumaterial monumentaler Stahlbauten. Bei dem Einführen des Baustoffs Eisen in die Baupraxis wurden in einem ersten Schritt „*die statischen und konstruktiven Grundsätze der herkömmlichen Bauweise*“<sup>281</sup> auf das neue Baumaterial übertragen. Es handelte sich somit in einer ersten Phase um das Transferieren traditioneller Bauarten auf ein neues Material für das andere Konstruktionsmethoden und Ausdrucksarten erst noch entwickelt werden mussten. Dabei galten Stein und Holz als überwiegend benutzte Vorbilder: nach dem Abbild hölzerner Fachwerke wurden eiserne Spannwerke entwickelt oder der eiserne Bogenbinder wurde ebenfalls von der Holzbauweise abgeleitet.<sup>282</sup> Durch die kontinuierliche Optimierung seiner Materialeigenschaften, allem voran seiner Belastbarkeit, entwickelten sich Eisen und Stahl zu den neuen repräsentativen Werkstoffen eines neuen Baustils, des Stahlbaus. Die Vorherrschaft von Eisen und Stahl als Hauptbaumaterial einer neuen Ära lässt sich auf dessen als sehr vorteilhaft empfundenen Materialeigenschaften zurückführen. Dessen Formbarkeit, die hohe Belastbarkeit, die erzielten Spannweiten, die Wetterbeständigkeit, die Homogenität des Materials, die Zugänglichkeit des Rohstoffs und der geringe Materialaufwand bemessen an den möglichen Spannweiten, all diese

---

<sup>279</sup> Giedion, S.: „Raum. Zeit. Architektur. Die Entstehung einer neuen Tradition“, Birkhäuser Verlag, Basel, 1996, S. 140.

<sup>280</sup> Vgl. König, W.: „Technikgeschichte. Eine Einführung in ihre Konzepte und Forschungsergebnisse“, Grundzüge der Modernen Wirtschaftsgeschichte Band 7, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2009, S. 119.

<sup>281</sup> Schädlich, C.: „Der Baustoff Eisen als Grundlage für die Herausbildung qualitativ neuer Baukonstruktionen im 19. Jahrhundert“, S. 138 In: Graefe, R. (Hrsg.): „Zur Geschichte des Konstruierens“, Fourier Verlag, Wiesbaden, 1997.

<sup>282</sup> Ebd., S. 138-141.

Eigenschaften und erfüllten Kriterien setzten es an die Spitze des stattfindenden Wandels im Maschinenbau und Bauwesen.<sup>283</sup>

#### 4. Der Ingenieur: Vom Wandel der Berufsbilder

Die Begriffsherkunft des Wortes Ingenieur bietet den freien Interpretationsraum diesen einem Erfinder gleichzusetzen:

*„[...] die lateinische Entsprechung ingeniosus bedeutet „erfinderisch, kunstsinnig“, abgeleitet von ingenium = angeborene Fähigkeit, geistiges Talent, Erfindungsgeist“.*<sup>284</sup>

Der geschichtliche Entwicklungsweg des Ingenieurberufs in England wird von Kees Gispin aufgezeichnet. Dabei illustriert er die Verbindung zwischen der Maschine, der Maschinenentwicklung und dem Berufsstand. Die englischen Begriffe „*engine*“ (eine generelle Bezeichnung für Maschinen unterschiedlichster Art) und „*engineer*“ lassen sich bis ins Mittelalter zurückverfolgen, wobei das Oxford English Dictionary um 1300 den Begriff zur Beschreibung eines Kriegingenieurs heranzieht.<sup>285</sup> Die Verbindung zwischen Ingenieur- und Militärwesen lässt sich durch die verbreitete mittelalterliche Kriegskultur begründen und die sich daraus ableitende Notwendigkeit für Territoriumsfestigung, Abwehr- und Verteidigungsanlagen und Vermessung des Landes.<sup>286</sup> Wie allein von der Etymologie des Begriffs veranschaulicht wird, lässt sich geschichtlich betrachtet der Beruf des Ingenieurs bzw. die Arbeitsausübung, welche dem heutigen Bild eines Ingenieurs entsprechen würde, über mehrere Jahrhunderte zurückverfolgen. Der Historiker Günther Binding positioniert, unter Berufung auf Paul Booz, eine zeitliche Verankerung des Auftretens des heutigen Ingenieurberufs in die 2. Hälfte des 18. Jahrhunderts.<sup>287</sup>

Im Kontext dieser Betrachtungen muss zusätzlich präzisiert werden, dass ausgehend von der Industriellen Revolution unterschiedliche, voneinander in einigen Punkten abweichende, Interpretationen dieses Berufsbildes anzutreffen waren. Wolfgang König veranschaulicht den historischen Werdegang des Ingenieurberufs in Europa

<sup>283</sup> Vgl. Stark, J., Wicht, B.: „Geschichte der Baustoffe“, Bauverlag, Berlin, 1998, S. 118.

<sup>284</sup> Binding, G.: „Meister der Baukunst. Geschichte des Architekten und Ingenieurberufes“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2004, S. 20.

<sup>285</sup> Gispin, K.: „Der gefesselte Prometheus: Die Ingenieure in Großbritannien und in den Vereinigten Staaten 1750-1945“, S. 127 In: Kaiser, W., König, W. (Hrsg.): „Geschichte des Ingenieurs. Ein Beruf in sechs Jahrtausenden“, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2006.

<sup>286</sup> Vgl. Popplow, M.: „Unsichere Karrieren: Ingenieure im Mittelalter und Früher Neuzeit 500-1750“, S. 88 In: Kaiser, W., König, W. (Hrsg.): „Geschichte des Ingenieurs. Ein Beruf in sechs Jahrtausenden“, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2006.

<sup>287</sup> Binding, G.: „Meister der Baukunst. Geschichte des Architekten und Ingenieurberufes“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2004, S. 18 zitiert nach: Booz, P.: „Der Baumeister der Gotik“, Deutscher Kunstverlag, München, 1956, S. 38.

und den Vereinigten Staaten. Dabei verweist er gezielt darauf, dass die Berufsausbildung und der Werdegang zum Ingenieur zwischen den unterschiedlichen Ländern, England, Deutschland Frankreich und den Vereinigten Staaten, allesamt Hauptvertreter der Industrialisierung, stark variierte. Diese Unterschiede lassen sich durch durch kulturelle Auslegungen des Berufs erklären, denn während das Vereinigte Königreich und die Vereinigten Staaten eher die berufliche Laufbahn und den erzielten Erfolg als Qualifikationen zur Berufsausübung verstanden, richteten Deutschland und Frankreich bereits früh ein technisches Schul- und Ausbildungswesen ein, das den Beruf zu systematisieren versuchte.<sup>288</sup> Diese Feststellungen werden von Gipsen untermauert, der sich noch mehr auf eine Unterscheidung zwischen der Berufsbeschreibung und -eingrenzung zwischen Großbritannien und dem europäischen Festland beruft. Der Benutzung des Begriffs in England schreibt er eine gewisse Unschärfe zu, da dieser zur Beschreibung eines umfassenden Berufsgruppenbildes genutzt wurde. Während auf dem Festland der Begriff mit der Zeit ausschließlich an ein technisches Hochschulstudium gebunden war, wurden in England zusätzlich auch „*Techniker, Mechaniker und Handwerker unterschiedlichster Ausbildung*“<sup>289</sup> in diese Kategorie eingeschlossen. Um dieser verallgemeinernden Betrachtungsart entgegenzuwirken, wurde in England die *Society of Civil Engineers* von John Smeaton gegründet. Das erklärte Ziel dieses Vereins bestand eben in der klaren Trennung des Ingenieurs von anderen Berufsgruppen, welche mit dieser Namensgebung konkurrierten, wie die zuvor erwähnten Techniker, Mechaniker und Handwerker:

*„Die sich durch neuartiges Wissen und neuartige Aufgaben auszeichnende Berufsgemeinschaft sollte eine Vermittlerposition zwischen Wissenschaft und Wirtschaft sowie zwischen Kunde und Auftraggeber einnehmen.“*<sup>290</sup>

Die Verankerung im Handwerklichen und seine Abstammung aus dem Handwerksgewerbe ist wesentlich für das britische Profil des Ingenieurberufs:

*„Die britische Ingenieurkultur entsprang den weit verbreiteten hochwertigen Fertigkeiten, über welche Mühlenbauer, Bauhandwerker, Chemiker, wissenschaftliche Instrumentenmacher, Mechaniker, andere Handwerker und technische Unternehmen verfügten. Das britische Ingenieurwesen besaß also eine ausgeprägte praktische Orientierung und kräftige Wurzeln im Handwerk.“*<sup>291</sup>

---

<sup>288</sup> König, W.: „Technikgeschichte. Eine Einführung in ihre Konzepte und Forschungsergebnisse“, Grundzüge der Modernen Wirtschaftsgeschichte Band 7, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2009, S. 169-172

<sup>289</sup> Gipsen, K.: „Der gefesselte Prometheus: Die Ingenieure in Großbritannien und in den Vereinigten Staaten 1750-1945“, S. 127 In: Kaiser, W., König, W. (Hrsg.): „Geschichte des Ingenieurs. Ein Beruf in sechs Jahrtausenden“, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2006

<sup>290</sup> Ebd., S. 128.

<sup>291</sup> Ebd., S. 130.

Die Notwendigkeit der Unterscheidung zwischen Ingenieur und Architekt wurde durch die Zusammenwirkung von optimierter Stahl- und Eisenproduktion und serieller Fertigung, welche in einer neuer Konstruktionsform, dem Stahlbau resultierte, beschleunigt. Denn „mit ihnen [Anm. des A. den Eisenkonstruktionen] zogen die Ingenieurmethoden in das Gebiet der Architektur ein“, so dass sich darin die klare Erfordernis nach der Systematisierung überschneidender Berufe erahnen lässt.<sup>292</sup> Diese Art der Konkurrenz zwischen Architektur und Ingenieurwesen ist nicht beispiellos. Es lassen sich eine Mehrzahl von Beispielen als Präzedenzfälle anführen, wobei der im 16. Jahrhundert stattfindende Konflikt in Florenz zwischen Architekten und Festungsbauingenieuren die Rivalität dieser beiden verwandten Disziplinen prägnant illustriert. Der Antrag der Festungsbauingenieure zur Aufnahme in die florentinische *Accademia del disegno*, wurde von den Architekten um 1560 abgelehnt, mit der Begründung, dass die Arbeit der Ingenieure der Funktion untergeordnet ist, während sich Architektur zusätzlich auch mit der Ästhetik befasst.<sup>293</sup> Als Differenzierungskriterium wurden hier also Vitruvs drei wesentlichen Merkmale, welche die Architektur erfüllen muss, *firmitas* (Festigkeit), *utilitas* (Nutzbarkeit) und *venustas* (Schönheit) herangezogen.<sup>294</sup> Das Erfüllen und die Berücksichtigung der Schönheit, und der dazugehörigen Kriterien wie Ästhetik, Proportion oder Harmonie zeichnet sich als Alleinstellungsmerkmal für Architektur und Architekten aus.

Zur Aufnahme in einem Ingenieurcorps des Mittelalters in Frankreich wurde als Voraussetzung ein angesammeltes Fachwissen in den folgenden Bereichen verlangt:

„[...] unterschiedliche Darstellungstechniken von Festungsbauten ebenso zu beherrschen wie die Anfertigung von Karten, zudem sollten sie mit Arithmetik, Geometrie, Landvermessung, Maschinenteknik und wasserbautechnischen Fragen vertraut sein.“<sup>295</sup>

Die Aufzählung veranschaulicht exemplarisch die Anforderungen, welche an die Mitglieder gestellt wurden. Der überwiegend technische Schwerpunkt ist klar zu erkennen, wobei Kompetenzen, welche auf ästhetische Formgebung ausgerichtet sind, keine Erwähnung finden. Im industriellen Frankreich werden diese Kernkompetenzen beibehalten, wobei sich hier die wegweisende Entwicklung bezüglich der Trennung zwischen den beiden Berufen finden lässt. Die 1671 gegründete *Académie d'Architecture* aus Paris befasste sich mit der Ausbildung zukünftiger Architekten und

---

<sup>292</sup> Giedion, S.: „Raum. Zeit. Architektur. Die Entstehung einer neuen Tradition“, Birkhäuser Verlag, Basel, 1996, S. 158.

<sup>293</sup> Vgl. Poplow, M.: „Unsichere Karrieren: Ingenieure im Mittelalter und Früher Neuzeit 500-1750“, S. 96 In: Kaiser, W., König, W. (Hrsg.): „Geschichte des Ingenieurs. Ein Beruf in sechs Jahrtausenden“, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2006.

<sup>294</sup> Vitruv: „Baukunst“, Erster Band, Artemis Verlag für Architektur, Zürich und München, 1987, S. 31.

<sup>295</sup> Poplow, M.: „Unsichere Karrieren: Ingenieure im Mittelalter und Früher Neuzeit 500-1750“, S. 96 In: Kaiser, W., König, W. (Hrsg.): „Geschichte des Ingenieurs. Ein Beruf in sechs Jahrtausenden“, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2006.

Planer. Angesichts der neuen Anforderungen für vertieft technisch ausgebildete Fachkräfte in den Bereichen des Straßen-, Eisenbahn-, Brücken- oder Kanalbaus, um nur einige wenige der Spezialbereiche aufzuzählen, die im Zuge der Industrialisierung entstanden sind, konnte die *Académie* der Nachfrage für technisch versiertes Personal nicht nachkommen, so dass neue Instanzen gegründet werden mussten.<sup>296</sup> 1747 wurde die *École des Ponts et Chaussées* (Schule für Brücken- und Strassenbau) gegründet, 1748 die *École des Ingénieurs de Mézières*, bis schließlich 1794/95 die *École Polytechnique* ins Leben gerufen wurde. Im Kontext der französischen Revolution wurde 1793 die *Académie* aufgelöst, um dann 1806 von Napoleon unter dem Namen der *École des Beaux-Arts* als Institution, die sich den bildenden Künsten widmet, wiedereröffnet zu werden.<sup>297</sup> Im weiteren geschichtlichen Verlauf entwickeln sich die *École Polytechnique* und die *École des Beaux-Arts* zu zwei Gegenspielern, der eine konzentriert sich auf Bautechnik und Ausführung, während bei dem anderen die künstlerische Konzeption die primäre Rolle spielt.

Aus der Gegenüberstellung der geographisch gebundenen Entwicklungen, lässt sich beim französischen System ein klares Bemühen zu einer strukturellen Differenzierung zwischen den beiden Berufsgruppen bemerken. Das Delimitieren der Disziplinen der Architektur und des Ingenieurwesens voneinander ist von größter Wichtigkeit. Im Gegensatz dazu konzentrierte sich in England das Bestreben eher auf das fachliche Auseinanderhalten zwischen den Ingenieuren und anderen Handwerksgruppen. Prägend für beide Systeme ist der intensive Fokus auf die technische Spezialisierung angesichts der durch die Industrialisierung generierten neuen Ansprüche in den Bereichen Konstruktion und Maschinenbau.

Die Beschäftigung mit Material und Verarbeitungstechniken geht vom Architekten zum Ingenieur über, inbegriffen der Auseinandersetzung mit der Maschine. Im Verlauf der Architekturgeschichte bestand zwischen Maschinenbau und Architektur eine enge Verbindung, welche durch die industrielle Revolution immer mehr aufgelöst wurde, so dass die Ursache für das Abwenden des Architekten von der Maschine an die wachsende Spezialisierung des Maschinenbaus gekoppelt ist.<sup>298</sup> Benevolo illustriert die schleichende Natur dieser Entwicklungsprozesse, wenn er das Beispiel der Eisenbahnen nennt, die zunächst noch Teil der Architekturlehre waren, bis diesem Thema letztendlich eine eigene Fachliteratur zugeordnet wurde und so aus dem Studienfeld der Architekten verschwand.<sup>299</sup> Wichtig ist die Beleuchtung der Zusammenhänge zwischen dem Handwerk, dem handwerklichen Arbeiten und der Erfindung neuer Maschinen. Aus den Entwicklungen im der Technologie resultierte

---

<sup>296</sup> Vgl. Benevolo, L.: „Geschichte der Architektur des 19. und 20. Jahrhunderts“, Band 1, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, München, 1990, S. 41.

<sup>297</sup> Giedion, S.: „Raum. Zeit. Architektur. Die Entstehung einer neuen Tradition“, Birkhäuser Verlag, Basel, 1996, S. 157.

<sup>298</sup> Vgl. Benevolo, L.: „Geschichte der Architektur des 19. und 20. Jahrhunderts“, Band 1, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, München, 1990, S. 37.

<sup>299</sup> Ebd., S. 37.

eine Welle komplexer Veränderungsmechanismen, die ebenfalls zur Ausbildung und Eingrenzung eines neuen Berufsstands geführt haben. Es geht darum, die Veränderungskraft, welche von technischen Innovationen ausgeht, im Bereich des Bauwesens anhand dieses konkreten Beispiels zu veranschaulichen und somit eine Parallelität zu dem Potenzial des Roboters in der Architektur aufzustellen.

Zwischen den beiden Berufen gibt es weiterhin Überschneidungen, so dass von einer gewissen Art der inhaltlichen Parallelität die Rede ist, wobei gleichzeitig diese Parallelität den notwendigen Rahmen für eine interdisziplinäre Kommunikation bietet.<sup>300</sup> Die Bemühungen zu einer klaren Delimitierung der Berufe voneinander hat andererseits auch zu einer Selbstisolation der Disziplinen geführt, da sich Architekten überwiegend den künstlerisch-ästhetischen und gestaltenden Fragestellungen gewidmet haben, während Ingenieure sich oft mit den Problemen der Bautechnik auseinandergesetzt haben, wobei der architektonische Kontext, wie beispielsweise Funktion und Nutzen, keine Berücksichtigung fand.<sup>301</sup>

Die Arbeitsteilung führte zu einer vertieften Spezialisierung der Arbeitskräfte. Die von Alberti postulierte Trennung des Intellektuellen vom Ausführenden erfuhr während der Industrialisierung ihre Erfüllung. Der Architekt generiert Entwürfe und die dazugehörigen Pläne, während sich der Ingenieur mit den Maschinen der Fertigung und den baukonstruktiven Aspekten beschäftigt. Der Hauptantrieb für diese Veränderung der Berufe und das Kristallisieren neuer Arbeitsbereiche liegt wie aus der bisherigen Analyse hervorgeht an den komplexen Entwicklungen in den Bereichen der Maschinenentwicklung, Fabrikation und Materialforschung.

## 5. Der Kristallpalast

Um das Potenzial, das von der Entwicklung und dem Gebrauch von Maschinen in der Architektur ausgehen kann zu demonstrieren und deren massiven Auswirkungen auf das Bauwesen und die Disziplin anschaulich darzustellen, wird das Beispiel des Londoner Kristallpalasts herangezogen. Kaum ein anderes Gebäude illustriert die Auswirkungen der Industriellen Revolution auf die Architektur wie der Crystal Palace. Ziel dieser Analyse ist es die Reichweite der Effekte, die aus dem Zusammenspiel von parallelen Entwicklungen im Bereich der Maschine und des Materials entstehen können, darzulegen. Durch das Aufzeigen dieser Neuerungen und den Abweichungen von der damals geltenden Norm soll die gegenwärtig unterschätzte Rolle der Maschine in der Architektur besser ausgeleuchtet werden. Des Weiteren steht im Zentrum dieses Vorgehens die Intention die, in den vorherigen Abschnitten präsentierten, historisch-theoretischen Aspekte an einem konkreten Beispiel aus der Architektur exemplarisch aufzuführen. Das Erstellen eines kohärenten Bildes des konkreten Einflusses dieser prinzipiellen Veränderungen in den

---

<sup>300</sup> Vgl. Benevolo, L.: „Geschichte der Architektur des 19. und 20. Jahrhunderts“, Band 1, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, München, 1990, S. 30.

<sup>301</sup> Ebd., S. 30.

Bereichen der Fabrikation und des Materials und deren Bedeutsamkeit und Einwirkung auf Entwurf, Baustelle und Bauwesen, wird verfolgt.

Zu den imposantesten und neuartigsten Bauprojekten der frühen Industrialisierung zählt der von Joseph Paxton entworfene Kristallpalast. Konstruiert wurde dieser für die in London stattfindende Weltausstellung von 1851, in Zusammenarbeit mit den Ingenieuren Charles Fox und John Henderson. Um die Größe und die Dimension dieses Projektes und den für dessen Ausführung betriebenen Aufwand begreiflich zu machen, kann sich die Kenntnis der folgenden Details der Baurealisierung als nützlich erweisen:

*„Die gesamte Grundfläche betrug 772784 Quadratfuß (etwa 70000 Quadratmeter) plus 217100 Quadratfuß (etwa 20000 Quadratmeter) Galeriefächen. Das Projekt erforderte zur Verglasung beinahe 50 Kilometer «Paxtongutters» und 325 Kilometer Rahmenhölzer sowie 84000 Quadratmeter Glas. Das Skelett bildeten mehr als 3000 Säulen, 23000 gusseiserne Träger und 358 schmiedeeiserne Binder, um die Galerien und das Dach zu tragen.“<sup>302</sup>*

Die Montage eines so aufwendigen Projektes, in einem kurzem Zeitraum von nur einigen Monaten, wäre vor der industriellen Revolution nicht vorstellbar gewesen. Erst durch das Auftreten der seriellen Produktion und der dazu notwendigen Maschinen war die Realisierung eines solchen Bauvorhabens unter den gegebenen Umständen möglich. Die Umsetzung war an ein Zusammenspiel unterschiedlicher industrieller Maschinen gebunden, die, wie sich im Laufe dieser Analyse herausstellen wird, projekt-spezifisch entwickelt wurden. Allein das Produktions- und Montageverfahren für die Stahlbinder veranschaulicht die geforderte maschinelle Komplexität:

*„An einer Maschinengruppe aus Bohr-, Stanz- und Schneidemaschinen - angetrieben von der mobilen 6-PS-Dampfmaschine - wurden die Teile für diese Binder vorgearbeitet und auf der Baustelle zusammengesetzt, teils verschraubt, teils in einem aus dem Brückenbau bekannten Verfahren heiß vernietet.“<sup>303</sup>*

Außerdem wurden teilweise eigens für die Fertigstellung des Ausstellungsgebäudes Maschinen entwickelt. Für die Fertigung der Dachrinnenbalken wurde von dem Ingenieur Edward Alfred Crowper eine neue Fräsmaschine in den Fox & Henderson Werkstätten in Chelsea gebaut, während auch der Entwerfer, Joseph Paxton selbst, eine Maschine für das Fräsen der Rahmenhölzer der Glasscheiben entwickelte.<sup>304</sup> Für

---

<sup>302</sup> Friemert, C.: „Die Gläserne Arche. Kristallpalast London 1851 und 1854“, Prestel Verlag, München, 1984, S. 16.

Anmerkung des Verfassers: Gemeint sind in dem angegebenen Zitat die 48-Fuß-Binder der Nebenavenuen und die 72-Fuß-Binder der Hauptavenue des Längsschiffes.

<sup>303</sup> Ebd., S. 24.

<sup>304</sup> Ebd., S. 33.

das Stahl-Glas-Bauwerk „*mussten insgesamt 270000 Glasplatten [...] produziert werden, immerhin ein Drittel der gesamten englischen Glasproduktion des Jahres 1850.*“<sup>305</sup> Das benötigte Eisenvolumen ist genauso beeindruckend, 3500 Tonnen Gusseisen und 530 Tonnen Schmiedeeisen, wobei beide Werte summiert 0,2% der britischen Eisenproduktion des Jahres 1849 ausmachen.<sup>306</sup> Die Zurverfügungstellung eines solchen Materialvolumens und eine günstige, bezahlbare Produktion sind an die Effizientisierung und Optimierung durch die Mechanisierung der Fabrikationsverfahren gekoppelt.

Der Bau des Londoner Kristallpalasts unterscheidet sich grundsätzlich von der bis dahin üblichen Bauweise und Prozessverfahren in einigen wesentlichen Punkten. Dazu gehören zum einen das enge Zusammenspiel von „*modularer Ordnung, Typisierung der Konstruktionselemente, Vorfertigung und Präzision technischer Fertigungsmethoden*“.<sup>307</sup> Auch in vorhergehenden Zeitspannen wurde die partielle Vorfertigung selektierter Bauelemente betrieben, jedoch eine serielle Vorfertigung fast aller Bauelemente, so dass von einer Vorfertigung aller Teilsysteme und somit implizit auch des Gesamtsystems gesprochen werden kann, stellte eine komplette Umstellung der bautechnischen Vorgehensweise dar. Daher kann man eher von einer Montage als einem Bau des Gebäudes sprechen. Diese Tatsache bewegt auch Ernst Werner zu dem Vergleich der Baustelle mit der modernen Fließbandtechnik.<sup>308</sup> Eines der wenigen Verfahren, das den üblichen bautechnischen Verfahren auf der Baustelle entsprach, war der Vorortguss der Betoneinzelfundamente. Eine Anforderung, die sich aus der neuen Bauweise serieller Vorfertigung ergab, lag in der Notwendigkeit einer rigorosen Organisationsstruktur. Die Baustellenabläufe fanden koordiniert statt und verliefen gemäß strikter Prozessabläufe. Durch die Vorfertigung der Bauelemente war es möglich die einzelnen Arbeitsprozesse genauestens aufeinander abzustimmen, sowohl aus bautechnischer als auch aus zeitlicher Sicht. Die hervorgerufenen Veränderungen auf der Ebene der Baustellenorganisation dürfen jedoch nicht vollkommen entkoppelt von der vorhergehenden baulichen Tradition betrachtet werden. Es muss erwähnt werden, dass der hohe Organisationsgrad und die Strukturierung der handwerklichen Baustelle hierzu als Vorlage dienten:

*„Die erfolgreichsten Künstler, Brunelleschi, Michelangelo und Christopher Wren, bezogen ihre Stärke hauptsächlich aus den alten, hochorganisierten Baugewerben -*

---

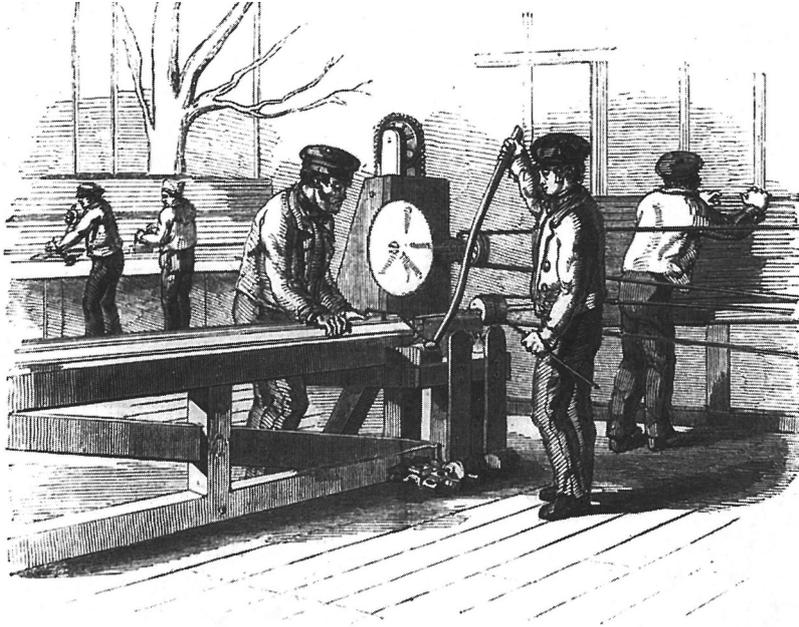
<sup>305</sup> Friemert, C.: „Die Gläserne Arche. Kristallpalast London 1851 und 1854“, Prestel Verlag, München, 1984, S. 34.

<sup>306</sup> Werner, E.: „Der Kristallpalast zu London 1851“, Werner-Verlag, Düsseldorf, 1970, S. 29.

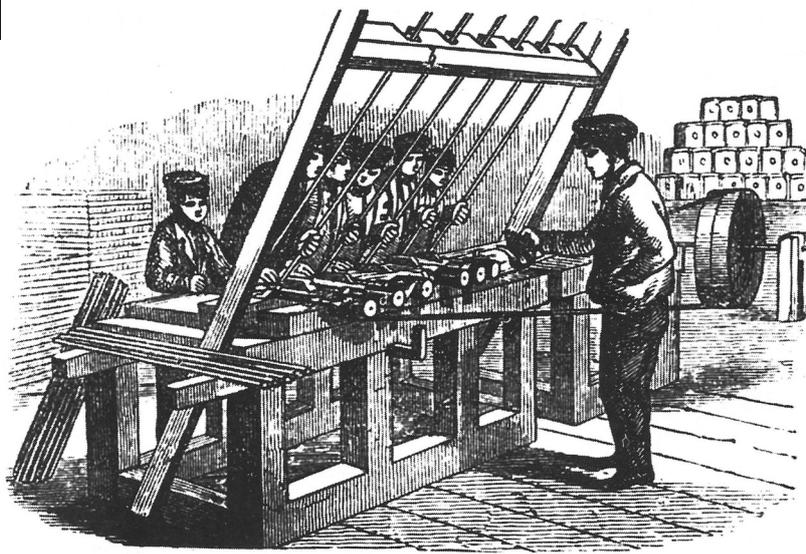
<sup>307</sup> Ebd., S. 59.

<sup>308</sup> Ebd., S. 51.

6.



7.



6. Maschinerie auf der Baustelle zum Abhängen des Rahmenwerks, Kristallpalast  
7. Maschinerie auf der Baustelle zum Bohren des Rahmenwerks, Kristallpalast

*so wie ein späterer Großindustrieller, Joseph Paxton, von der Gartenbaukunst herkam.*<sup>309</sup>

Durch die maschinellen Möglichkeiten der Vorfertigung entwickelte sich eine neue Art der Organisation und der Logistik auf der Baustelle. Die Annahme, dass diese erst durch das Auftreten der maschinellen Möglichkeiten gegeben war, wäre eine irreführende Darstellung und eine Minimalisierung der mittelalterlichen Bautechnik. Bezüglich dieses Aspekts lassen sich Überschneidungen zum Baumeister Paradigma erkennen. Die Realisierung des Bauvorhabens *„beruhte auf allen von ihm [Anm. d. A: Joseph Paxton] erarbeiteten konstruktiven, bautechnischen, statischen und organisatorischen Voraussetzungen“*.<sup>310</sup> Paxton übernahm die Kontrolle über Entwurf, Fabrikation und Baustelle, so dass er das geplante Vorhaben als einen gesamtheitlichen Prozess behandelte. Es besteht keine Trennung zwischen Planung und Ausführung.

Der Kristallpalast stellte eine Premiere bezüglich seiner baulichen Flexibilität dar, die sich als eine direkte Konsequenz aus der Modularität und Standardisierung der Bauteile ergab. Diese Parameter erlaubten auch das Erarbeiten eines nachhaltigen Nutzungskonzepts. Nach dem Beenden der Weltausstellung wurde vorgesehen, dass aufgrund einer vorausgehenden vertraglichen Festlegung, für den Crystal Palace eine Standortveränderung vorgenommen wird. So wurde der Kristallpalast 1853 vom Gelände des Hyde Parks nach Sydenham in der Nähe von London verlagert. Somit wurde zum ersten Mal ein komplettes Gebäude mit einer Gesamtgrundfläche von 70.000 Quadratmetern demontiert, um anschließend an einem neuen Standort erneut zusammengebaut zu werden.<sup>311</sup>

Zusammenfassend lassen sich am Beispiel des Londoner Kristallpalasts folgende grundsätzlichen Veränderungen im Bereich der verschiedenen Prozesslogiken festhalten:

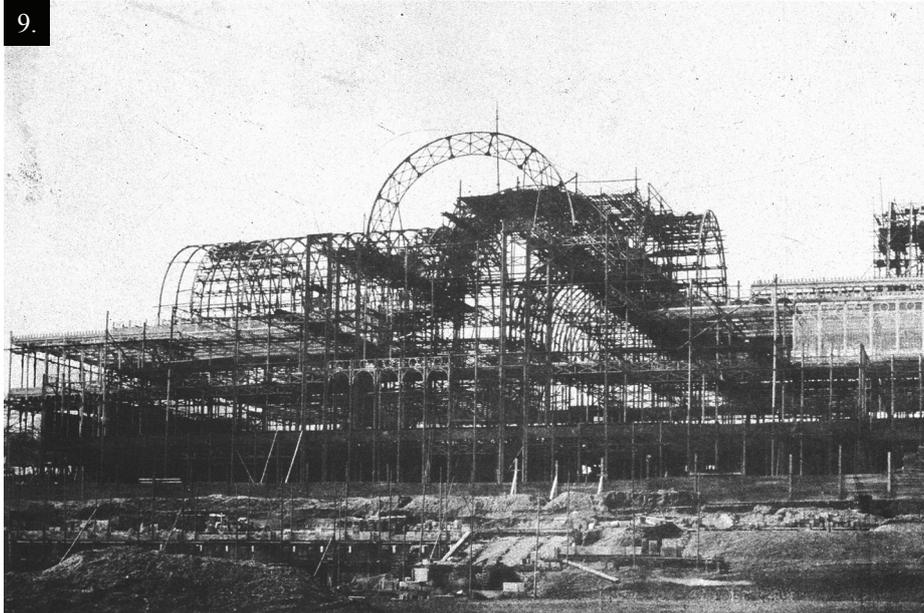
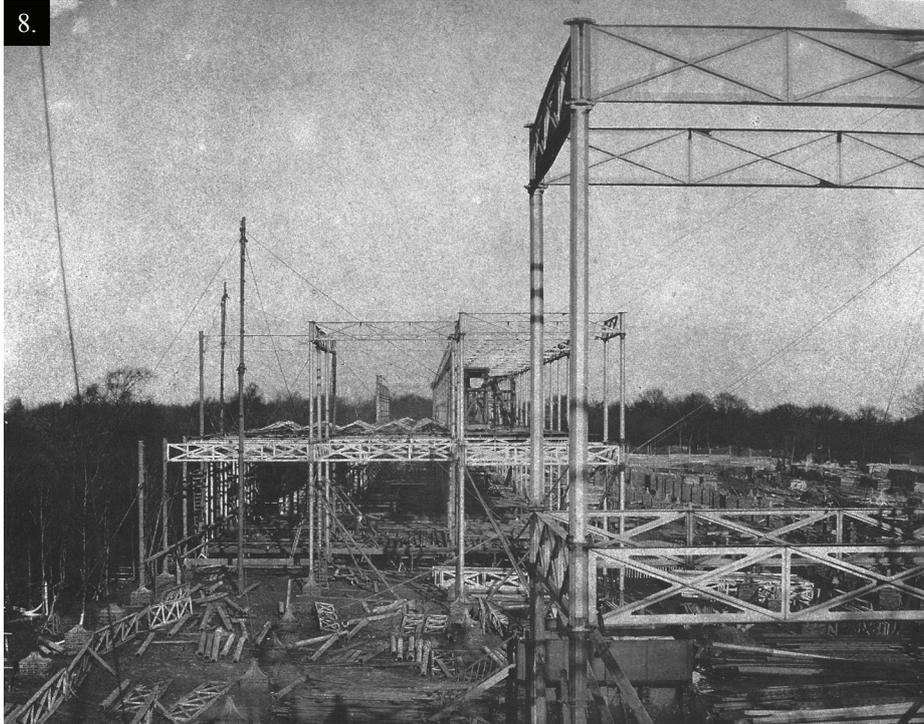
- im Bereich des Entwurfs: Aufgrund der seriellen Fertigung, ist der Entwurf an Rastervorgaben, modularen Einheiten und der Wiederholung als Element der Formästhetik gebunden. Das Repetitive wird zum primären stilistischen Element und bereitet den Weg einer neuen Formästhetik vor.
- im Bereich der Produktion: Die Einzelfertigung wird von der serielle Fabrikation abgelöst. Dies ermöglicht das Fertigstellen eines Bauwerks mit solchen Ausmassen innerhalb eines beschränkten Zeitraums und verlangt gleichzeitig nach neuen Methoden der Bauorganisation.

---

<sup>309</sup> Mumford, L.: „Mythos der Maschine. Kultur, Technik und Macht. Die umfassende Darstellung der Entdeckung und Entwicklung der Technik“, Fischer Taschenbuch Verlag, Wien, 1977, S. 492.

<sup>310</sup> Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996, S. 150.

<sup>311</sup> Vgl. Werner, E.: „Der Kristallpalast zu London 1851“, Werner-Verlag, Düsseldorf, 1970, S. 59.



8. Das Mittelschiff, von der ersten Galerie her gesehen, erste Bauphase, Kristallpalast  
9. Südliches Querschiff, vom Park her gesehen, Kristallpalast

- im Bereich der Arbeitsprozesse: Die maschinelle Fertigung ersetzt die zu dem Zeitpunkt übliche handwerkliche Fertigung der Einzelteile. Die standardisierte Serienfertigung überragt die manuelle Fertigungsmethodik.
- im Bereich der Baustelle: Anders, als bis dahin üblich im Baugewerbe, findet der Übergang von der Vorortfertigung zur Montage auf der Baustelle statt. Nur wenige Elemente werden noch Vorort gefertigt. Ein neuer baustrategischer Ansatz, der seinen Ursprung in den neuen Fabrikationsmethoden der industriellen Revolution hat, entsteht somit.
- im Bereich der Maschine: Die ablaufenden Baustellenprozesse sind überwiegend maschinenabhängig, so dass man, bezogen auf den damaligen Kontext, von einer teilautomatisierten Baustelle sprechen kann.
- im Bereich der nachhaltigen Nutzung: Standardisierte Baelemente, in Kombination mit einem maschinenabhängigen Zusammenbau, ermöglichen vereinfachte Montage - Demontage - Montage Kreisläufe.
- im Bereich der Fertigungsstrategie: Die Entstehung einer anderen Baustellenlogik und -logistik wird angestoßen. Die Gesamtheit der aufgezählten Faktoren generiert eine neue Art der Prozessabläufe auf der Baustelle.

Die Liste der oben enumerierten Veränderungen liest sich als eine Aufzählung von Konsequenzen, welche sich in ihrer absoluten Gesamtheit aus folgenden zwei Konditionen, die auch als Voraussetzungen interpretiert werden können, auf direktem Weg ableiten:

- die Entwicklung neuer technischer Verfahren für die industrielle Produktion von Guss - und Schmiedeeisen
- die Entwicklung des Maschinenwesens: die Entwicklung neuer Werkzeug-, Kraft- und Arbeitsmaschinen

Die angeführten resultierenden Auswirkungen sind allumfassend und wirken sich gleichzeitig auf allen Ebenen von Entwurf, Fabrikation und Baustelle aus, wobei Material und Fertigungstechnologie als Katalysatoren betrachtet werden können. Das Revolutionäre an Paxtons Bauvorhaben war, dass er *„ein Projekt vorschlug, das in der Hauptsache aus einer genauen Beschreibung der zu verwendeten Bauteile, der Methode der Produktion, der Art der Montage und vor allem einem Zeitplan bestand. [...] Der Kristallpalast kann in der Tat als der sichtbar gewordene Wendepunkt angesehen werden, durch den die gesamte Entwicklung der Baugeschichte eine andere Richtung einschlug.“*<sup>312</sup>

Der Kristallpalast dient als einführendes Beispiel zum Aufzeigen der potenziellen Einflüsse, die sich aus technologischen Entwicklungen und ihrem Implementieren ins Bauwesen ableiten können. Der Architekturtheoretiker Siegfried Giedion fasst es sehr treffend zusammen, wenn er den Crystal Palace als *„die Verwirklichung eines neuen*

---

<sup>312</sup> Wachsmann, K.: „Wendepunkt im Bauen“, Krauskopf Verlag, Wiesbaden, 1959, S. 14.



10. Das Mittelschiff, vom Südende aus gesehen, Innenraum, Kristallpalast

*Baugedankens, für den es kein Vorbild gab*<sup>313</sup> beschreibt. Die Verwirklichung, also die Materialisierung dieses Bauwerks entspringt allein den neuen, erweiterten technischen Entwicklungen und ist durch diese selbst konditioniert.

## 6. Schlussfolgerungen zum Potenzial technologischer Entwicklungen

Diese historischen Betrachtungen, dienen dazu, aufzuzeigen, welche Rolle und welchen Einfluss die Einführung neuer Materialien, in diesem konkreten Fall Stahl, neuer Produktionssysteme und ihre Implementierung in das Bauwesen auf die Disziplin der Architektur haben können. Aus diesen Synergien ergeben sich neue Arten operationaler Logiken, sowohl auf der Ebene des Entwurfs als auch auf der Ebene der Fabrikation. Diese Prozesse können gegebenenfalls selbst grundlegende Veränderungen des Berufsbildes hervorrufen oder neue Berufsarten entspringen lassen, wie zum Beispiel der Ingenieursberuf.

Ein enger Zusammenhang zwischen Entwicklungen im Bereich der Technologie, Material, Fertigungsverfahren und Architektur wird bestätigt. Dabei handelt es sich nicht nur um eine Korrelation zwischen dem Auftreten neuer Technologien und Veränderungen in der Architektur. Dem liegt vielmehr eine Kette der Kausalität zugrunde, bei der ein Wandel im technischen Bereich, wie der Wandel von Werkzeug zu Maschine und das Auftreten neuer Verfahren, zu einem Wandel in der Architektur führt. Siegfried Giedion untermauert diese Beobachtung, mit der Aussage, dass *„die Samen dieser neuen Architektur in jenem Augenblick gepflanzt wurden, da das Handwerk der Industrialisierung Platz machen musste“*.<sup>314</sup> Bei diesem Wandel muss es sich nicht zwangsweise um eine Veränderung, die alle Bereiche der Architektur umfasst, handeln. Natürlich blieben Bereiche der Architektur erhalten, in denen die üblichen traditionellen Bauarten weiterhin wie gehabt praktiziert wurden. Diese Änderungen haben sich erst mit der Zeit zum neuen Standard des Bauens etabliert. Die durch die Industrielle Revolution hervorgerufenen Veränderungen im Bauwesen waren von derart grundsätzlicher Natur, dass es durchaus berechtigt ist, von einem Paradigmenwechsel im Bauwesen zu sprechen. Dieses im Zuge der Industrialisierung entstandene neue Paradigma des Bauens, lässt sich zusammenfassend durch folgende Charakteristiken beschreiben:

- Fortschritte in der Baumaterialentwicklung: Eisen, Stahl, Zement und Glas
- Erfinden und Entwickeln neuer Maschinen für die Fertigung von Einzelteilen
- Entwicklung neuer Materialbearbeitungsverfahren
- Entwicklung neuer Fertigungsprozesse und neuer Produktionslogiken: die industrielle serielle Massenproduktion

---

<sup>313</sup> Giedion, S.: „Raum. Zeit. Architektur. Die Entstehung einer neuen Tradition“, Birkhäuser Verlag, Basel, 1996, S. 181.

<sup>314</sup> Giedion, S.: „Raum. Zeit. Architektur. Die Entstehung einer neuen Tradition“, Birkhäuser Verlag, Basel, 1996, S. 138.

- Entwicklung neuer Arbeitsweisen: Vorfertigung und Montage

Diese Veränderungen, Innovationen und die entstandene Neuordnung in den Bereichen des Materials und der Produktion wirkten sich in ihrer Interaktion auf das Bauwesen aus und führten während der Industrialisierung zu:

- einer Verdrängung des Handwerks
- einer Verdrängung der Hand-Werkzeug-Technik
- dem Ersetzen der handwerklichen Arbeitsweise durch maschinell betriebene Fertigungsverfahren
- einem Auftreten der Maschinen-Werkzeug-Technik
- einer Entwicklung neuer Bautechniken und Bauverfahren, somit wie beschrieben, neuer Baugestaltungen. Die neue Baugestaltung, die sich ergeben hat, beruhte überwiegend auf dem Prinzip der Vorfertigung und Montage, was eine paradigmatische Veränderung zum damaligen verbreiteten Prinzip der Vorort-Fabrikation und Konstruktion darstellte.

Die Feststellung der Historikers Wolfgang König, dass „*sich in der Industriellen Revolution qualitativer Wandel und quantitatives Wachstum vereinigten*“<sup>315</sup> erfasst die auf einer generalisierten Ebene doppeldeutige Natur dieses Paradigmenwechsels.

Effizienz durch die maschinelle Produktion und Prozessoptimierung führten zu davor nie erreichten Produktionszahlen und parallel wurde auch eine Qualitätssteigerung des Materials und der gefertigten Produkte gewährleistet. Die präsentierte Fallstudie zur Industrialisierung mag zunächst den Eindruck erwecken, dass hier zugunsten der Maschine und des Ersetzens der menschlichen Komponente durch das Maschinelle argumentiert wird. Nicht das Eliminieren des Handwerklichen ist das erklärte Ziel, sondern das Transferieren handwerklicher Logiken auf die Maschine, deren Funktionslogik den entwerferischen Ansprüchen entspricht und den Entwurf unterstützt. Die beabsichtigte Aussage, auch im Zusammenhang mit dem Konzept der Machinecraft, muss jedoch differenzierter betrachtet werden.

Richard Sennett nennt das bekannte Beispiel des, vom französischen Erfinder Jacques de Vaucanson entwickelten, Webstuhls, der die Seidenmanufaktur revolutionierte und gleichzeitig die Weber verdrängte. Sennett liefert somit ein historisches Beispiel für die Verdrängung des Handwerkers durch die Maschine.<sup>316</sup> Die theoretische Hypothese der Machinecraft zielt genau auf das Gegenteil ab. Ziel ist weder die Verdrängung noch das Ersetzen des Menschen durch die Maschine oder den Roboter. Es wird thematisiert, dass mittels der Fähigkeit die Operationsweise einer Maschine zu verstehen und in ihren technischen Bestandteilen zu manipulieren, so dass sie auf die spezifischen Anforderungen eines Entwurfs angepasst werden kann, sich neue Möglichkeiten für die Architektur ergeben. Daraus kann eine Vereinheitlichung von

---

<sup>315</sup> König, W.: „Technikgeschichte. Eine Einführung in ihre Konzepte und Forschungsergebnisse“, Grundzüge der Modernen Wirtschaftsgeschichte Band 7, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2009, S. 119.

<sup>316</sup> Sennett, R.: „Handwerk“, Berlin Verlag, Berlin, 2008, S. 121.

Entwurf und Fabrikation, mit dem Architekten im Mittelpunkt stehend, eingeleitet werden. Handwerk oder das handwerkliche Arbeiten werden als eine Organisationsform von operationalen Fertigungsprozessen verstanden. Wie bereits argumentiert, stellen beim handwerklichen Arbeiten Entwurf, Material, Werkzeug miteinander eng verbundene Parameter dar, die sich gegenseitig bedingen. Durch die gegenseitige Abhängigkeit herrscht keine Hierarchisierung dieser Elemente, in dem Sinn, dass nicht der Entwurf die primäre Rolle einnimmt, dem alle anderen Parameter untergeordnet werden. Ganz im Gegenteil, kann eigentlich so argumentiert werden, dass Paxton die neuen technischen Fabrikationsmöglichkeiten als Ausgangspunkt seiner Planung benutzte, um anhand eines Entwurfs die neuen Potenziale aufzuzeichnen. Der Entwurf basiert auf repetitiven Modulen, die durch serielle Massenproduktion und Vorfertigung erzeugt werden. Der Entwurf versucht durch seine Komposition auf die neuen technischen Errungenschaften zu reagieren und diese in den Bereich der Architektur auf adäquate Art und Weise zu implementieren. Doch um den Gedanken des Handwerklichen durch die Maschine weiterzuspinnen, widmen wir uns dem Thema der Prozesskontrolle. Das Faktorengefüge von Entwurf-Material-Werkzeug und die korrelierten Fertigungsprozesse werden über direkte Einflussnahme vom Handwerker kontrolliert. Die Autorität und Kontrolle über das Bauvorhaben befinden sich in Paxtons Einflussosphäre, wobei aber weiterhin der partizipatorische Charakter der Disziplin beibehalten wird. Das Modell des Baumeisters entspricht somit der Vorgehenslogik, die dem Crystal Palace zugrunde liegt. Entwurf, Material und Werkzeug, in diesem Fall durch die Maschine vertreten, repräsentieren äquivalente Prozessparameter, die auf einer abstrakten Ebene einem assoziativen Modell entsprechen.

Dieses Kapitel beabsichtigt den Wandel aufzuzeigen, der von technischen Innovationen und Maschinen im Gebiet der Architektur ausgehen kann. Wie im Fall des Crystal Palace zu sehen ist, können Neuerungen im Bereich der Fabrikation einen grundlegenden Wandel sowohl bezüglich des Entwerfens als auch der Fabrikation generieren. Das Zusammenspiel von Material- und Fabrikationsentwicklung kann zu einer Umwälzung der anerkannten Entwurfs- und Fertigungslogiken und letztendlich auch zu neuen Ausdrucksformen in der Architektur führen. Es lassen sich eindeutige Parallelen zum Baumeisterparadigma erkennen. Paxton hat sich intensiv mit Entwurf und Fabrikation auseinandergesetzt und gleichzeitig Aspekte des Maschinenbaus und der Maschinenentwicklung in sein Vorgehen integriert. Das Schisma von Planung und Ausführung wird aufgehoben, wobei die Maschine als Vermittler agiert. Es liegt eine Kontinuität zwischen Entwurf und Fertigung vor. Paxton hat es verstanden sich die Nutzen neuer Techniken zu seinem Vorteil bzw. zum Vorteil seines Bauvorhabens einzusetzen.

## V. Robotik

### 1. Im Kontext der Machinecraft

Das erläuterte Konzept der Machinecraft basiert auf den Synergien, die sich aus dem Zusammenwirken von Handwerklichkeit, Maschine bzw. Roboter und dem Architekten ergeben können. Im bisherigen Verlauf wurden das Handwerk und handwerkliches Arbeiten als Ausgangspunkte und Grundbausteine der architektonischen Betätigung thematisiert. Weiterführend wurden die Modelle bzw. die Paradigmen vom Baumeister und Architekten präsentiert und vergleichend gegenübergestellt. Dabei wurde der Fokus auf die Arbeitsmethodik, die Beziehung zu Handwerk, Werkzeug und Maschinenentwicklung gelegt. Die Potenziale, die vom Baumeister-Paradigma ausgehen, wurden evidenziiert und Parallelitäten zum digitalen Medium aufgezeichnet. In der weiteren Analyse wird nun zum Roboter übergegangen, der durch seine technische Variabilität als Fertigungswerkzeug das tragende Element des Konzepts der Machinecraft darstellt.

Auch wenn Roboter als hochmoderne Utensilien der Fabrikation betrachtet werden und gemäß des allgemeinen Verständnisses in der Architektur bislang als Exoten gelten, so besteht eigentlich eine lange Tradition des robotischen Einsatzes im architektonischen Kontext. Im Zusammenhang mit der Automatisierung des Bauwesens erfuhren Roboter bereits in den siebziger Jahren einen verbreiteten Einsatz auf der Baustelle, wie es das Beispiel der japanischen Bauindustrie auf eine eindrucksvolle Art und Weise veranschaulicht. Somit ist der heutige Gebrauch von Robotern in der Architektur kein geschichtlich abgekapseltes Phänomen, sondern blickt bereits auf eine vierzigjährige Tradition zurück. Das Implementieren der Robotik in den disziplinären Bereich der Architektur steht vor allem in enger Verbindung mit den Entwicklungen aus der Automobilindustrie. Zunächst werden einleitend geschichtlicher Kontext und industrielle Normen betreffend der Klassifizierung von Robotern vorgestellt, um anschliessend eine Reihe aktueller Fallbeispiele robotischen Einsatzes zu analysieren.

### 2. Roboter - Begriffserklärung und allgemeine Definition

Der Begriff Roboter wurde 1920 vom tschechischen Schriftsteller Karel Capek in seinem Schauspielstück „*R.U.S. - Rossum's Universal Robots*“ eingeführt und beruft sich in seiner Etymologie auf das tschechische Wort „*rabota*“, welches sich durch Fronarbeit, Zwangsdienst übersetzen lässt.<sup>317</sup> Durch die gewählte Namensgebung, lässt sich die Natur des Roboters als die einer Maschine, die im Dienst des Menschen steht, interpretieren. Das im Schauspielstück präsentierte Szenario inventiert diese

---

<sup>317</sup> Vgl. Kluge, F.: „Etymologisches Wörterbuch der Deutschen Sprache“, 17. Auflage, Walter de Gruyter & Co., Berlin, 1957, S. 603.

Rollenvergabe, indem letztendlich Roboter die Welt dominieren und den Untergang der menschlichen Zivilisation determinieren.<sup>318</sup>

Der Begriff Roboter ruft die unterschiedlichsten Assoziationen hervor. Oft wird der Begriff mit humanoiden Robotern und künstlicher Intelligenz in Verbindung gebracht, wie oft in der Literatur oder in Filmen dargestellt. Häufig wird das Bild des Roboters mit dem einer hoch technologisierten und komplizierten Maschine in Zusammenhang gebracht, welche für das Ausführen komplexer Operationen eingesetzt wird und zu deren Handhabung und Kontrolle nur ein geschlossener, exklusiver Kreis eingeweihter Experten Zugang haben. Diese Wahrnehmung positioniert den Roboter abseits des Alltäglichen und schafft eine gewisse Distanzierung zu dieser Art der Technologie, wobei eine kontinuierliche Steigerung des Robotereinsatzes in einer Vielzahl von Bereichen zu beobachten ist. Im architektonischen Diskurs lässt sich oft eine Verwechslung zwischen Robotern und anderen heute gängigen digitalen Werkzeugen wie zum Beispiel CNC-Maschinen (Computerized Numerical Control, zu Deutsch Computerunterstützte Numerische Steuerung) feststellen. Um dieser falschen Begriffsauslegung entgegenzuwirken, ist es wichtig, eine klärende Begriffsdefinition innerhalb eines technischen, industriellen Kontexts anzugeben.

Die internationale ISO Norm 8373:2012 mit dem Titel „Roboter und Robotikgeräte“ definiert einen Roboter als *„einen gesteuerten Mechanismus, in zwei oder mehreren Achsen programmierbar, der über ein gewisses Maß an Autonomie verfügt und sich innerhalb seines Umfelds bewegt, um vorgesehene Aufgaben zu erfüllen.“*<sup>319</sup> Die definierenden Merkmale eines Roboters gegenüber anderen Maschinenkategorien sind somit seine Steuerbarkeit, Programmierbarkeit, Beweglichkeit und die begrenzte Autonomie.

Im Gegensatz dazu, unterscheiden sich CNC-Maschinen, zu welchen Lasercutter und Mehr-Achs-Fräsmaschinen gehören, welche oft in der Architektur Verwendung finden, grundsätzlich von Robotern. Diese Maschinenkategorie wird wie folgt definiert:

*„CNC, Computerized Numerical Control, umfasst die elektronische Steuerung von Werkzeugmaschinen. [...] Heute ist die CNC-Steuerung eine preiswerte Standardsteuerung, die in allen Bereichen der Fertigungstechnik eingesetzt wird. Ihr Einsatzbereich ist im Besonderen da, wo einzelne Werkstücke, oder kleine und mittlere Serien und Wiederholaufträge gefertigt werden.“*<sup>320</sup>

---

<sup>318</sup> Vgl. Barthelmeß, U., Furbach, U.: „iRobot – uMan. Künstliche Intelligenz und Kultur: Eine jahrtausendealte Beziehungskiste“, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2012, S. 89.

<sup>319</sup> ISO 8373:2012(en): Robots and robotic devices, abrufbar unter: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en> (Stand 04.06.2014).

<sup>320</sup> Hehenberger, P.: „Computerunterstützte Fertigung. Eine kompakte Einführung“, Springer Verlag Berlin-Heidelberg, 2011, S.79 zitiert nach Kief, H.B.: NC/CNC-Handbuch 2005/2006, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2005.

Sowohl Industrieroboter als auch CNC-Maschinen gehören in der Architektur der Gruppe der digitalen Fabrikationswerkzeuge an. Der wesentliche Unterschied für die Architektur zwischen beiden besteht in der Art der Steuerung. CNC-Maschinen führen standardisierte, festgelegte Fabrikationsaktionen durch und sind bezüglich ihrer Arbeitsmethodik nicht manipulierbar. Ein Lasercutter kann zwar unterschiedlichste geometrische Umrisse aus einer planen Platte ausschneiden, jedoch sind seine Aktionen in dem Mass standardisiert, dass das Gerät eben nur zur Ausführung von Schneide- oder Gravuraktionen geeignet ist. Im Gegensatz dazu, können Industrieroboter zur Ausführung einer ausgedehnten Bandbreite an Handlungen benutzt werden, je nachdem welche codebasierten Instruktionen von Benutzer angegeben werden. Darüber hinaus verfügen Industrieroboter über mehrere Freiheitsgrade der Bewegung als CNC-Maschinen. Dies bedeutet dass komplexere Bewegungsabläufe vorgegeben werden können.

### 3. Klassifizierung von Robotern

Abhängig von dem Zusammenhang der Analyse und dem Kontext der Betrachtung lassen sich eine Vielzahl unterschiedlicher Klassifizierungssysteme antreffen. Zu der Liste der Kriterien, anhand derer solche Einordnungen vorgenommen werden, lassen sich folgende Differenzierungselemente, zu den am häufigsten angetroffenen zählen:

- Nach Industriebereich: Da die Bandbreite der möglichen Einsatzbereiche von Robotern äußerst divers ist, wird oft auf eine Klassifizierung abhängig vom Industriebereich zurückgegriffen. Zu den Einsatzbereichen der Industrie gehören: Medizin, Autoindustrie, Flugzeugbau, Militär, Nahrungsmittelverarbeitung, Such- und Rettungseinsätze, Bauwesen, Raumfahrt usw.
- Nach der Art der technischen Ausführung: Portalroboter, horizontaler oder vertikaler Schwenkarmroboter, mobile oder stationäre Roboter usw.
- Nach der Art des Umgebungseinsatzes: Wasser, Boden, Luft.

Bei diesen genannten Systemen der Klassifizierung handelt es sich um flexible Unterteilungsmodelle, welche an keine normierten Vorgaben gebunden sind. Abhängig von dem bearbeiteten thematischen Fokus, lassen sich in der Literatur unterschiedliche Klassifizierungsmöglichkeiten identifizieren. Die vorliegende Arbeit orientiert sich an eine normierte Klassifizierung, die in Zusammenhang mit der Art der ausgeführten Arbeitsleistung vorgenommen wurde. Gemäss der ISO Norm 8373:2012 wird bei Robotern grundsätzlich zwischen Service- und Industrierobotern unterschieden. Serviceroboter werden wie folgt definiert:

*„Roboter, der nützliche Aufgaben für Menschen oder Einrichtungen ausführt, mit der Ausnahme von Anwendungen in der Automatisierungstechnik“.*<sup>321</sup>

---

<sup>321</sup> ISO 8373:2012(en): Robots and robotic devices, abrufbar unter: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en> (Stand 04.06.2014)

Dementsprechend handelt es sich bei einem Industrieroboter um einen Roboter, der die Aufgaben in der Automatisierungstechnik übernimmt. Basierend auf dieser Klassifizierung wird in den folgenden Abschnitten detailliert auf die Entwicklungsgeschichte, den Einsatz und die Relevanz von Industrierobotern für das Bauwesen eingegangen. Dabei wird die Kategorie der Serviceroboter von den Betrachtungen ausgeschlossen.

## 4. Industrieroboter

### Geschichtlicher Überblick

Im Folgenden werden die wichtigsten Schritte in der geschichtlichen Entwicklung des Industrieroboters aufgezeichnet. Abgesehen von dem Anreißer der geschichtlichen Komponente, dient dies mehreren Zwecken. Zum einen sollen Aussagen über die ursprünglichen Anwendungsgebiete und Informationen zu den Entwicklern geliefert werden. Darüber hinaus soll die zeitliche Geschwindigkeit der Entwicklung von Innovationen in diesem Industriebereich aufgezeigt werden.

- Der Ingenieur Joseph Engelberger gründete mit dem Erfinder George Devol die Firma Unimation und entwickelten gemeinsam den ersten Industrieroboter Unimate. Der Firmename Unimation steht für „universal automation“, also universelle Automatisierung und beschreibt das Ziel ihrer erfinderischen Bemühungen. Der 1961 entwickelte Roboterarm Unimate wird weltweit als erster Industrieroboter anerkannt. Unimate, hydraulisch angetrieben und mit einem Gewicht von 2 Tonnen, wurde in der General Motors Fabrik in Turnstedt, New Jersey eingesetzt und fand hauptsächlich eine Verwendung bei Transportaufgaben.<sup>322</sup>
- Ein weiterer wichtiger Schritt in der Evolution des Industrieroboters fand 1969 mit der Entwicklung des Stanford Arms statt. Der von Victor Scheinman am Stanford Research Institute in Kalifornien entwickelte Roboterarm konnte Bewegungen in sechs Achsen vornehmen, so dass ab sofort komplexe Bewegungsabläufe keine Einschränkung mehr darstellten. Im Gegensatz zu Unimate, wird der Stanford Arm elektrisch angetrieben.<sup>323</sup>
- 1971 entwickelt die KUKA für Daimler-Benz AG die erste Schweißtransferstraße Europas, bei der fünfsachsige Roboter der Firma Unimation verwendet wurden.<sup>324</sup>

---

<sup>322</sup> Vgl. Ichbiah, D.: „Robots. From Science to Technological Revolution“, Harry N. Abrahams Publishers, Geneva, 2005, S. 207.

<sup>323</sup> Ebd., S. 208.

<sup>324</sup> <http://www.kuka-robotics.com/de/company/group/milestones/1971.htm> (Stand 05.09.2014).

- 1973 entwickelte das schwedische Unternehmen ASEA, heute über die 1988 stattfindende Fusion mit BBC als das deutsche Unternehmen ABB bekannt, den Roboterarm IRB6. Kontrolliert über einen programmierbaren Intel-Mikrochip, konnte der IRB6 Objekte mit einem Gewicht von bis zu 6 kg umgehen.<sup>325</sup> Heute gehört ABB zu einem der führenden Hersteller im Bereich der Industrierobotik.
- Victor Scheinman entwickelte für Unimation mit der Unterstützung von General Motors im Jahr 1978 eine Universalmaschine namens Programmable Universal Machine for Assembly (PUMA).<sup>326</sup>
- 1978 wurde in Japan der Roboterarm SCARA an der Yamanashi Universität erfunden, dessen Akronym für Selective Compliance Assembly Robot Arm steht. Als ein 4-Achs-Arm und durch die kinematische Achsausführung konnte SCARA in dem Bereich der schnellen Kleinmontage eingesetzt werden.<sup>327</sup>

### Definition

Weltweit gibt es eine Vielzahl von Institutionen und Verbänden, die sich mit Industrierobotern beschäftigen und deren Entwicklung in der Forschung und Industrie beobachten. Zu den namenhaftesten Institutionen zählen die Folgenden: International Federation of Robotics (IFR), Japanese Industrial Robot Association (JIRA), European Robotics Association (EUropean Robotics) und das Robotics Institute of America (RIA). Fast jeder dieser Verbände liefert eine eigene Definition für den Begriff des Industrieroboters, wobei alle Definitionen sich zwar im Wortlaut unterscheiden, aber dieselben charakteristischen Merkmale aufweisen. Abgesehen davon existieren eine Reihe von Normen und Richtlinien, die sich mit der Definition und Klassifizierung von Robotern und Robotersystemen beschäftigen und diese regulieren. Zu diesen gehört die Internationale DIN-Norm ISO 8373. Laut dieser handelt es sich bei einem Industrieroboter um:

*„einen automatisch kontrollierten, reprogrammierbaren Mehrzweckmanipulator, programmierbar in drei oder mehreren Achsen, entweder stationär oder mobil einsetzbar für industrielle Automatisierungsanwendungen“.*<sup>328</sup>

Gemäss den Vorgaben dieser Norm setzt sich ein Industrieroboter aus einem Manipulator, einschließlich der Aktoren bzw. Aktuatoren, also der Bauelemente der

---

<sup>325</sup> Vgl. Ichbiah, D.: „Robots. From Science to Technological Revolution“, Harry N. Abrahams Publishers, Geneva, 2005, S. 209.

<sup>326</sup> Vgl. Haun, M.: „Handbuch Robotik. Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter“, Springer Vieweg, Berlin, 2013, S. 5.

<sup>327</sup> Vgl. Siciliano, B., Khatib, O.: „Handbook of Robotics“, Springer Verlag, Berlin, 2008, S. 967.

<sup>328</sup> ISO 8373:2012(en): Robots and robotic devices, abrufbar unter: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en> (Stand 04.06.2014)

Steuerkreisläufe, und einem Steuerungskontroller, einschließlich des Handsteuergeräts und der Kommunikations- bzw. Datenübertragungsschnittstelle, bestehend aus Hardware und Software, zusammen. Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) definiert in der VDI-Richtlinie 2860 zur Montage- und Handhabungstechnik einen Industrieroboter folgendermassen:

*„Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten, mit mehreren Achsen ausgestattet, deren Bewegung hinsichtlich Bewegungsfolge und Wege bzw. Winkeln frei, d. h. ohne mechanischen Eingriff, programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und Fertigungsaufgaben ausführen.“<sup>329</sup>*

Zusätzlich dazu lassen sich Industrieroboter, gemäß folgender Kategorien, bezüglich ihrer technischen Ausführung klassifizieren:<sup>330</sup>

- Anzahl der Freiheitsgrade,
- Art der Gelenkverbindung bzw. der Kinematik (kartesisch, zylindrisch, sphärisch),
- Art der Bewegungskontrolle und Antriebssystem (elektrisch, hydraulisch, pneumatisch).

### **Anwendung von Industrierobotern**

Dadurch dass Industrieroboter in den verschiedensten Industriebranchen zum Einsatz kommen sind ihre Anwendungsbereiche sind sehr weit gefächert. Fabriken unterschiedlichster Art bedienen sich der Industrieroboter von der Automobilbranche, zur Medizintechnik bis hin zu Weltraumvorhaben. Zwar variieren die Branchen, dennoch lassen sich aber die Anwendungsarten in drei Hauptkategorien zusammenfassen:

- Direkte Bearbeitung: schweißen, schrauben, schneiden, kleben, pressen, beschichten, lackieren u.ä.
- Messen
- Manipulation: montieren, verpacken, palettieren, befördern.<sup>331</sup>

Anders als bei anderen Fabrikationssystemen, die auf dem Einsatz von Spezialmaschinen basieren, ist die Anpassung der Industrieroboter auf die branchenspezifischen Anforderungen einfacher zu erzielen bzw. setzt ihre Umfunktionierung auf andere Aufgaben keine grundsätzliche technische Veränderung

---

<sup>329</sup> Haun, M.: „Handbuch Robotik. Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter“, Springer Vieweg, Berlin, 2013, S. 5 zitiert nach VDI-2860 Richtlinie für die Montage- und Handhabungstechnik des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf.

<sup>330</sup> Vgl. Reichardt, J.: „Robots: Facts, Fiction + Prediction“, Thames and Hudson, London, 1978, S. 141.

<sup>331</sup> Vgl. Haun, M.: „Handbuch Robotik. Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter“, Springer Vieweg, Berlin, 2013, S. 10; Vgl. Reichardt, J.: „Robots: Facts, Fiction + Prediction“, Thames and Hudson, London, 1978, S. 140.

der Maschine selber voraus, sondern kann durch das Umdisponieren digitaler Instruktionen erzielt werden.

### **Vorteile des Industrieroboters**

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Robotern und anderen Maschinen ist ihre Programmierbarkeit, das Angeben von Instruktionen zur Durchführung vordefinierter Aktionen. Industrieroboter etablieren sich vermehrt als wesentliches Werkzeug der Fabrikation, was anhand der steigenden Umsatzzahlen der Industrie zu belegen ist. Dies liegt daran, dass ihr Einsatz mit einer Reihe Gewinn bringender Nutzen verbunden wird. In der „*World Robotics 2005*“-Studie der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) werden hierfür folgende ausschlaggebende Ursachen identifiziert: Kostensenkung, Produktivitäts- und Qualitätssteigerung, Sicherstellung der globalen Wettbewerbsfähigkeit und der ermöglichte Transfer gefährlicher und aufwendiger Arbeiten vom Menschen auf die Maschine.<sup>332</sup>

Der Einsatz von Industrierobotern weist gegenüber der manueller Fertigungsprozesse eine Vielzahl von Vorteilen auf. Auf Grund dieser Vorteile erfuhr ihr Einsatz in der Industrie einen rasanten Aufstieg. Bei Industrierobotern handelt es sich um Werkzeuge der Fabrikation, die einen hohen Grad an Präzision aufweisen. Des Weiteren eignen sie sich für die Ausführung von sowohl repetitiven als auch variierenden Aufgabenstellungen, ohne dass Qualitätseinbuße berücksichtigt werden müssen. Ihr Gebrauch in der Industrie reduziert Verletzungs- und Gefahrenquellen für die menschliche Komponente. Abgesehen von der hohen Präzision, weisen sie im Vergleich zu der menschlichen Arbeitskraft eine höhere Ausführungsgeschwindigkeit auf und können durch einfaches Reprogrammieren neue Aufgabenstellungen ausführen.<sup>333</sup> Vor allem diese Flexibilität im Bereich der Übernahme neuer Funktionen lässt Industrieroboter, im Vergleich zu anderen Fertigungseinheiten, als sehr attraktive Fabrikationswerkzeuge erscheinen.

## **5. Automatisierung und Robotisierung des Bauwesens**

Die Industrialisierung hat serielle Massenproduktion, Vorfertigung und Montage als neue Standards im Bauwesen avanciert. Die nächste Welle der radikalen Veränderung des Bauwesens wurde erst durch die simultane Digitalisierung von Entwurfs- und

---

<sup>332</sup> United Nations Economic Commission for Europe, International Federation of Robotics: Pressemitteilung zur Studie „World Robotics 2005“, Geneva, 2005, abrufbar unter: [http://www.unece.org/fileadmin/DAM/press/pr2005/05stat\\_p03e.pdf](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/press/pr2005/05stat_p03e.pdf) (Stand 03.09.2014).

<sup>333</sup> Vgl. Ichbiah, D.: „Robots. From Science to Technological Revolution“, Harry N. Abrahams Publishers, Geneva, 2005, S. 206.

Fertigungsprozessen hervorgerufen.<sup>334</sup> Diese neuen Standards wurden beibehalten, wobei zunächst der Transfer aus dem Analogen ins Digitale stattgefunden hat. Der Ausdruck der Automation im Bauwesen beschreibt *„die Automatisierung der Konstruktionsprozesse und der Einsatz des Roboters stellt einen Aspekt dieser Automatisierung dar“*.<sup>335</sup> Die Automatisierung der Bauprozesse und der Baustelle findet somit ihren Ursprung in der industriellen Revolution und in der Entwicklung der zur Massenproduktion gedachten Maschinen.<sup>336</sup>

Der Architekt Wachsmann beschreibt die Automation wie folgt:

*„Die Automation ist nichts weiter als der unter vollkommene Kontrolle gebrachte Arbeitsvorgang. Durch die Aneinanderreihung von Spezialmaschinen, die durch ein automatisches Zuführungssystem von Material zu einem kontinuierlichen Verformungsprozeß [sic!] gekuppelt sind, entsteht eine vollautomatische Produktionsanlage. Diese kann aber so elastisch sein, daß [sic!] durch Veränderungen von Werkzeugen, Hinwegnehmen, Hinzufügen oder Auswechseln von Maschinen immer neue Kombinationen von Arbeitsvorgängen erzeugt werden können, die Veränderungen und Verbesserungen der Produkte zur Folge haben.“*<sup>337</sup>

Demzufolge sieht Wachsmann die Verkettung von Fabrikationsprozessen als wesentlichen Vorzug der Automatisierung. Das Verketteten der Fabrikationsprozesse kann als ein kontinuierlicher Vorgang ablaufen und eine Effizientisierung der Fertigung per se und somit auch der Endprodukte hervorrufen. Den Rahmen dafür bildet die mit Maschinen ausgestattete Fabrik. Dieser Leitgedanke lässt sich sehr einfach auf die Anwendung von Industrierobotern übertragen.

### **Vorbild und Einfluss der Automobilindustrie**

Die Automatisierung in der Bauindustrie lässt sich auf den Taylorismus und der davon abzuleitenden Spezialisierung durch eine spezifische Aufteilung der Arbeitsprozesse zurückführen.<sup>338</sup> Der größte industrielle Einsatz von Robotern findet in der Automobilindustrie statt.<sup>339</sup> Eine Studie der International Federation of Robotics gibt

<sup>334</sup> Vgl. Möller, E.: „Zu einer entfesselten Architektur. Über Industrialisierung und Digitalisierung des Bauens“, S. 35 In: Nerdinger, W., Barthel, R., Junge, R., Krippner, R., Petzold, F. (Hrsg.): „Wendepunkte im Bauen. Von der seriellen zur digitalen Architektur“, Edition Detail, München, 2010.

<sup>335</sup> Siciliano, B., Khatib, O.: „Handbook of Robotics“, Springer Verlag, Berlin, 2008, S. 1080.

<sup>336</sup> Vgl. Wachsmann, K.: „Wendepunkt im Bauen“, Krauskopf Verlag, Wiesbaden, 1959, S. 49.

<sup>337</sup> Wachsmann, K.: „Wendepunkt im Bauen“, Krauskopf Verlag, Wiesbaden, 1959, S. 104.

<sup>338</sup> Vgl. Bock, T., Prochiner, F.: „Automatisierungssysteme im Wohnungsbau“, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart, 1999, S. 171.

<sup>339</sup> Vgl. Haun, M.: „Handbuch Robotik. Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter“, Springer Vieweg, Berlin, 2013, S. 9; Vgl. Ichbiah, D.: „Robots. From Science to Technological Revolution“, Harry N. Abrahams Publishers, Geneva, 2005, S. 217.

an, dass die Autoindustrie, als Hauptabnehmer, 40% aller Industrieroboter übernimmt.<sup>340</sup> Hier erfüllen die Roboter Aufgaben wie das Schweißen, Stanzen, Montieren oder Lackieren. Bezüglich angewandter Fabrikationstechnologien besteht eine enge Verbindung zwischen der Automobilindustrie und dem Bauwesen. Das Bauwesen hat sich die Automobilindustrie zum Vorbild genommen und mehrfach Technologien aus diesem Bereich übernommen und implementiert. Blickt man zu den Anfängen der Robotik zurück, wurde der weltweit erste entwickelte Roboterarm namens Unimate zunächst in der General Motors Fabrik in Turnstedt, New Jersey eingesetzt.<sup>341</sup> Der Autoindustrie liegen Modelle zusammenhängender Entwurfs- und Fabrikationsprozesse zugrunde, so dass Entwurf und Produktion eng miteinander verbunden sind.<sup>342</sup> Auf einer abstrakten Ebene betrachtet gleichen diese Modelle der Vorgehensweisen aus dem Bereich der Architektur. Dadurch lässt sich der oft stattfindende Technologietransfer zwischen der Automobilbranche und der Architektur erklären. Doch nicht nur die Architekten haben sich von den Entwicklungen in der Autoindustrie beeinflussen und inspirieren lassen. Das Verhältnis funktioniert auch in umgekehrter Weise. Als prominentes Beispiel lässt sich die Toyota Motor Corporation und das von ihr entwickelte, ANDON-System, welches von der Automobilfirma auf die Fabrikation von Fertighäusern übertragen wurde. Das ANDON-System beschreibt eine Methode, bei der der Werkmitarbeiter aktiv die Fließbandarbeit und -geschwindigkeit, abhängig von der eigenen Fertigungsarbeit oder Fehlerauftreten, manipulieren kann.<sup>343</sup> Diese Methode, mittlerweile zu einer etablierten Arbeitsmethode in der Automobilbranche herangereift, wurde somit auch auf den Fertighausbau übertragen. Bereits ab 1975 gründete Toyota eine eigene Firmenabteilung, die ausschließlich der Fabrikation von Fertighäusern gewidmet wurde.<sup>344</sup> Das Fertighausssystem von Toyota gehört mittlerweile zum stabilen Angebot der Firma, wobei die Verkaufszahlen kontinuierlich steigend sind. Wurden 1976, ein Jahr nach der Einrichtung der Toyota Housing Corporation nur 12 Einheiten der Fertighäuser verkauft, belaufen sich die Zahlen für das Jahr 2011 auf 4137 verkaufte und gebaute Wohneinheiten.<sup>345</sup> Der Technologietransfer wirkt sich im Bereich der Fertigung bereichernd für die Architektur aus. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird jedoch zu Gunsten einer

---

<sup>340</sup> International Federation of Robotics: „Executive Summary“, 2014, abrufbar unter: [http://www.ifr.org/uploads/media/Executive\\_Summary\\_WR\\_2014\\_02.pdf](http://www.ifr.org/uploads/media/Executive_Summary_WR_2014_02.pdf) (Stand 03.01.2015).

<sup>341</sup> Vgl. Ichbiah, D.: „Robots. From Science to Technological Revolution“, Harry N. Abrahams Publishers, Geneva, 2005, S. 207.

<sup>342</sup> Kieran, S., Timberlake, J.: „Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies are Poised to Transform Building Construction“, McGraw-Hill Professional, New York, 2003, S.13.

<sup>343</sup> Vgl. Bock, T., Prochiner, F.: „Automatisierungssysteme im Wohnungsbau“, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart, 1999, S. 143.

<sup>344</sup> [http://www.toyota-global.com/company/history\\_of\\_toyota/75years/data/business/housing/toyotahome.html](http://www.toyota-global.com/company/history_of_toyota/75years/data/business/housing/toyotahome.html) (Stand 20.08.2014).

<sup>345</sup> [http://www.toyota-global.com/company/history\\_of\\_toyota/75years/data/business/housing/housing\\_sales\\_volumes.html](http://www.toyota-global.com/company/history_of_toyota/75years/data/business/housing/housing_sales_volumes.html) (Stand 20.08.2014).

Anpassung der Technologien an die spezifischen Rahmenbedingungen der Architektur argumentiert. Der erfolgte Technologietransfer muss in den Kontext der heutigen Mittel und Möglichkeiten der Architektur implementiert und integriert werden. Eine Integration in spezifische architektonische Kreisläufe muss erfolgen, so dass es nicht nur bei einem reinen Technologietransfer bleibt, sondern dass eine Manipulation und Adaptierung im dem Sinne einer nutzbringenden Strukturweiterung eingeleitet werden kann. Dafür müssen nicht nur die Affinitäten, sondern auch die disziplinären Unterschiede zwischen der Automobilindustrie und dem Bauwesen verstanden werden. Denn die Voraussetzungen und Konditionen unterscheiden sich zum Teil in einem weitreichenden Ausmaß. So bedient die Autoindustrie die Serienfertigung, sowohl auf der Ebene der eingesetzten Werkstücke als auch auf der Ebene der Endprodukte. Autos bestehen aus Produkten der seriellen Fertigung und sind zugleich selber serielle Produkte. Das Unikat stellt eher eine Irregularität dar. Umgekehrt verhält es sich im Bauwesen. In der Architektur stellen Fertighausssysteme eher die Ausnahme dar, wohingegen das Unikat den Sinnbegriff der Norm darstellt. Gebäude müssen spezifischen Kriterien des Kontexts genügen und entsprechen aus der entwerferischen Sicht betrachtet Unikaten, während das Auto ein Serienprodukt ist. Dessen ungeachtet lassen sich Parallelen in den Anforderungen der Fabrikation identifizieren.

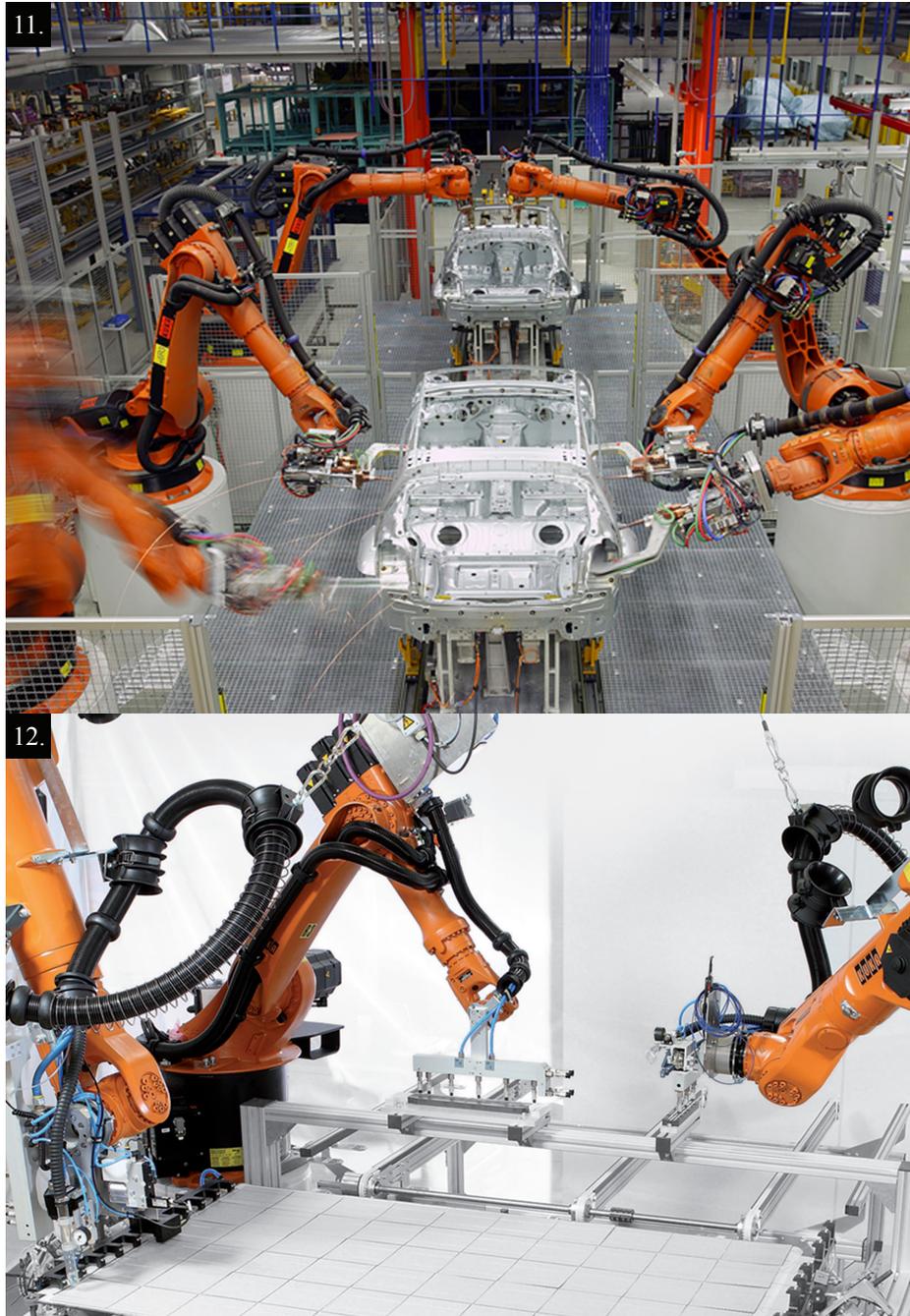
Bei einem Technologietransfer muss beachtet werden, dass Fabrikationstechnologien mit einer gewissen Art der Fabrikationslogik einhergehen. Das korrekte Implementieren dieser setzt das Verstehen deren Logik voraus. Prozessabläufe sind an die inneren Logiken von Entwurf und Fabrikation gekoppelt.

### **Einsatz von Robotern im Bauwesen**

Der Gegenstand der Automatisierung des Bauwesens und der Baustelle stellen Thematiken dar, die spätestens seit der Industrialisierung verstärkt in der Architektur thematisiert werden. Durch die Automatisierung wird die Senkung der Arbeitsrisikofaktoren für die Arbeiter, die Reduzierung potentieller Fehlerquellen, die Effizientisierung der Arbeitsabläufe und Arbeitskosten verfolgt. Die Automatisierung führt entweder dazu, dass die bedienende Person durch den Maschineneinsatz entlastet wird, eine Überwachung aber trotzdem noch erforderlich ist oder dazu, dass die Notwendigkeit eines Bedieners überflüssig wird, indem die Maschine über eine funktionelle Selbstständigkeit und selbstregulierende Kontrollmechanismen verfügt.<sup>346</sup> Bei den meisten Automatisierungsmodellen handelt es sich um automatisierte Teilprozesse, wie „*die Sanierung der Fugen von gemauerten Abwassersielen und Spritzbetoneinsatz im Tunnelbau*“.<sup>347</sup> Bei der Betrachtung aktueller Forschungsprojekte und universitärer Forschungsstudien, lässt sich jedoch eine verstärkte Interessenverlagerung von der teilweisen Automatisierung zur Vollautomatisierung der Baustellenfertigung feststellen. Als repräsentative Beispiele

<sup>346</sup> Vgl. Laukemper, J.: „Automation im Mauerwerksbau. Voraussetzungen, Verfahren, Wirtschaftlichkeit“, Band 33, Expert Verlag, Ehningen bei Böblingen, 1992, S. 27.

<sup>347</sup> Ebd., S. 27.



11. Karosseriebearbeitung in der Automobilindustrie, Kuka-Industrieroboter  
12. Bearbeitung von Solarzellelement, Kuka-Industrieroboter

hierfür können die Unternehmungen von Prof. Behrokh Khoushnevis von der University of Southern Carolina<sup>348</sup>, dem Erfinder Enrico Dini<sup>349</sup> und der chinesischen Baufirma WinSun Decoration Design Engineering<sup>350</sup> aufgezählt werden.

Über einen langen Zeitraum hat die Automatisierung im Bauwesen die Prozesse der Vorfabrikation von Bauelementen betroffen, welche automatisch hergestellt werden, so dass die Automatisierung eher in der Fabrik anzufinden war, als auf der Baustelle.<sup>351</sup>

### **Japan und die Entwicklung der Industrieroboter im Bauwesen**

Bezüglich der Automatisierung der Baustelle und folglich auch der Bauindustrie, hat Japan eine Vorreiterrolle gespielt. Japan und seine Bauindustrie haben sich früh ausführlich mit dem Baustelleneinsatz von Robotern beschäftigt und maßgeblich zur Entwicklung dieses Forschungsgebiets beigetragen.<sup>352</sup> Daniel Ichbiah führt eine Reihe von Argumenten auf, welche die von Japan eingenommene Vorreiterrolle in der Robotik erklären. Zum einen lässt sich diese Evolution durch den kriegsverschuldeten Mangel an Arbeitskräften und zum anderen durch die kulturell geneigte Inakzeptanz gegenüber der Einführung fremder Arbeitskräfte erklären. Das Potenzial der Robotik wurde früh erkannt und führte bereits 1971 zur Gründung der Japanese Industrial Robot Association, während in den Vereinigten Staaten dieser Schritt erst 1974 mit der Gründung der Robotic Industries Association unternommen wurde.<sup>353</sup>

Aus der in Japan betriebenen Robotikforschung gingen eine Reihe von Baurobotersystemen hervor, die das Potenzial und die Vorteile solcher Systeme bereits frühzeitig aufzeichneten. In einem Bauforschungsbericht des Fraunhofer Instituts werden einige dieser Technologien ausführlich vorgestellt und beschrieben:

1. Die japanische Firma Takanaka beschäftigt sich seit 1979 mit der Entwicklung von Robotern für den Einsatz bei Betoniertätigkeiten. Zu den entwickelten Robotern lassen sich der Horizontal Concrete Distributor, der DB-Robo, beides Betonverteilerroboter und der Screed-Robo, zur Betonverdichtung und -nivellierung,

---

<sup>348</sup> Khoshnevis, B.: Automated Construction by Contour Crafting - Related Robotics and Information Technologies in Journal of Automation in Construction - Special Issue: The best of ISARC 2002, Vol. 13, Ausgabe 1, 2004, S. 5-19.

<sup>349</sup> Ceccanti, F., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V. und Pambaguian, L.: „3D Printing Technology for a Moon Outpost exploiting Lunar Soil“, 61. International Astronautical Congress, Prag, 2010, S.5 ff.

<sup>350</sup> <http://www.yhbm.com/index.php?siteid=3> (Stand 09.09.2013).

<sup>351</sup> Vgl. Bock, T., Prochiner, F.: „Automatisierungssysteme im Wohnungsbau“, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart, 1999, S. 14 f.

<sup>352</sup> Ebd., S. 15.

<sup>353</sup> Ichbiah, D.: „Robots. From Science to Technological Revolution“, Harry N. Abrahams Publishers, Geneva, 2005, S. 209.

aufzählen.<sup>354</sup> Andere japanische Firmen wie die Eroica Corporation mit dem Roboter Hazama und die Firma Shimizu mit dem Modell FLAT-KN bedienten ab der achtziger Jahren den Markt mit Betonglättrobotern.<sup>355</sup>

2. Andere Baufirmen beschäftigten sich mit der Entwicklung von Minikränen, welche die Montage von Fassadenelementen bei Hochhäusern übernehmen und somit die Arbeiter von einer Reihe gefährlicher Arbeitsschritte entlasten. Dazu zählen der Minikran Kajima von der Firma Komatsu oder der Minikran To-Auto-Fix, von der Firma Toda. Anders als die generelle Bezeichnung eines Minikrans andeuten mag, handelt es sich bei diesen Systemen nicht nur um simple Hebe- und Platzierungsmechanismen, sondern um komplexe Robotersysteme. Der To-Auto-Fix Minikran operiert wie folgt:

*„Das System setzt sich zusammen aus einer mobilen Plattform, Positionierungssensoren und einem Arm, der jegliche Art von Paneelen greifen und bewegen kann. Eine programmierbare Steuerung kontrolliert dabei die gesamten Bewegungsabläufe. Das System wird von nur einer Person bedient, spart Zeit und Kosten für Kran und Gerüst und ist relativ unabhängig von Wind und Wetter.“<sup>356</sup>*

Die aufgezählten Systeme decken die Fachbereiche des Beton- und Stahlbaus ab, was die oft hinterfragte Vielseitigkeit und Angemessenheit von Robotersystemen für die Bauindustrie begreiflich umreißt. Die Robotik wird aus der Fabrik auf die Baustelle verlagert. Zwar handelte es sich bei noch keinem dieser Systeme um eine Vollautomatisierung bzw. Vollrobotisierung der Baustelle, aber diese legten bereits zu dieser Zeit die Weichen für eine neue konzeptionelle Denkweise, bei der Maschinen das handwerkliche Bauen ablösen und somit neue Arbeits- und Fabrikationslogiken determinieren. Schon bald ging man in Japan zu diesem nächsten Schritt über und beschäftigte sich mit der Automation auf der gesamtübergreifenden Ebene der Baustelle, so dass 1993 Japan die ersten vollautomatisierten Hochbaustellen präsentieren konnte<sup>357</sup>:

1. Das Shimizu Manufacturing System by Advanced Robotics Technology (SMART-Systems) wurde von der Shimizu Corporation entwickelt und fand 1988 seine praktische Anwendung bei dem Bau der Juroko-Bank in Nagoya City, wobei der Bauprozess zusammenfassend wie folgt beschrieben werden kann:

*„Neun mit automatischen Kranwinden ausgestattete Roboter bringen die Stützen, Träger, Boden-, Decken-, Wand- oder Installationselemente in die jeweilige Etage des*

---

<sup>354</sup> Ebd., S. 127 ff.

<sup>355</sup> Ebd., S. 132 ff.

<sup>356</sup> Ichbiah, D.: „Robots. From Science to Technological Revolution“, Harry N. Abrahams Publishers, Geneva, 2005, S. 151.

<sup>357</sup> Ebd., S. 157.

*Stahlskelettgebäudes. Die anschließende Positionierung und Fixierung geschieht ebenfalls größtenteils automatisch. [...] Nach der Fertigstellung eines Stockwerkes wird das gesamte, auf den vier Säulen ruhende Tragwerk von 12 Hydraulikstempeln ein Stockwerk nach oben gedrückt.*<sup>358</sup>

Dieselbe Arbeitsabfolge wird anschließend zur Errichtung des nächsten Stockwerks eingesetzt. Erwähnenswert ist, dass das Robotersystem gemeinsam mit einem dafür angemessenen Bausystem, angepasst auf die jeweiligen Arbeitsschritte, entwickelt wurde.<sup>359</sup> Der Einsatz des SMART-Systems hat eine neue Etappe des Bauwesens eingeläutet, denn es ist das „weltweit erste automatisierte Konstruktionssystem, das bei einem Bauprojekt eingesetzt wurde“.<sup>360</sup>

2. Ein weiteres Robotersystem für die Hochbaustelle ist das der Obayashi Corporation entwickelte Automated Building Construction System (ABCS-System), das in seiner Vorgehensweise dem SMART-System ähnelt.

3. Das Big-Canopy System wurde ebenfalls von der Obayashi Corporation entwickelt und ab 1995 beim Bau des Yachiyo Apartmenthauses eingesetzt. Der Name bezieht sich auf die Konstruktionsebene, welche über der Baustelle wie eine große Segeltuchabdeckung schwebt und von einer, die Baustelle ummantelnden, Gerüstkonstruktion gehalten wird. Nach abgeschlossener Fertigstellung eines Stockwerkes, wird die Plattform entlang des Gerüsts hochgedrückt, so dass mit dem Bau des folgenden Stockwerkes fortgefahren werden kann.

4. Während bei den zuvor präsentierten Systemen die traditionelle Bauabfolge der Geschosse berücksichtigt wird, invertiert das Amurad System von der Firma Kajima die übliche Reihenfolge. Es wird mit dem Bau des letzten Stockwerkes begonnen, „dabei wird das komplette erste Geschoß, welches das Dachgeschoß ist, nach Fertigstellung mittels riesigen Hydraulikzylindern um ein Stockwerk nach oben gedrückt“.<sup>361</sup> Dieses Robotersystem besteht aus drei wesentlichen Systemteilen: das hydraulische Hochdrucksystem, Transport- und Montagesystem und letztlich dem Materialtransportsystem.<sup>362</sup>

---

<sup>358</sup> Ebd., S. 159.

<sup>359</sup> Ichbiah, D.: „Robots. From Science to Technological Revolution“, Harry N. Abrahams Publishers, Geneva, 2005, S. 158.

<sup>360</sup> Cousineau, L., Miura, N.: „Construction Robots. The Search for New Building Technology in Japan“, ASCE Press, 1998, S.52.

<sup>361</sup> Bock, T., Prochiner, F.: „Automatisierungssysteme im Wohnungsbau“, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart, 1999, S. 165.

<sup>362</sup> Ebd., S. 165.

## 6. Schlussfolgerungen

Bei den hier präsentierten Systemen handelt es sich um frühe Versuche der Baustellenvollautomatisierung und sie basieren hauptsächlich auf dem Einsatz vorfabrizierter Bauteile, welche robotisch platziert und montiert werden. Die Vorortfabrikation, wie das Betongießen, stellt eher eine Ausnahme dar. In ihrer Mehrheit agieren die beschriebenen Robotersysteme, die als repräsentative Beispiele dienen sollen, als Hilfsmechanismen beim Bauen. Sie werden weder direkt vom Architekten informiert noch direkt von ihm gesteuert. Es ist richtig sie als bautechnische Innovationen einzustufen, jedoch verändern sie nicht die Beziehung des Architekten zu den Prozessen des Entwurfs und der Fabrikation oder zu den dahinter liegenden Logiken in dem Ausmaß, in welchem es die Maschinen der Industrialisierung zu tun vermochten. Diese Systeme determinieren keine Veränderungen auf der Ebene der Gestaltung und können somit als reine Werkzeuge der Fertigung betrachtet werden, welche einen beachtlichen Schritt in der Automatisierung der Architektur darstellen. Des Weiteren sollte festgehalten werden, dass die Entwicklung einer Fabrikationstechnologie eine eventuelle parallele Entwicklung eines Bausystems generieren kann, wie der Fall des SMART-Systems veranschaulicht. Die Entscheidung für die Anwendung eines spezifischen Bausystems hat Auswirkungen auf der entwerferischen Ebene, auch wenn nur durch die Berücksichtigung fester typisierter Größen oder eines Modulrasters, ähnlich wie im untersuchten Fallbeispiel des Kristallpalasts von Joseph Paxton.

Zwar bleibt die Entwurfsebene vom Einfluss genannter Robotersysteme zunächst unberührt, Bauausführung und Baulogistik werden jedoch signifikant beeinflusst und modifiziert. Die Entwicklung dieser Robotersysteme geht nicht vom Entwerfer oder Architekten aus, sondern von Bauunternehmen. Dabei stehen der Kreislauf der Fabrikation und die dazugehörigen Prozessphasen im Mittelpunkt der Betrachtung. Die Robotersysteme werden als Substitute der humanen Komponente auf der Baustelle entwickelt, mit dem primären Ziel der Effizienzsteigerung und Optimierung der Bauabläufe. Durch den robotischen Einsatz ändert sich nichts an der Positionierung des Architekten in den Phasen des Entwurfs oder der Fabrikation oder in Bezug auf andere Projektbeteiligte. Weder seine Entscheidungsbefugnis betreffend Fertigungsprozesse noch sein Einflussfeld erweitern sich. Bei den vorgestellten Robotern und Robotersystemen handelt es sich um reine Werkzeuge der Baustellenfabrikation und -montage. Fertigung und Montage werden nur automatisiert. Es kommen bekannte Baumaterialien zum Einsatz, die Entwicklung dieser Systeme ist von der Baumaterialentwicklung und -forschung entkoppelt.

Anders als im Fall der Industriellen Revolution und den daraus hervorgegangenen Maschinen und Verfahren, tritt weder die konstruktive Natur der Architektur zum Vorschein, noch werden neuartige Logiken im Entwurfs- oder Fertigungsbereich determiniert. Diese Projekte repräsentieren die Anfänge der Robotik im Bauwesen und stellen daher Implementierungen einer zunächst fachfremden Technik in den architektonischen Bereich dar. Sie sind als Wegbereiter für die Auseinandersetzung mit der Robotik im Bereich der Architektur zu verstehen und von großer Bedeutung,

wenn es um die Beleuchtung der Automatisierung der Baustelle geht. Ausgehend von diesen frühen Implementierungen entwickelte sich ein verstärktes Interesse der Entwerfer für die Robotik und ein vertieftes Befassen mit dieser Thematik, welche dazu führten, dass in der aktuellen wissenschaftlichen Architekturdebatte die Thematik der Robotik von zentraler Rolle ist.

## VI. Theoretische Ansätze zur Architekturrobotik

### 1. Gramazio und Kohler

Die Entwicklung der Gesellschaftsformen mit ihren komplexen Auswirkungen spiegelt sich in allen Lebensbereichen wieder, so dass auch die Ausprägung der Architektur von diesen, in ihrer Ganzheit nur schwer fassbaren, Vorgängen beeinflusst wird. Von der Epoche der Renaissance, über das Zeitalter der Industrialisierung bis hin zum Informationszeitalter, üben die Implikationen des technischen Fortschritts, ideologischer Neupositionierungen und gesellschaftlicher Neustrukturierung einen transformativen Effekt auch auf die Architektur aus. Die gebündelte Zusammenfassung von Nicholas Negroponte dieser evolutionären Schritte offeriert einen Überblick der bislang analysierten Etappen und lässt Parallelitäten zur Entwicklung im Bereich der Architektur erkennen:

*„Das Industriezeitalter, überwiegend ein Zeitalter der Atome, gab uns das Konzept der Massenproduktion, mit Wirtschaftssystemen, die der Fertigung mit uniformen und repetitiven Methoden an jedem Standort und zu jeder Zeit entstammen. Das Informationszeitalter, das Zeitalter der Computer, zeigte uns dieselben Vorteile der Massenproduktion, aber mit weniger Rücksicht auf Raum und Zeit. [...] In dem Informationszeitalter wurde die Mass Media zur selben Zeit immer größer und kleiner. [...] Im Post-Informationszeitalter treffen wir oft ein Ein-Personen-Publikum an. Alles wird nach Mass [sic!] gemacht und Information ist extrem personalisiert.“<sup>363</sup>*

Der Vergleich mag zunächst als forciert erscheinen, jedoch lässt sich die Parallelität zwischen der generell gültigen Beobachtung und dem heutigen Zustand der Disziplin nicht ignorieren. Übertragen wir die Idee der „Einzelfertigung“ der Information auf die Entwurfs- und Fabrikationsprozesse sowie auf die Fertigungswerkzeuge. Auf diese Art und Weise nähert man sich auf einer theoretischen Ebene dem Ansatz der Robotisierung von Fabrikationsprozessen an. Parametrische Software-Plugins, wie Grasshopper, erlauben es dem Entwerfer eigene Entwurfs- oder Analysewerkzeuge zusammenzustellen, so dass *„der Designer zu einem Werkzeugentwickler wird“*.<sup>364</sup> Im Rahmen dieser Digitalisierung ist dasselbe auch möglich, wenn man von der Entwurfsebene zu der Stufe der Fabrikation avanciert. Die Digitalisierung bietet die Möglichkeit die Grenzen der Softwareentwicklung zu überschreiten und zum Entwickeln und Entwerfen von Fabrikationsinstrumenten überzugehen. Im Fall der Software entwickelt der Architekt im Regelfall kein eigenständiges Softwareprogramm, sondern Skripte. Diese sind für den spezifischen Gebrauch des

---

<sup>363</sup> Negroponte, N.: „Being Digital“, Vintage Books, New York, 1996, S. 163 ff.

<sup>364</sup> Vgl. Scheurer, F.: „Digital Craftsmanship: From Thinking to Modeling to Building“, S. 114 In: Marble, S. (Hrsg.): „Digital Workflows in Architecture. Designing Design - Designing Assembly - Designing Industry“, Birkhäuser, Basel, 2012.

Architekten angepasste Softwarekomponenten, die die Funktionen der bestehenden Software ergänzen. Dieselbe Analogie funktioniert auch im Fall physischer Werkzeuge, wenn man Industrieroboter betrachtet. Es ist natürlich nicht notwendig, den Roboter von Grund auf neu zu erfinden, sondern man kann neue Arten von Effektoren, die Ausführungswerkzeuge per se, zusammen mit einer spezifischen Fertigungsstrategie entwickeln. Wenn die Baustrategie komplexere Ansprüche stellt, besteht die Option eigene Robotersysteme zu entwickeln, von der physischen Ausprägung der Roboter bis hin zu neuen Techniksystemen. Diese Aktivitäten sind kollaborativer Natur, beruhen auf dem Involvieren diverser Spezialisten, wobei in einer ersten Phase der Architekt zur technischen Durchführung auf bestehendes Wissen über Open Source Plattformen zurückgreifen kann.

Die Professoren Fabio Gramazio und Matthias Kohler, als Leiter des Fachbereichs Architektur und Digitale Fabrikation am Institut für Technologie in der Architektur an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, machen genau von diesen neuen Möglichkeiten Gebrauch. Zu den Hauptschwerpunkten des Fachbereichs gehört die additive, Roboter unterstützte Fabrikationsmethodik. Im Rahmen des weltweit ersten Robotiklabors für Architektur, dem Robotic Fabrication Laboratory, entstand eine Vielzahl von Projekten, bei denen Industrieroboter eingesetzt werden, welche mit spezifischen, maßgefertigten Effektoren ausgestattet werden. Die gesammelten Erfahrungen, welche sich aus dem Umgang mit Robotern im Feld der Architektur ergeben, werden von den Professoren in einer Reihe von Schriften beschrieben und theoretisiert. Beleuchtet wird dabei die Relation zwischen Material, Maschine, Benutzer und zugleich das Verhältnis des Architekten zu seinen Werkzeugen. Als Betrachtungsrahmen und Bezugssystem für diese Reflexionen dient die fortschreitende Digitalisierung der Disziplin in den Bereichen des Entwurfs und der Fabrikation. Kennzeichnend für die Projekte des Lehrstuhls sind das Benutzen von Roboterarmen, so dass sich die verschiedenen Forschungsvorhaben um die zentrale Leitidee von „*Roboter unterstützten Prozessen der Materialisierung*“ anordnen.<sup>365</sup>

Um in der weiterführenden Argumentation Missverständnisse auf der Ebene der Semantik zu umgehen, muss nachdrücklich die Bedeutung der Digitalisierung der Architekturprozesse im Kontext der vorliegenden Arbeit erklärt werden. Unter dem Digitalen oder der Digitalisierung der Architektur wird nicht nur das reine Ersetzen analoger Werkzeuge, wie das Zeichenbrett, durch ein digitales Äquivalent verstanden. Das Digitale bezieht sich in diesem Zusammenhang summarisch auf das computer-aided design (CAD), zu Deutsch das computerunterstützte Entwerfen, und das computer-aided manufacturing (CAM), zu Deutsch die computerunterstützte Fertigung. Entwurf und Fertigung werden mittels des Digitalen zu einem

---

<sup>365</sup> Gramazio, F; Kohler, M., Willmann, J.: „The Robotic Touch: How Robots Change Architecture“, Park Books, Zürich, 2014, S. 105.

### **Einfluss des Digitalen auf das Materielle**

In ihrem herausgebrachten Buch „*Digital Materiality in Architecture*“ werden die aus der Digitalisierung resultierenden Implikationen vor allem auf der Ebene der Fabrikation thematisiert. Es wird argumentiert, dass die digitale Verarbeitung des Materials in einer neuen Art von Materialität resultiert, der digitalen Materialität. Das theoretische Konstrukt der digitalen Materialität wird folgendermassen erklärt:

*„Digitale Materialität entwickelt sich aus dem Zusammenspiel zwischen digitalen und materiellen Prozessen im Entwurf und der Fabrikation. Die Synthese zweier augenscheinlich unterschiedlicher Welten - das Digitale und das Materielle - generiert neue, naheliegende Realitäten. Daten und Material, Programmieren und Konstruktion sind miteinander verwoben. Diese Synthese wird durch die Techniken der digitalen Fabrikation ermöglicht, welche es dem Architekten erlaubt die Fertigungsprozesse über die Entwurfsdaten zu kontrollieren. Material wird somit durch Information bereichert; das Material wird ‚informiert‘.“<sup>366</sup>*

Die Digitalisierung der Fabrikationsprozesse greift, durch die direkte Bearbeitung, auf das Material über. Somit beschreibt die digitale Materialität das Materielle, welches von den Regeln der digitalen Logiken maßgeblich beeinflusst wird.<sup>367</sup> Das Vierergespann aus Material, Daten, Programmieren und Konstruktion bildet ein Netz aus Verknüpfungen, welche in Abhängigkeit zueinander stehen und sich gegenseitig definieren. Die separate Betrachtung eines einzelnen Parameters wirkt sich nicht zielführend aus, ignoriert man den Gesamtkontext. Die Weitergabe der Konstruktionsinformation findet mittels des Codes statt. Der Code beinhaltet sowohl Entwurfs- als auch Konstruktionsinformation, wobei beides nicht mehr von einander trennbar ist:

*„Die digitale Materialität ergibt sich aus der Integrierung der Konstruktion und des Programmierens in den Entwurfsprozess.“*

Manchmal wird beim vergleichenden Betrachten von Entwurfsidee und Gebautem der Eindruck erweckt, dass „*Material als ein Kompromittieren der Form*“<sup>368</sup> vom Architekten verstanden wird. Als so groß erweisen sich die Abweichungen zwischen beiden. Die Überschneidungsmenge zwischen der planerisch festgehaltenen Form und der Materialwerdung ist so klein, dass man meinen könnte, der Entwurf sei an den Limitierungen des Materials und seiner Verarbeitung gescheitert.

---

<sup>366</sup> Gramazio, M., Kohler, M.: „*Digital Materiality in Architecture*“, Lars Müller, Baden, 2008, S. 7.

<sup>367</sup> Ebd., S. 7

<sup>368</sup> Emmons, P.: „*Architectural Encounters between Material and Idea*“, S. 89 In: Mindrup, M. (Hrsg.): „*The Material Imagination. Reveries on Architecture and Matter*“, Ashgate Publishing Limited, Farnham, 2015.

### **Der Industrieroboter - Bindeglied zwischen Entwurf und Fabrikation**

Gramazio und Kohler verweisen darauf, dass unter dem Benutzen des Industrieroboters in der Architektur nicht das Phänomen der reinen Automatisierung des Bauwesens und der daraus resultierenden Vorteile auf der Ebene der Prozessoptimierung und -effizientisierung verstanden wird.<sup>369</sup> Der Industrieroboter wird als ein „*essentielles generisches Produktionswerkzeug*“<sup>370</sup> betrachtet. Dieser wird als ein aktives Entwurfsinstrument eingestuft, dessen Potenzial für den Entwerfer mittels des Programmierens aktiviert werden kann.

Gramazio und Kohler verweisen auf den wesentlichen Vorteil, der sich aus dem Benutzen von Industrierobotern in der Architekturpraxis ergibt, ihrer spezifischen Anwendbarkeit<sup>371</sup>. Anders als beim Industriedesign und der seriellen Güterproduktion, von kleinformatigen Alltagsobjekten bis hin zum Auto oder Flugzeug, besteht die Aufgabe des Architekten in dem Entwerfen spezifischer Strukturen, die auf die Eigenheiten ihrer Umgebung und ihre innere Funktionalität reagieren. Somit verlangt das Unikat, im Sinne der Architektur, nach einem anderen Kontext der Fabrikation als die Serie. Der Industrieroboter wird als ein Instrument der Fabrikation interpretiert, das genau den jeweiligen spezifischen Anforderungen des Entwurfs entsprechen kann. Durch den hohen Grad der Anpassungsfähigkeit reagiert dieser auf die spezifischen Anforderungen der Architektur bzw. des Entwurfs.

Die sinnvolle Nutzung des Roboters ergibt sich aus einem intelligenten Implementieren der Technologie. Es ist nicht zielführend das Manuelle durch das Maschinelle oder das Maschinelle durch den Roboter zu ersetzen, wenn keine Steigerung der Fertigungs- oder Entwurfsqualitäten erzielt werden kann. Dem Gedanken der Technikexuberanz wird widersprochen und entgegengewirkt, wenn darauf verwiesen wird, dass Funktion und Anwendung des Roboters der Architektur unterzuordnen sind.<sup>372</sup>

Es geht nicht um das Weiterentwickeln der Technik per se, also der Ausbildung zum Maschinenbauer. Gramazio und Kohler distanzieren sich von der Idee des Entwerfers oder Architekten als an der Entwicklung von Maschinen beteiligte Akteure, wenn sie sich äußern dass „*nicht die technische Entwicklung des Roboters als solcher*“<sup>373</sup> verfolgt wird. Das Aneignen der Fähigkeiten, die zum Bedienen und Manipulieren des Roboters notwendig sind, stehen im Fokus, nicht die Aktivität des Maschinenbaus selber. Man beschränkt sich auf die Manipulation von Industrierobotern durch den Architekten.

---

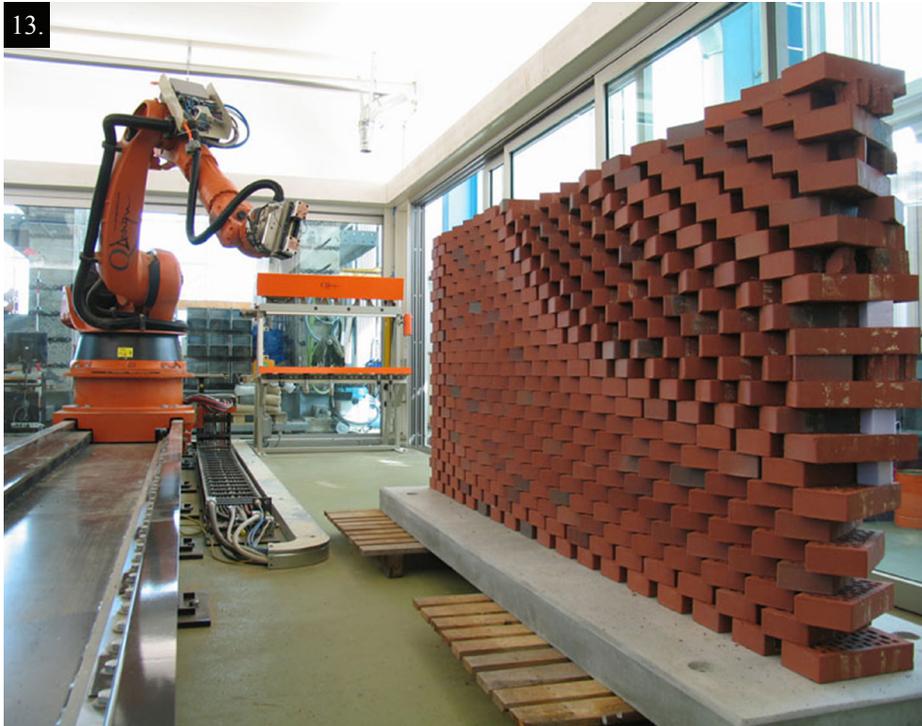
<sup>369</sup> Vgl. Gramazio, F; Kohler, M., Willmann, J.: „The Robotic Touch: How Robots Change Architecture“, Park Books, Zürich, 2014, S. 104.

<sup>370</sup> Ebd., S. 105.

<sup>371</sup> Ebd., S. 105.

<sup>372</sup> Ebd., S. 105.

<sup>373</sup> Ebd., S. 104.



13. Gesamtstruktur, Die programmierte Wand, ETH Zürich, 2006

14. Roboter mit Endeffektor, Die programmierte Wand, ETH Zürich, 2006

### Implikationen des Programmierens

Im Kontext digital gesteuerter Fabrikationsprozesse, „*wird die Baubarkeit eines Gebäudedesigns zu einer direkten Funktion seiner Berechenbarkeit*“.<sup>374</sup> Wenn also Form und Fabrikationsschritte in Codeform übersetzt werden können, kann die Realisierbarkeit des Entwurfs garantiert werden. Daraus lässt sich die Signifikanz des Programmierens für die zukünftige Weiterentwicklung der Disziplin ableiten. Der Einsatz von Codes bringt den relevanten Vorteil der Absenz von Ambiguität mit sich, da es sich dabei um „*eine formale, nicht-ambigue Sprache*“<sup>375</sup> handelt. Anders als beim Lesen von Plänen ist das Auftauchen von Interpretationsfehlern ausgeschlossen. Es darf nicht der Fehler gemacht werden zu denken, dass es sich hierbei um ein Ersetzen der menschlichen Komponente und ihrer Intelligenz durch das Digitale und den Roboter handelt, „*denn obwohl Computer manche der schwierigsten und anstrengendsten Operationen des abstrakten Denkens mit unglaublicher Schnelligkeit vollziehen, führen sie nur automatisch Instruktionen aus, die ihnen von einem denkenden Gehirn erteilt werden.*“<sup>376</sup> Die Art und Weise wie der Roboter agiert, hängt ganz von der Art der Instruktionen ab, die vom Entwerfer vorgegeben werden. Durch das Benutzen digitaler Werkzeuge wird eine Verfeinerung, Steigerung und Optimierung bestehender menschlicher Kompetenzen verfolgt.<sup>377</sup> Beide Autoren argumentieren nicht für das Ersetzen des Architekten als Entwerfer durch das Digitale, also durch den Computer und das damit verbundene Programmieren, oder für dessen Überfluss, sondern für das Einsetzen computerisierter Technik als ein bedeutendes und äußerst leistungsfähiges Entwurfsinstrument.<sup>378</sup> Dabei wird dem Programmieren innerhalb dieser Entwicklungen, somit auch dessen Aneignung als Fähigkeit des Entwerfers, eine essentielle Rolle zugeschrieben. Programmieren, hier als Substantivierung des gleichnamigen Verbes eingesetzt, wird wie folgt definiert: „*ein Programm für einen Computer, eine computergesteuerte Anlage o. Ä. aufstellen; einem Computer Instruktionen eingeben.*“<sup>379</sup> Folglich ermöglicht das Beherrschen des Programmierens dem Architekten die operationale Vorgehensweise des Roboters gemäss eigener Bedürfnisse zu manipulieren. Dies hat eine Erweiterung des Aufgaben- und auch Einflussbereichs des Architekten zur Konsequenz. Gramazio und

<sup>374</sup> Kolarevic, B.: „Digital Production“, S. 33 In: In: Kolarevic, B. (Hrsg.): „Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing“, Taylor and Francis, New York, 2009.

<sup>375</sup> Scheurer, F.: „Digital Craftsmanship: From Thinking to Modeling to Building“, S. 111 In: Marble, S. (Hrsg.): „Digital Workflows in Architecture. Designing Design - Designing Assembly - Designing Industry“, Birkhäuser, Basel, 2012.

<sup>376</sup> Mumford, L.: „Mythos der Maschine. Kultur, Technik und Macht. Die umfassende Darstellung der Entdeckung und Entwicklung der Technik“, Fischer Taschenbuch Verlag, Wien, 1977, S. 550.

<sup>377</sup> Scheurer, F.: „Digital Craftsmanship: From Thinking to Modeling to Building“, S. 118 In: Marble, S. (Hrsg.): „Digital Workflows in Architecture. Designing Design - Designing Assembly - Designing Industry“, Birkhäuser, Basel, 2012.

<sup>378</sup> Gramazio, M., Kohler, M.: „Digital Materiality in Architecture“, Lars Müller, Baden, 2008, S. 8.

<sup>379</sup> Duden Wörterbuch, <http://www.duden.de/node/773456/revisions/1370933/view> (Stand 06.02.2015).

Kohler verdeutlichen das Ausmaß dieser Veränderung: „*Von jetzt an, entwerfen wir nicht mehr Formen, welche schließlich produziert werden sollen, sondern den Produktionsprozess selber.*“<sup>380</sup> Dies wird durch das Erteilen von Instruktionen, also dem Verfassen von Anweisungen zum Operieren von Industrierobotern, ermöglicht. Der Internationale Verband der Robotik, welches den englischen Namen International Federation of Robotics (IFR) trägt, beruft sich auf die ISO-Norm 8373, und definiert wie folgt einen Industrieroboter:

„*Ein automatisch kontrollierter, reprogrammierbarer Mehrzweckmanipulator, programmierbar in drei oder mehreren Axen, welcher entweder feststehend oder mobil für eine industrielle Automatisierungsanwendung benutzt werden kann.*“<sup>381</sup>

Die Option des wiederholten Reprogrammiers der Maschine und ihrer Kontrolle durch den Architekten bietet die Möglichkeit der unkomplizierten Generierung von spezifischen Produktionsprozessen. Der Entwerfer wird nicht mehr durch mögliche maschinelle Einschränkungen eingegrenzt, sondern kann Entwurf, Material und Maschine aufeinander abstimmen, gemäß für ihn relevanter, Kontext bezogener Kriterien. Dies führt zu einer „*Liberalisierung von allgemein geltenden Strukturen der digitalen Produktion in der Architektur.*“<sup>382</sup>

Möglicherweise erscheint auf den ersten Blick die Assoziierung des Programmierens mit dem Bauen als ein abstraktes Konstrukt. Auf der Ebene der operationalen Logiken, die beiden zugrunde liegen, besteht jedoch eine Parallelität. Als ein entscheidender gemeinsamer Nenner zwischen der Fabrikation und der Computerprogrammierung wird die Sequentialität genannt: der Bauprozess stellt eine Reihe von aufeinander folgenden Bausequenzen dar, so wie auch ein Computerprogramm auf dem Ausführen von sequentiellen Rechenschritten basiert.<sup>383</sup> Vereinfacht kann dies wie folgt formuliert werden: Bauprozesse und Computerprogramme verfolgen beide dieselbe Vorgehenslogik konsekutiver Sequenzen. Eines der wichtigsten Potenziale, das sich durch Computerprogrammieren eröffnet, liegt in der Beseitigung des Vorgegebenen. Voreinstellungen sowohl im Bereich des Entwurfs als auch der Fabrikation können erweitert werden. In ihren Entwurfsoptionen vordefinierte Software-Pakete können nach den Anforderungen des Benutzers ergänzt werden, während Fabrikationsprozesse neu konzipiert werden können.<sup>384</sup> Die Tätigkeit des Programmierens entspricht in diesem Kontext „*dem*

---

<sup>380</sup> Gramazio, M., Kohler, M.: „Digital Materiality in Architecture“, Lars Müller, Baden, 2008, S. 8.

<sup>381</sup> International Federation of Robotics, ISO 8373, abrufbar unter: <http://www.ifr.org/industrial-robots/> (Stand 06.01.2015).

<sup>382</sup> Gramazio, M., Kohler, M.: „Digital Materiality in Architecture“, Lars Müller, Baden, 2008, S. 8.

<sup>383</sup> Ebd., S.8.

<sup>384</sup> Ebd. S.8.

*Niederschreiben einer architektonischen Logik*“.<sup>385</sup> Diese Logik beinhaltet Informationen, welche simultan Entwurf und Fabrikation beschreiben und zugleich die materielle Erscheinung beeinflussen. Unter Berücksichtigung dieser genannten Aspekte, der intensiven Auseinandersetzung mit dem Material, der Fabrikationsprozesse und der Maschine bzw. des Roboters, sprechen Gramazio und Kohler von einem digitalen Handwerk.<sup>386</sup> Die Logik des handwerklichen Arbeitens wird mittels des Digitalen auf den Roboter übertragen. Angesichts der digitalen Berufspraxis und der CAD-CAM-Schnittstellen wird von einem Informationskontinuum gesprochen, das oft idealisiert wird, da das Übertragen analoger Prozesse oft mit den technischen Grenzen von Soft- und Hardware konfrontiert wird und so die direkte Weitergabe von Daten erschwert bzw. unterbricht.<sup>387</sup> Bei dem Einsatz robotischer Industriearme liegt aber tatsächlich ein kontinuierlicher Datenkreislauf vor. Die Kontinuität ist durch die direkte Bedienung des Roboters durch den Architekten gegeben bzw. durch das Zuspielen der Daten, die Arbeitsschritte und -methodik vorgeben.

### **Eine neue Ästhetik**

Abgesehen von der Thematisierung der Rolle des Roboters und des Digitalen, werden bei Gramazio und Kohler auch Aspekte betreffend einer neuen Art von Ästhetik adressiert. Bedingt durch den Einsatz des Roboters und der durch ihn möglichen Bewegungsabläufe, kann mit Material in neuen, erweiterten Formen umgegangen werden. Die Anwendung neuer Technologien ermöglicht somit das Erschließen neuer Formen der Ästhetik und führt zu einer „veränderten *Physis der Architektur*“.<sup>388</sup> Das Phänomen der aus der Technologie resultierenden Ästhetik ist bekannt in der Architekturgeschichte und lässt sich anhand vieler Beispiele belegen. Eines der renommiertesten Belege hierfür ist der Crystal Palace, wie bereits im Kapitel „Industrialisierung“ beschrieben. Der Kristallpalast, ein für seine Zeit revolutionärer Stahl- und Glasbau, veranschaulichte in baulicher Form die Möglichkeiten, die sich für die Bauindustrie aus der rasanten Technologieentwicklung der Industrialisierung ergaben: „*Das Gebäude verkörperte eine Ästhetik, die erst durch die Maschine möglich geworden war; eine Ästhetik reiner Transparenz, welche die visuelle Trennung zwischen Innen und Außen aufhob.*“<sup>389</sup>

Als signifikante Beispiele für die Veranschaulichung einer solchen veränderten architektonischen Physis durch den Einsatz eines Industrieroboters nennen Gramazio

<sup>385</sup> Gramazio, M., Kohler, M.: „Digital Materiality in Architecture“, Lars Müller, Baden, 2008, S.8.

<sup>386</sup> Ebd. S. 8.

<sup>387</sup> Vgl. Scheurer, F.: „Digital Craftsmanship: From Thinking to Modeling to Building“, S. 111 In: Marble, S. (Hrsg.): „Digital Workflows in Architecture. Designing Design - Designing Assembly - Designing Industry“, Birkhäuser, Basel, 2012.

<sup>388</sup> Gramazio, M., Kohler, M.: „Digital Materiality in Architecture“, Lars Müller, Baden, 2008, S. 11.

<sup>389</sup> Sennett, R.: „Handwerk“, Berlin Verlag, Berlin, 2008, S. 153.

Und Kohler die, während des Forschungsprojekts „*The Programmed Wall*“ generierten, Strukturen. Bei dieser Projektreihe wurden Ziegel als Baumaterial zur Errichtung variierender Wandelemente eingesetzt. Die Platzierung der einzelnen Ziegel folgt einer algorithmisch vorgegebenen Logik, bei der die Position und Lage der Ziegel zueinander kontinuierlich variiert.<sup>390</sup> Eine solche Anordnung wäre natürlich auch manuell erzielbar, nur würde dies einen enormen Aufwand bezüglich Zeit und Arbeitskräfte voraussetzen, der in keiner Weise zu legitimieren wäre. Der betriebene Aufwand würde in keiner Relation zum gewonnenen Nutzen stehen.

Wie im Vorfeld öfters bemerkt wird in der vorliegenden Arbeit die Thematik einer resultierenden Ästhetik oder sogar eines neuen Baustils umgangen, da die Meinung vertreten wird, dass mithilfe neuer Fertigungsverfahren durchaus neue Arten der Ästhetik generiert werden können, wobei die Betonung auf „Mithilfe“ gelegt wird. Die Thematik der Ästhetik in der Architektur verfügt über eine vielfältige Komplexität, welche sich nicht auf die Mittel der technischen Fabrikation reduzieren lässt. Dennoch wird der von Gramazio und Kohler vertretene Standpunkt mit in den Diskurs eingebunden, da die Ansicht vertreten wird, dass der Anspruch einer neuen Ästhetik bzw. Physis der Architektur übertrieben ist, es jedoch berechtigt ist von einer neuen Art der Materialität zu sprechen.<sup>391</sup> In diesem Zusammenhang wird das Verständnis des Begriffs der Materialität an die Textur und die Ausprägung der Materialoberfläche gebunden. Durch den robotischen Einsatz können neue physische Erscheinungsbilder von Materialoberflächen oder von gesamten Strukturen erreicht werden, diese unterscheiden sich grundsätzlich nur in dem Grad der erreichten Präzision und Feinarbeit von den gewohnten Erscheinungsbildern. Diese Aussage lässt sich ebenfalls am Beispiel des erwähnten „*Programmed Wall*“-Projekts erläutern. Die differenzierte Verteilung der einzelnen Ziegel wird durch den Einsatz des Roboters als ausführende Kraft ermöglicht und lässt sich durch eine hohe Präzision und Feinarbeit charakterisieren, wodurch eine kontrollierte Platzierung gemäss algorithmischer Vorgaben möglich ist. Dabei handelt es sich um eine neue Art der Kontrolle über die Platzierungspräzision, so dass von einer neuen Art der Materialoberfläche oder Materialität geredet werden kann. Diese Kontrolle und Präzision, betreffend die individuelle Position der einzelnen Ziegel, wären durch das Manuelle nur schwer erzielbar. Ebenso kann der Anspruch auf eine neue Art der Verteilungsstrategie von Bauelementen erhoben werden. Ästhetik nähert sich in seinem Verständnis dem Begriff des Stils und verlangt nach einer umfassenderen argumentativen Palette - ein Thema, das in sich nach einer eigenen separaten Analyse und Diskurs verlangen würde.

---

<sup>390</sup> Gramazio, M., Kohler, M.: „Digital Materiality in Architecture“, Lars Müller, Baden, 2008, S. 61 ff.

<sup>391</sup> Gramazio, M., Kohler, M.: „Digital Materiality in Architecture“, Lars Müller, Baden, 2008, S. 7 ff.



15. Robotic Clay Molding - Detail, Gramazio Kohler Research, Barcelona, 2012  
16. Robotic Clay Molding, Gramazio Kohler Research, Barcelona, 2012

## 2. Zusammenfassende Betrachtungen

Gramazio und Kohler theoretisieren die Auswirkungen, welche durch den Einsatz des Digitalen, des Computerprogrammierens und des Roboters hervorgerufen werden. Der Betrachtungsfokus wird dabei auf das Programmieren und den Roboter gelegt. Die Dynamik der Wechselwirkungen zwischen Entwurf, Material, Roboter, Fabrikation und dem Architekten werden im Kontext der Digitalisierung der Disziplin beleuchtet. Zusammenfassend lassen sich folgende wesentliche Aussagen treffen:

1. Die Rolle des Programmierens bei der Manipulation des Roboters bzw. der Maschine und die Einflussnahme auf das Material und die Gestaltung von Fabrikationsprozessen wird veranschaulicht. Die grundsätzliche Veränderung der Arbeitsmethodik des Entwerfers wird dadurch verändert. Das Programmieren wird als Ausgangspunkt und Katalysator dieser Veränderungen präsentiert.
2. Das Programmieren befähigt den Entwerfer zum eigenständigen Verfassen von Instruktionen, wodurch er Fabrikationsprozesse definieren, neu auslegen und kontrollieren kann.
3. Das Umgehen des Vorgegebenen. Die Präkonditionierung durch vorgegeben Bedingungen bei den digitalen Entwurfs- und Fabrikationswerkzeugen kann durch Computerprogrammieren annulliert werden.
4. Die kumulierten Kenntnisse aus den Bereichen des Maschinenbaus, des Programmierens, der Materialforschung und Prozessorganisation führen zu einer Liberalisierung des Architekten von den Zwängen der Produktion.
5. Der Roboter bietet einen geschlossenen Informationskreislauf für die Daten des Entwurfs, des Materials, der Maschine und der Fertigung. Diese Art von Informations- und Fertigungsmodell ähnelt dem Modell der digitalen Fabrik und verfolgt ähnlich wie diese eine prinzipiell allumfassende Verlinkung der einzelnen Parameter des Entwurfs und der Fabrikation untereinander:

*„In einer digitalen Fabrik werden die Produkte, Prozesse und die geplante Produktion in Modellen abgebildet, um basierend auf virtuellen Produkten und Prozessen die geplante Produktion am Computer zu verbessern. Damit soll ein weitgehend optimierter und fehlerfreier Prozess erstellt werden, um diesen dann in der realen Fabrik umsetzen zu können. Die Produktionsplanung beinhaltet dabei sowohl die Planung der Produktionssysteme, als auch die Planung der Produktions- und Logistikprozesse. [...] In Branchen wie der Automobil- und Flugzeugindustrie gewinnt die digitale Fabrik zunehmend an Bedeutung. Ziel ist es, durch Integration verschiedener CAx<sup>392</sup>-Systeme, auf Basis klar beschriebener Prozesse und unter*

---

<sup>392</sup> CAx ist die Abkürzung für „computer aided“ also computerunterstützt. Das „x“ steht als Platzhalter zur Benennung unterschiedlichster computerunterstützter Prozesse.

*Nutzung einer verlinkten Datenbasis eine durchgängige Prozesskette von der  
Produktplanung bis zur Produktion zu schaffen.*<sup>393</sup>

---

<sup>393</sup> Hehenberger, P.: „Computerunterstützte Fertigung. Eine kompakte Einführung“, Springer Verlag Berlin-Heidelberg, 2011, S.189.

## VII. Fallstudie: Minibuilders

### 1. Forschungsrahmen

Das im folgenden beschriebene Projekt, welches den Namen *Minibuilders* trägt, entstand innerhalb des Open Thesis Fabrication Programms 2013/2014 am *Institute for advanced architecture of Catalonia* aus Barcelona. Das Team, welches das Projekt bearbeitet hat, war aus 6 Forschern zusammengesetzt, allesamt aus dem Bereich der Architektur stammend. Die präsentierte Fallstudie dient hier zur Veranschaulichung der Auswirkungen eines veränderten methodologischen Ansatzes in der Auseinandersetzung des Architekten mit der verwendeten Technik und der Ausarbeitung einer Fabrikationsstrategie aus der Position des Maschinenentwicklers. Es muss darauf hingewiesen werden, dass das beschriebene Forschungsprojekt experimenteller Natur ist und keinesfalls eine abgeschlossene, marktfähige Technologie verkörpert. Das Projekt dient als Grundlage zur Theoretisierung des Konzepts der Maschinenhandwerklichkeit bzw. Machinecraft. Es geht darum zu illustrieren wie aus der Beschäftigung mit Aspekten des Maschinenbaus neue Arten von robotischen Fabrikationsstrategien entstehen können, die sich an konkreten Fabrikationsansprüchen und -problemen orientieren. Zudem wird anhand dieses Beispiels aufgezeigt, wie sich die digitale Handwerklichkeit auf der Seite des Architekten entfaltet und welcher Mehrwert daraus resultieren kann. Der Schwerpunkt der Betrachtungen wird vor allem auf die Methodik in der Vorgehensweise gelegt und den daraus hervorgehenden Auswirkungen. Die Analyse zielt auf die gesamtheitlichen Konsequenzen für die zukünftige Berufsausbildung von Entwerfern oder Architekten ab. Aus diesen Gründen befinden sich Arbeitsprozesse im Zentrum der Analyse, wobei Details betreffend der technischen Ausarbeitung als nicht relevant für das Erreichen des Zieles der vorliegenden Arbeit beurteilt werden, so dass diese an sekundärer Stelle zurücktreten.

Durch die direkte Teilnahme des Verfassers an diesem Projekt können eigene Erfahrungswerte bei der Ausformulierung des theoretischen Konzepts der Maschinenhandwerklichkeit einbezogen werden, so dass dieses sowohl im Theoretischen als auch im Angewandten verankert ist. Diese Fallstudie bietet sich somit dafür an, um einige Kernbemerkungen bezüglich der Machinecraft zu unterstreichen und zu verstärken.

Da diese Fallstudie auf den Einsatz generativer Fertigungsverfahren beruht, wird zunächst die systematische Einteilung der vorherrschenden Produktionsverfahren vorgestellt und ihre zugrundeliegende Methodik. Es wird detaillierter auf die additive Fertigung und den 3D-Druck eingegangen, da diese die Ausgangspunkte der Forschung und die wesentlichen Projektbausteine repräsentieren. Im Anschluss daran werden Stand der Forschung, Projektagenda, Arbeitsphasen, -methoden und Vorgehensweisen während der Bearbeitung des Projekts beschrieben und kritisch analysiert.

## 2. Fertigungsverfahren und ihre Klassifizierung

Wie bereits in vorherigen Kapiteln beschrieben, lassen sich unterschiedliche Arten der Fertigung identifizieren. Gemäß der DIN Norm 8580 wird zwischen sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren unterschieden. Das Kriterium der Differenzierung bei dieser Klassifizierung ist die Art des Zusammenhalts der Materialteilchen. Die DIN 8580 bietet folgendes Modell der Systematisierung der Fertigungsverfahren an:<sup>394</sup>

- Urformen - Zusammenhalt schaffen  
Beispiele hierfür: Gießen, Sintern.
- Umformen - Zusammenhalt beibehalten  
Beispiele hierfür: Biegen, Schmieden, Walzen, Strangpressen.
- Trennen - Zusammenhalt vermindern  
Beispiele hierfür: Fräsen, Sägen, Bohren, Schneiden.
- Fügen - Zusammenhalt vermehren  
Beispiele hierfür: Montage, Schweißen, Kleben.
- Beschichten - Zusammenhalt vermehren  
Beispiele hierfür: Lackieren, Galvanisieren, Pulverbeschichten.
- Stoffeigenschaften ändern  
Beispiele hierfür: Härten, Glühen.

Dieses Klassifizierungssystem bezieht sich generell auf die Gesamtheit der Fertigungsverfahren, ohne speziell auf die Architektur oder das Bauwesen ausgerichtet zu sein. Grundsätzlich kann heute im Bereich des Bauwesens zwischen zwei Hauptgruppen der Fertigung unterschieden werden: der analogen, wie das Beispiel des handwerklichen Arbeitens, und der digitalen Fertigung. In Anlehnung an die Systematik der DIN 8580, bieten Hauschild und Karzel bei der Betrachtung der digitalen Fertigungsverfahren die Unterscheidung zwischen vier prinzipiellen Vorgehensweisen an:<sup>395</sup>

- Generative Verfahren, auch als Urformen bezeichnet,
- Subtraktive Verfahren,
- Umformende Verfahren,
- Fügende Verfahren.

Für die weiteren Betrachtungen ist nur die erste Position signifikant, da sich das Projekt Minibuilders ausschließlich mit additiven Verfahren befasst. Die beiden Autoren Hauschild und Karzel geben die nachfolgende Definition für generative Verfahren an und beziehen dabei den 3D-Druck mit ein:

---

<sup>394</sup> DIN 8580:2003-09, Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.

<sup>395</sup> Hauschild, M., Karzel, R.: „Digitale Prozesse. Planung, Gestaltung, Fertigung“, Institut für internationale Architektur-Dokumentation, München, 2010, S. 45.

„Generative Verfahren – auch Urformen genannt – beschreiben Technologien, in denen aus formlosem Stoff, z.B. winzigen Partikeln, ein Werkstück hergestellt wird. In die Architektur übertragen, entstehen größere Bauelemente aus kleinen Einzelteilen (z.B. 3D-Drucken).“<sup>396</sup>

### 3. Generative Fertigung und Rapid Prototyping

Die im Folgenden aufgezählten Verfahren und Techniken gehören der Gruppe der generativen Fertigungsverfahren an und stellen Unterkategorien dar. Gleichzeitig handelt es sich dabei um additive Fertigungsverfahren, da Material kontinuierlich hinzugefügt wird, um die Generierung eines Objekt zu erreichen. Das undifferenzierte Benutzen einer Reihe von Begriffen wie generative Verfahren, Rapid Prototyping und 3D-Druck-Verfahren führt manchmal zu fehlerhaften Aussagen und Deutungen dieser Techniken. Hauschild und Karzel schaffen eine klare Abgrenzung zwischen den Termini der Rapid Verfahren und dem Rapid Prototyping:

„Man fasst unterschiedliche generative Verfahren unter dem Oberbegriff »Rapid Verfahren« zusammen. Das weitläufig bekannte »Rapid Prototyping« (RP), also der schnelle Prototypenbau, ist der Sammelbegriff für generative Verfahren, die Vorstufen von Endprodukten erzeugen. Ziel ist es, auf der Basis von CAD-Daten schnell und ohne manuelle Umwege ein physisches 3D-Werkstück herzustellen. Dabei werden komplexe Geometrien auf eine große Anzahl von übereinanderliegenden 2D-Fertigungsschritten reduziert.“<sup>397</sup>

Eine detaillierte Erklärung zum RP-Verfahren liefert Hehenberger, indem das Grundprinzip der Fertigungsart, der schichtenweise Aufbau, verdeutlicht wird:

„Rapid Prototyping (RP) ist ein Sammelbegriff für neuartige Fertigungsverfahren. Sie erlauben die Herstellung von Werkstücken ohne Umwege direkt aus CAD-Daten. Alle Verfahren beruhen auf der Grundidee, ein Werkstück aus Inkrementen von Material schichtweise aufzubauen – ein entgegengesetzter Weg zum Zerspanen.“<sup>398</sup>

Eines der wichtigsten und meist verbreiteten Anwendungsbereiche von RP-Techniken ist die Prototypenherstellung, vor allem Funktionsprototypen.<sup>399</sup> Wegen der schnellen Produktionsart, werden Vorserienobjekte mittels RP-Verfahren hergestellt, so dass sie auf Funktionalität und Formästhetik überprüft werden können. Der massive

---

<sup>396</sup> Hauschild, M., Karzel, R.: „Digitale Prozesse. Planung, Gestaltung, Fertigung“, Institut für internationale Architektur-Dokumentation, München, 2010, S. 45.

<sup>397</sup> Ebd., S. 46.

<sup>398</sup> Hehenberger, P.: „Computerunterstützte Fertigung. Eine kompakte Einführung“, Springer Verlag Berlin-Heidelberg, 2011, S. 245.

<sup>399</sup> Westkämpfer, E., Warnecke, H.: „Einführung in die Fertigungstechnik“, Teubner Verlag/ GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2006, S. 253.

Aufschwung additiver Fertigungstechnologien ist daran gebunden, dass sie eine effiziente Form der individuellen Serienproduktion ermöglichen, unter Berücksichtigung von Zeit, Materialeinsatz und Effizienz.<sup>400</sup>

#### 4. 3D-Druck Verfahren und ihre Klassifizierung

Auch bei den 3D-Druck-Verfahren kann zwischen sechs wesentlichen Gruppen unterschieden werden, wobei die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale in dem Einsatz der Ausgangsmaterialien, dem physikalischen Prinzip und des technischen Verfahrens liegen.<sup>401</sup>

- Stereolithographie - STL

Grundprinzip: Polymerisation eines flüssigen Monomers mittels UV-Licht

Zum geschichtlichen Hintergrund kann zusätzlich erwähnt werden, dass das STL-Verfahren allen anderen Verfahren zugrunde liegt und es 1984 von dem Ingenieur Charles Hull entwickelt wurde.<sup>402</sup>

- Selektives Laser Sintern - SLS

Grundprinzip: Aufschmelzen und Erstarren von Ein- oder Mehr-Komponenten-Pulver mit einem UV-Laser

- Laminated Object Manufacturing - LOM

Grundprinzip: Ausschneiden und Fügen von Folien

- Fused Deposition Modelling - FDM

Grundprinzip: Aufschmelzen und Erstarren von thermoplastischem Draht

Die Qualität der Auflösung ist an die Stärke des benutzten thermoplastischen Drahts gebunden, so dass nicht dieselbe Präzision der Schichten erreicht werden kann wie im Fall des Stereolithographieverfahrens.<sup>403</sup>

- Solid Ground Curing - SGC

Grundprinzip: Aushärtung einer Fotopolymerschicht mit UV-Licht

- Three Dimensional Printing- 3DP, zu Deutsch 3D-Druck.

Da das 3D-Druck-Verfahren im Zentrum der folgenden Betrachtungen steht und eine höhere Relevanz im Kontext dieser Fallstudie besitzt, wird eine ausführlichere Beschreibung des Grundprinzips angegeben:

---

<sup>400</sup> Vgl. Skylar Tibbits: „4D Printing“ In: „Sheil, B. (Hrsg.): „Zero Tolerance in Design and Production AD“, Architectural Design, No. 227, John Wiley and Sons, 2014, S. 118.

<sup>401</sup> Hehenberger, P.: „Computerunterstützte Fertigung. Eine kompakte Einführung“, Springer Verlag Berlin-Heidelberg, 2011, S. 245-252.

<sup>402</sup> Vgl. Skylar Tibbits: „4D Printing“ In: „Sheil, B. (Hrsg.): „Zero Tolerance in Design and Production AD“, Architectural Design, No. 227, John Wiley and Sons, 2014, S. 118.

<sup>403</sup> Vgl. Kula, D., Ternaux, E., Hirsinger, Q.: „Materiology. Handbuch für Kreative: Materialien und Technologien“, Frame Publisher, Amsterdam, Birkhäuser, Basel, 2009, S. 297.

„Mit Three Dimensional Printing werden Modelle aus Pulver generiert. Der Pulverwerkstoff kann Stärke/Zellulose bzw. Gips sein. Es wird ähnlich wie beim Lasersintern ein pulverförmiges Grundmaterial schichtweise aufgetragen. In jede Schicht wird mittels druckkopfähnlichen Düsen ein Binder eingespritzt. Dadurch wird das Pulver verfestigt und mit der darunterliegenden Schicht verbunden.“<sup>404</sup>

Die Bindemittelinjektion wie sie beim zuvor beschriebene Verfahren des 3D-Druck eingesetzt wird, ähnelt in hohem Masse dem „Verfahrensprinzip eines Tintenstrahldruckers“.<sup>405</sup> Sie erfüllt die wichtigste Rolle bezüglich der Aushärtung der Schichten und führt letztendlich zur Stabilisierung der Form.

## 5. Vorbilder und Stand der Forschung

Aus der Vielzahl der betrachteten Forschungsvorhaben, erweisen sich drei Projekte für die Verortung und Kontextualisierung des Projekts *Minibuilders* relevant. Bei diesen handelt es sich um Neri Oxman und das *variable property rapid prototyping (VPRP)*, Behrokh Khoshnevis und das *contour crafting (CC)*, Enrico Dini und *D-Shape*. Diese Projekte sind insofern relevant, als dass sich alle mit robotischen Fabrikationstechnologien, welche vom 3D-Druck-Verfahren abgeleitet sind, beschäftigen. Zusätzlich handelt es sich bei den drei genannten Forschungsprojekten um Vorhaben bei denen die Projektbeteiligten eigens Roboter bzw. Roboterbauteile entwickelt haben. Somit überlagern sie sich bezüglich der wesentlichen Themenschwerpunkte, dem Roboter als Fabrikationswerkzeug des Architekten und der Maschinenentwicklung durch den Entwerfer, mit dem Thema der vorliegenden Arbeit. Durch diese Überschneidungen ist ebenfalls eine Auseinandersetzung auf der theoretischen Betrachtungsebene möglich. Gleichzeitig spiegeln diese exemplarisch den Stand der Forschung zu dem Thema der robotischen, von 3D-Druckern abgeleiteten Fabrikation in der Architektur wieder.

### Neri Oxman und das VPRP-Verfahren

Einen wesentlichen Einfluss auf die konzeptionelle Auslegung dieses Forschungsprojektes hatte die Arbeit von Prof. Neri Oxman am Media Lab, angesiedelt am Massachusetts Institute of Technology. In ihrem Forschungsgebiet beschäftigt sich Oxman intensiv mit additiven Fertigungsverfahren. Ihre Arbeiten sind interdisziplinär geprägt, wobei Einflüsse aus der Biologie, Materialforschung und Maschinenentwicklung einfließen. Biologische Systeme werden analysiert und der Versuch wird unternommen die zugrundeliegenden Funktionslogiken auf Systeme der Architektur zu übertragen.

---

<sup>404</sup> Hehenberger, P.: „Computerunterstützte Fertigung. Eine kompakte Einführung“, Springer Verlag Berlin-Heidelberg, 2011, S. 252.

<sup>405</sup> Westkämpfer, E., Warnecke, H.: „Einführung in die Fertigungstechnik“, Teubner Verlag/ GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2006, S. 256.

Oxman stellt der bislang in der Architekturpraxis üblichen Materialelektion durch den Architekten, die Materialentwicklung durch denselbigen entgegen und betrachtet das Auftreten von Verbundwerkstoffen als Antreiber und Beschleuniger für diesen möglichen Paradigmenwechsel. Die Möglichkeit für den Entwerfer, jenseits der simplen Selektion, Materialeigenschaften aktiv zu manipulieren, deutet Oxman als einen neuen Ansatz in der Entwurfsmethodik.<sup>406</sup> Der hier entwickelte Ansatz bezieht sich jedoch nicht nur auf die Manipulation von Material in dem Sinne der Erzeugung einer neuen Materialart, welche dann wie gewohnt undifferenziert auf der Baustelle verbaut wird. Der vorgeschlagene Ansatz orientiert sich, unter anderem, an dem Vorbild funktioneller Gradientenwerkstoffe.<sup>407</sup> Aus dieser Betrachtungsweise und Haltung ist ein Vorschlag für eine neue Art der entwerferischen und konstruktiven Vorgehensmethodik hervorgegangen.

### **Variable Property Rapid Prototyping**

Oxman hat ein zusammenhängendes Entwurfs- und Fabrikationssystem entwickelt: das *variable property modelling (VPM)* und das *variable property rapid prototyping (VPRP)*.

Oxman bezieht sich auf die Logiken der Materialverteilung in der Natur, bei welchem Material auf heterogene Weise verteilt wird, gemäss funktioneller und statischer Anforderungen. Als Beispiele hierfür werden Holz, Knochen, Schalen wie zum Beispiel Muschelschalen und Geweihstrukturen angeführt.<sup>408</sup> Dasselbe Material weist nicht nur auf der Makroebene Variationen auf, sondern auch Unterschiede in seiner Mikrostruktur sind nachweisbar. Diese Variationen der Materialeigenschaften auf Mikro- und Makroebene lassen sich durch eine hohe Spezialisierung und Optimierung an systeminterne und -externe Anforderungen erklären. Natürliche Materialien weisen sich durch ihre Heterogenität aus, während Materialien aus der Bauindustrie nach Homogenität streben. Um diese Prinzipien bei der materiellen Umsetzung erfüllen zu können, müssen diese Gedankengänge bereits in dem frühen Stadium des Entwerfens berücksichtigt und als bestimmende Parameter eingebunden werden. Daher beweist das Vorgehen von Oxman eine konsequente innere Logik, wenn sie die Distanzierung von Entwurf und Fabrikation überwindet, indem bei ihrem methodologischen Vorgehen Entwurfs- und Fabrikationsphase miteinander überlappen und sich nicht klar abgrenzen lassen.

Das VPM stellt das digitale Entwurfswerkzeug dar und ermöglicht „*das Modellieren, die Analyse und die Fabrikation von Objekten mit abgestuften Materialeigenschaften, welche multiplen und kontinuierlich variierenden funktionalen Anforderungen*

---

<sup>406</sup> Oxman, N.: „Material-Based Design Computation“, Massachusetts Institute of Technology, 2010, S. 76, abrufbar unter: <http://hdl.handle.net/1721.1/59192>, (Stand 10.12.2014).

<sup>407</sup> Ebd., S. 77

<sup>408</sup> Oxman, N.: „Variable property rapid prototyping“, In: „Virtual and Physical Prototyping“, Vol. 6, No. 1, Taylor & Francis, London, 2011, S. 4ff., abrufbar unter: [http://matter.media.mit.edu/assets/pdf/Publications\\_VPRP.pdf](http://matter.media.mit.edu/assets/pdf/Publications_VPRP.pdf) (Stand 03.12.2014)

entsprechen“.<sup>409</sup> Die durch das VPM entworfenen Objekte werden anschließend mittels des VPRP-Verfahrens produziert. Das VPRP ist ein patentiertes additives Fertigungsverfahren, bei welchem Objekte mit variierenden, abgestuften Materialeigenschaften erzeugt werden können. Bei dieser Fertigungsweise handelt es sich um einen kontinuierlichen Prozessablauf. Das VPRP verkörpert eine Materialverteilungsstrategie, welche sich an dem Vorbild biologischer Modelle orientiert. Im Gegensatz zu konventionellen Technologien und auf biologischen Prinzipien beruhend, schlägt Oxman durch die Anwendung des VPRP eine Fabrikationstechnologie vor, bei der nicht nur auf die Art der Verteilung des Materials Einfluss genommen werden soll, sondern zukünftig auch auf die Mikroebene, indem Dichte oder Steifheit des Materials manipuliert werden. Durch diese Art der Manipulation lässt sich, abgesehen von einer funktionalen Optimierung, auch eine nachhaltige Minimierung der Materialverschwendung erreichen.<sup>410</sup> Die effiziente Akkumulation und Subtraktion sowie die abgestuft variierende Materialbeschaffenheit haben zusätzlich einen reduzierten Materialaufwand zur Folge.

#### **Unterschied zum üblichen 3D-Druckverfahren**

Dieses Verfahren stellt einen wesentlichen Unterschied zu anderen 3D-Druckverfahren dar. Beim konventionellen 3D-Drucken wird normalerweise ein einziges Material, mit konstanten Eigenschaften, zum Bauen von Modellen benutzt. Zwar sind auch 3D-Drucker mit multipler Materialzufuhr erhältlich, wie die 3D-Drucker der Serie *Object Connex MultiMaterial 3D Printer*, hergestellt von der Firma Stratsys.<sup>411</sup> Die von der Firma Stratsys zur Verfügung stehende Materialpalette wurde um eine weitere Materialklasse erweitert. Der vom Hersteller vergebene Name für diese Klasse lautet *Digital Materials*. Dabei handelt es sich um Verbundwerkstoffe, welche innerhalb des Druckkopfs miteinander vermischt werden. Abhängig von den anvisierten Materialeigenschaften, variiert das Mischverhältnis der vermengten Harze. Dies geschieht in Echtzeit, während des Druckvorgangs.<sup>412</sup> Bei den daraus resultierenden Materialien handelt es sich aber weiterhin um eigenständige Materialtypen, welche konstant in ihren Eigenschaften sind. Anders als beim VPRP findet der Materialwechsel nicht progressiv statt. Die somit gefertigten Produkte weisen klar abgegrenzte Bereiche unterschiedlicher Materialität auf.

---

<sup>409</sup> Ebd., S. 16.

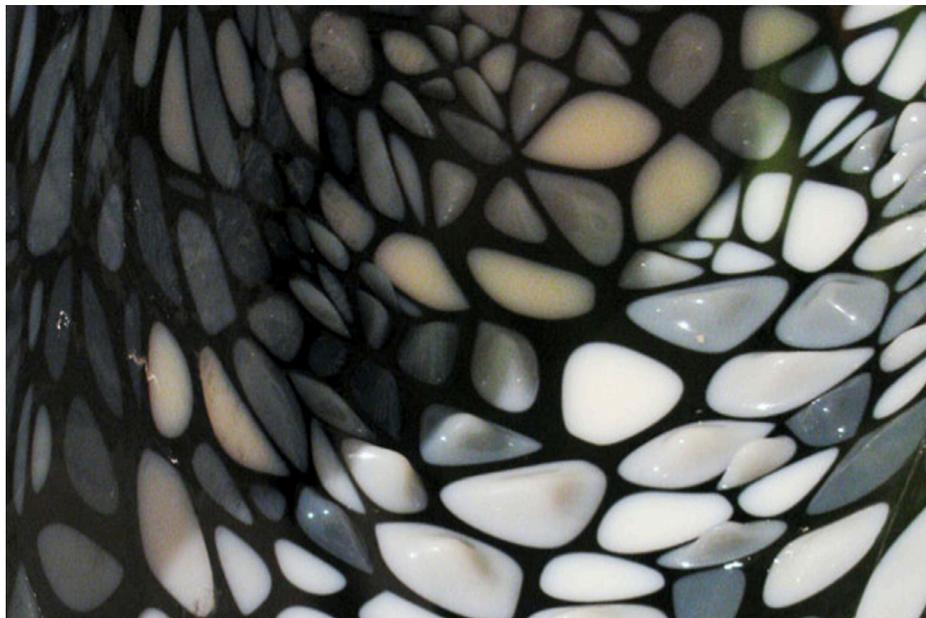
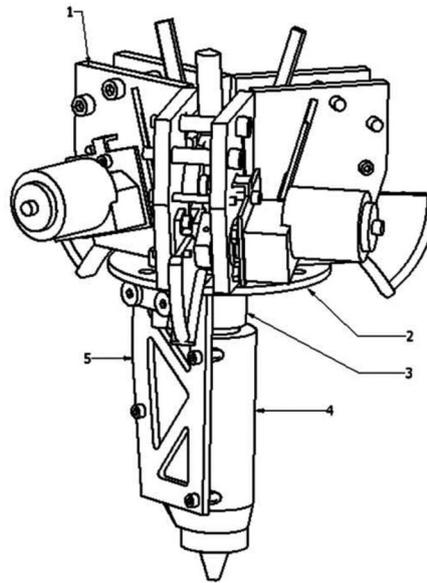
<sup>410</sup> Oxman, N.: „Variable property rapid prototyping“, In: „Virtual and Physical Prototyping“, Vol. 6, No. 1, Taylor & Francis, London, 2011, S. 13, abrufbar unter: [http://matter.media.mit.edu/assets/pdf/Publications\\_VPRP.pdf](http://matter.media.mit.edu/assets/pdf/Publications_VPRP.pdf) (Stand 03.12.2014)

<sup>411</sup> <http://www.stratsys.com/3d-printers/design-series/connex-systems> (Stand 29.01.2014).

<sup>412</sup> <http://www.stratsys.com/materials/polyjet/digital-materials> (Stand 29.01.2014).  
 „Select PolyJet 3D Printers let you fabricate Digital Materials — composite materials with predetermined visual and mechanical properties. Digital Materials are made right in the 3D printer, when two or three PolyJet base resins are combined in specific concentrations and structures to provide the desired properties.“

### Prototype assembly

No.	Part name	Description
1	Pusher subassembly	Advances individual stick
2	Baseplate	Structural; waterjetted aluminum
3	Baseplate bushing	Guides glue sticks into heating chamber; 3d-printed plastic
4	Heating chamber	Taken from commercial glue gun
5	Nozzle cradle	Attaches heating chamber to delivery assembly; waterjetted aluminum



17. Patentierter Druckkopf für das VPRP-Verfahren

18. Nahaufnahme der Oberflächenstruktur, Chaiselongue Beast, Neri Oxman

### Theoretische Betrachtungen

Oxman widmet sich nicht nur den technischen Aspekten unterschiedlicher Materialentwicklungs- und Verarbeitungsstrategien. Die dargelegten Vorgehensmethoden haben auch auf theoretisch-konzeptioneller Ebene Implikationen. Konzeptionell betrachtet wird durch das Auftreten von gradierten Werkstoffverteilungsstrategien die Definitionsgrenze zwischen den Begriffen Material und Struktur aufgelöst.<sup>413</sup> Durch die mögliche Manipulation vom Material von der Mikro- bis zur Makroebene verwischt die Grenze zwischen Material und Struktur, da die materielle Organisationsstruktur mittels der beschriebenen digitalen Technologien so manipuliert werden kann, dass die Homogenität von Baumaterialien, wie sie im Fall von Beton oder Stahl anzutreffen ist, nach dem Vorbild natürlicher Strukturen so verändert wird, dass durch lokale Veränderungen der Dichte oder Porosität das Material in ein heterogenes Konstrukt umgeändert wird.<sup>414</sup> Dieses heterogene Konstrukt entspricht eher einer Struktur, im Sinne einer konstruktiven Begriffserklärung, wobei die Bezeichnung Material die erreichte Funktionalität unzureichend abdecken würde. Der Gedankengang kann weitergeführt werden, indem man die verschwimmende Grenze zwischen Elementen des Tragwerks und Bauteilen, die keine statische Relevanz besitzen, zieht.

In ihren Betrachtungen legt Oxman einen besonderen Schwerpunkt auf die gleichzeitige Berücksichtigung und Beschäftigung des Entwerfers mit Entwurf, Materialforschung, Konstruktion und der Maschine.

### Fallbeispiele für die Anwendung der VPM- und VPRP-Verfahren

Der Chaiselongue *Beast* wurde unter Anwendung der VPM- und VPRP-Verfahren entworfen und fabriziert. Die dahinter liegenden Entwurfs- und Fabrikationsabsichten werden wie folgt zusammenhängend erklärt:

*„Der Stuhl kombiniert konstruktive, umweltbedingte und körperliche Leistungsaspekte, indem dessen Dicke, Musterdichte, Steifheit, Flexibilität und Lichtdurchlässigkeit sich der Lastverteilung, Krümmung und den von der Haut belasteten Flächenbereichen anpassen.“<sup>415</sup>*

Bei den genannten Kriterien handelt es sich um multiple Parameter, welche für Entwurf und Fabrikation gleichermaßen relevant sind und in einer wechselseitigen Beziehung zueinander stehen. Die zellenartige Unterteilung des Stuhls veranschaulicht die Oberflächenunterteilung bezüglich des ausgeübten Körperdrucks einer liegenden Person. Größe und Oberflächenart einer jeden Zelle beeinflussen die

---

<sup>413</sup> Oxman, N.: „Material-Based Design Computation“, Massachusetts Institute of Technology, 2010, S. 78, abrufbar unter: <http://hdl.handle.net/1721.1/59192>, (Stand 10.12.2014).

<sup>414</sup> Vgl. Picon, A.: „Digital Culture in Architecture. An Introduction for the Design Professions“, Birkhäuser Verlag, Basel, 2010, S.159.

<sup>415</sup> Vgl. Oxman, N.: „Variable property rapid prototyping“ In: „Virtual and Physical Prototyping“, Vol. 6, No. 1, Taylor & Francis, London, 2011, S. 16, abrufbar unter: [http://matter.media.mit.edu/assets/pdf/Publications\\_VPRP.pdf](http://matter.media.mit.edu/assets/pdf/Publications_VPRP.pdf) (Stand 03.12.2014).

Vergabe der dazugehörigen Materialeigenschaften. Diese Zuordnung der zellenspezifischen Materialeigenschaften findet innerhalb der Phase des VPM statt.

Das von Oxman entwickelte Fabrikationsverfahren befindet sich in der Entwicklungsphase. Bei der Fabrikation der entworfenen Objekte wird der 3D-Drucker Connex500 der Firma Stratasys benutzt.<sup>416</sup> Durch ihre technische Auslegung sind 3D-Drucker in der Größe ihres Arbeitsfeldes limitiert. Dies überträgt sich ebenfalls auf eine begrenzte Maximalgröße der produzierten Werkstücke, so dass Objekte welche diese Dimensionen überschreiten in mehrere Teilstücke unterteilt werden müssen. So auch im Fall des vorgestellten Chaiselounge, welcher sich aus 32 Einzelteilen zusammensetzt.<sup>417</sup> Dadurch erweist sich diese Technologie, in ihrer jetzigen Form, als ungeeignet für den großmaßstäblichen Einsatz, wie er in der Architektur üblich ist. Bei den verwendeten Materialien handelt es sich um unterschiedliche Arten von Kunstharzen, welche sich als Baumaterialien für Architekturen als ungeeignet qualifizieren.

VPM und VPRP stellen in ihrer Gesamtheit eine zusammenhängende Entwurfs- und Fabrikations-Strategie dar. Unter dem Begriff Entwurfsstrategie darf aber nicht Formgenerierungsmethode verstanden werden. Sondern wie bereits an anderer Stelle erklärt, geht es darum, dass für die Fabrikation relevante Parameter aus der Materialentwicklung, den Materialeigenschaften, den definierten statischen und funktionellen Anforderungen, als ebenfalls für den Entwurf grundlegende Parameter, von Anfang an berücksichtigt werden.

### **Behrokh Khoshnevis und das Contour Crafting**

Während die Arbeiten von Neri Oxman sich auf einer kleinmaßstäblichen, experimentellen Ebene bewegen, handelt es sich beim contour crafting (CC) um eine für den konkreten Baustelleneinsatz entworfene, additive Fabrikationstechnologie. Entwickler dieser Technologie ist Prof. Behrokh Khoshnevis, der Leiter des Center for Rapid Automated Fabrication Technologies (CRAFT) an der University of Southern California.

CC verfolgt einen neuen Ansatz einer additiven, schichtweisen Fertigungstechnik, ähnlich wie bei anderen 3D-Druckverfahren.<sup>418</sup> Das entwickelte Verfahren basiert auf einer doppelten Vorgehensweise: einem Extrusionssystem, gefolgt von einem Füllsystem. Mithilfe einer Extruderdüse werden durch ein schichtweises Auftragen die Begrenzungslinien von Wandelementen, also die Konturen, aufgebaut. Gefolgt wird dies von einem Füllmechanismus. Dabei wird das noch hohle Wandelement mit

---

<sup>416</sup> Vgl. Oxman, N.: „Variable property rapid prototyping“ In: „Virtual and Physical Prototyping“, Vol. 6, No. 1, Taylor & Francis, London, 2011, S. 17, abrufbar unter: [http://matter.media.mit.edu/assets/pdf/Publications\\_VPRP.pdf](http://matter.media.mit.edu/assets/pdf/Publications_VPRP.pdf) (Stand 03.12.2014).

<sup>417</sup> Ebd., S. 20.

<sup>418</sup> Vgl. Hwang, D., Khoshnevis, B.: „An Innovative Construction Process-Countour Crafting“, 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC 2005 - September 11-14, 2005, S. 3.

flüssigem Material ausgefüllt.<sup>419</sup> Die Maschine ähnelt in ihrer Ausführung einem Kranportalsystem. Die beiden Extruderdüsen bewegen sich entsprechend der vorgegebenen Bewegungspfade entlang des Kranportals und deponieren dabei das Material an der vorgegebenen Stelle.<sup>420</sup> Die Materialzufuhr für die Extruderdüsen erfolgt über Materialtanks, welche seitlich des Kranportals montiert sind.

Wie zuvor erwähnt handelt es sich beim CC um eine reine Fabrikationstechnologie. Ähnlich wie bei handelsüblichen 3D-Druckern, werden die Entwurfsdaten in ihrer fertigen Form an die Maschine weitergegeben, welche anschließend mit der Bauausführung beginnt. Unter Berücksichtigung der Fertigungslogik, beruht das CC auf dem Hochskalieren und Anpassen des 3D-Druckers an den Einsatz im Rahmen der Architektur. Das CC zeichnet sich dadurch aus, dass es weit über die Grenze experimenteller Laboranwendungen zielt, indem es diverse bau- und haustechnische Aspekte, welche oft bei ähnlich angelegten Projekten vernachlässigt oder minimiert werden, direkt adressiert und als integrierte Teile eines robotisierten Prozesses einbezieht. Zur automatisierten Integrierung der Bewehrung, des Fliesenlegens, der Verrohrung und der elektrischen Leitungsführung werden technischen Vorgehensweisen vorgestellt.<sup>421</sup> Des Weiteren handelt es sich bei den angebotenen Materialien, um Baustoffe, welche bedenkenlos für den großflächigen Einsatz geeignet sind und aus dem vertrauten Materialvokabular der Architektur stammen. Bei diesen in der Bautradition verankerten Baustoffen handelt es sich hauptsächlich um Lehm und Beton.<sup>422</sup>

### **Automatisierung der Baustelle**

Der gesamtheitliche Ansatz einer vollautomatisierten, vollrobotisierten Baustelle, in all ihren Bereichen kommt einem futuristischen Paradigmenwechsel der Baukonditionen sehr ähnlich. Khoshnevis beleuchtet die Tatsache, dass ab Anfang des 20. Jahrhunderts die Automatisierung bereits ihren Einzug in den meisten Produktionsbereichen erfahren hat, wobei die Bauindustrie jedoch weiterhin eine Ausnahme darstellt.<sup>423</sup> Die Entwicklung des Contour Crafting-Verfahrens kann daher als ein Versuch zur Einleitung einer grundsätzlichen Veränderung der Konstruktionsbedingungen in der Architektur gedeutet werden. Das Manuelle, die auf die Baustelle bezogene Ausführungsarbeit, wird durch eine Automatisierung derselbigen ersetzt. Es wird kein Anspruch an einen konzeptionellen

---

<sup>419</sup> Ebd., S. 3.

<sup>420</sup> Khoshnevis, B.: „Automated Construction by Contour Crafting - Related Robotics and Information Technologies“ in *Journal of Automation in Construction - Special Issue: The best of ISARC 2002*, Vol. 13, Ausgabe 1, Januar 2004, S. 5-19, S. 7.

<sup>421</sup> Ebd., S. 5-19.

<sup>422</sup> Khoshnevis, B., Hwang, D., Yao, K. und Yeh, Z.: *Mega-Scale Fabrication by Contour Crafting*, in *Int. J. Industrial and Systems Engineering*, Vol. 1, No. 3, 2006, S. 303 ff.

<sup>423</sup> Khoshnevis, B.: *Automated Construction by Contour Crafting - Related Robotics and Information Technologies* in *Journal of Automation in Construction - Special Issue: The best of ISARC 2002*, Vol. 13, Ausgabe 1, Januar 2004, S. 5.

Paradigmenwechsel, bezogen auf die Veränderung grundsätzlicher Verfahrenslogiken, gestellt. Khoshnevis sieht den Paradigmenwechsel auf der Ebene der baulichen Ausführungsart auf der Baustelle: die traditionelle Herstellungsmethode des Vor-Ort-Gießens, wie bei Ortbeton, weicht einer schichtweisen Herstellungsart, abgeleitet vom 3D-Druck-Verfahren.<sup>424</sup> Die Neuentdeckung der schichtweisen Fertigungsart in der Architektur und die Intention der kompletten Vollautomatisierung der Baustelle mitsamt all ihren charakteristischen Bauabläufen werden als signifikante Zukunftsvisionen porträtiert.<sup>425</sup> Der Wechsel zur vollständig automatisierten Baustelle durch das CC verändert in keiner maßgeblichen Art und Weise die Logik des Bauens bzw. die Logik der Bauprozesse. Anders als bei Oxman, welche eine Veränderung der Vorgehenslogik in den Bereichen Entwurf-Fabrikation anvisiert.

Im Gegensatz zum VPM-VPRP-Verfahren, widmet sich das Contour Crafting ausschließlich den Aspekten der Fabrikation. Die konventionelle Baumethodik wird in ein automatisiertes Verfahren übersetzt. Zwar wird auch hier ansatzweise die Beeinflussung der Materialverteilung erwähnt, indem das Beispiel von der zweckmäßigen Verteilung von Kohlenstofffasern im Beton angeführt wird<sup>426</sup>, jedoch liegt der Fokus nicht auf das Aufeinanderabstimmen von Entwurf, Material und Fabrikation durch das Definieren einer Strategie der Materialverteilung, wie bei Oxman. Während Oxman die Optimierung von Entwurf und Fabrikation auf einer Phasen übergreifenden Ebene sucht und das Material als verbindendes Element benutzt, verfolgt Khoshnevis ausschließlich die Optimierung auf der baulichen Ebene. Entwurf und Fabrikation werden als zwei voneinander getrennte Entitäten behandelt und somit voneinander entkoppelt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Ausgangspunkt bei Khoshnevis in einem praxisnahen Ansatz liegt. Dieser Ansatz versucht eine Problembehebung, der Nachteile, die sich aus einer manuell ausgerichteten Baustelle ableiten, zu generieren. Dabei bezieht sich Khoshnevis auf einer von Warszawski und Navon durchgeführten Forschungsstudie, wenn er die sinkende Arbeitseffizienz, Unfallraten, niedrige Arbeitsqualität und die unzureichende und schwierige Kontrolle der Baustelle als Problemaspekte benennt, die durch die Baustellenautomatisierung behoben werden können.<sup>427</sup>

### **Potenzial des Roboters**

In ihrer Ausführung als Kranportalsystem behebt die CC-Technik viele Probleme der Baustelle. Jedoch wie jede Technologie, generiert auch das CC spezifische Vor- und Nachteile. Eines der sehr oft erwähnten Vorteile betrifft den Aspekt der Schalung. Das

---

<sup>424</sup> Hwang, D., Khoshnevis, B.: An Innovative Construction Process-Contour Crafting, 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC 2005 - September 11-14, 2005, Ferrara (Italy) <http://www.iaarc.org/publications/fulltext/isarc2005-03hwang.pdf>

<sup>425</sup> Khoshnevis, B., Hwang, D., Yao, K. und Yeh, Z.: Mega-Scale Fabrication by Contour Crafting, in Int. J. Industrial and Systems Engineering, Vol. 1, No. 3, 2006, S. 306.

<sup>426</sup> Khoshnevis, B.: Automated Construction by Contour Crafting - Related Robotics and Information Technologies in Journal of Automation in Construction - Special Issue: The best of ISARC 2002, Vol. 13, Ausgabe 1, Januar 2004, S. 8.

<sup>427</sup> Ebd., S. 5.

CC-Verfahren, wie auch die D-Shape-Fertigungstechnik werden als Vorboten einer „Zukunft des schalungslosen Freiformbauens“<sup>428</sup> gesehen. Vermehrt beschränken sich somit die Betrachtungen auf den Aspekt des Garantierens der vereinfachten Baubarkeit gekrümmter Geometrien. Denn die Realisierung solcher Geometrien steht vor allem vor dem Problem einer erschwerten Baubarkeit der Oberflächen, da entweder aufwendige und kostenintensive Schalungs- oder Gussformen benötigt werden. Der Punkt der Eliminierung der Notwendigkeit einer Schalung und somit das Erreichen einer signifikanten Kostensenkung stellt natürlich einen bedeutungsvollen Aspekt dieser Technologie dar.

Bei den Nachteilen handelt es sich um eine Reihe problematischer Beschränkungen, welche sich aus der technischen Ausbildung der Maschine ableiten lassen. Die maschinelle Ausführung als ein Kranportalsystem setzt voraus, dass das Gebaute bzw. das Zubauende in seiner Dimension kleiner ist als die Maschine, die für das Bauen verantwortlich ist. Mit anderen Worten, die CC-Maschine muss größer sein als das Bauobjekt. Diese Kondition bezüglich des Maßstabs kann sich zu einem erheblichen Nachteil entwickeln, wenn es um den Bau großer Strukturen geht, welche die Größe eines Ein- oder Mehrfamilienhauses überschreiten. Zusätzlich bedarf es einer vorhergehenden Vorbereitungsmaßnahmen des Baugrundstücks für das Installieren der CC-Maschine. Darüber hinaus kann sich der Hin- und Abtransport einer Maschine solcher Dimension als umständlich, zeit- und kostenaufwändig darstellen. Einhergehend mit dem Hin- und Abtransport müssen auch Auf- und Abbauaufwand einkalkuliert werden.<sup>429</sup> Khoshnevis sieht den Roboter als Schlüssel zur Ausbesserung dieser Mängel. Diese unvorteilhaften Problematiken können durch das Ersetzen der robotisierten CC-Maschine durch eine Reihe eigenständiger Industrieroboter behoben werden. Eine Gruppe mobiler Roboter übernimmt die Bauaufgaben.<sup>430</sup> Das Konzept des hochskalierten 3D-Druckers würde somit dem Bild eines multiplen Robotersystems weichen. Khoshnevis steigert die Effizienz und Funktionsfähigkeit seiner Fabrikationstechnologie, durch das Implementieren des Roboters in die Prozessabläufe. Die, im Verhältnis zur CC-Maschine, kleinere Größe, ihre funktionale Eigenständigkeit und das Verzicht auf die Montage der Maschine selber empfehlen Industrieroboter als adäquate Substitute.

### **Enrico Dini und D-Shape**

Das patentierte Verfahren wurde von dem Ingenieur Enrico Dini entwickelt, welcher sich des Vorbilds des industriellen 3D-Druckers bedient und diese Technologie um ein Vielfaches skaliert hat, um deren Anwendbarkeit für den großmaßstäblichen Einsatz zu ermöglichen.

---

<sup>428</sup> Hauschild, M., Karzel, R.: „Digitale Prozesse. Planung, Gestaltung, Fertigung“, Institut für internationale Architektur-Dokumentation, München, 2010, S. 52.

<sup>429</sup> Vgl. Khoshnevis, B.: Automated Construction by Contour Crafting - Related Robotics and Information Technologies in Journal of Automation in Construction - Special Issue: The best of ISARC 2002, Vol. 13, Ausgabe 1, Januar 2004, S. 5-19, S. 13 ff.

<sup>430</sup> Ebd., S.13 ff.

Bei D-Shape handelt es sich um ein robotisches Fabrikationsverfahren ähnlich dem 3D-Druckverfahren der Stereolithografie, wobei es sich bei dem hier benutzten Material um eine Mischung aus Sand und einem anorganischen Bindemittel handelt.<sup>431</sup> Im Gegensatz zu den beim VPRP-Verfahren benutzten künstlichen Harzen, weist das hier eingesetzte Material eine strukturelle Festigkeit und Zugkraft auf, welche, laut den Aussagen des Herstellers, denen von Portlandzement überlegen sind, was dazu führt dass der Einsatz von zusätzlicher Bewehrung unnötig ist.<sup>432</sup> Während künstliche Harze durch ihre chemische Zusammensetzung umweltschädlich sind und ihr potentieller Einsatz als Baumaterial kritisch zu betrachten ist, handelt es bei dem D-Shape-Material zwar um ein künstliches Produkt, welches jedoch als Endprodukt dem natürlichen Marmor stark ähnelt und wegen seiner mineralischen Zusammensetzung als komplett umweltverträglich beschrieben wird.<sup>433</sup> Oft werden das CC-Verfahren und D-Shape im selben Zusammenhang erwähnt und als Beispiele für eine baulich angewandte Form des 3D-Drucks genannt:

*„Das sogenannte Contour Crafting und das D-shape Verfahren transferieren das Prinzip der Rapid Verfahren zur Herstellung von Modellen oder Prototypen in den 1:1 Maßstab für das Bauwesen. Die Methoden arbeiten mit einem betonähnlichen Material, das Bauteilgeometrien schichtweise aufbaut.“<sup>434</sup>*

Diese Zusammenlegung beider Fertigungsverfahren ist grundsätzlich falsch und bezieht sich ausschließlich auf eine oberflächliche Betrachtung des hochskalierten schichtweisen Aufbaus. Das von Dini entwickelte Verfahren unterscheidet sich grundsätzlich vom Contour Crafting, obwohl beide auf den Prinzipien einer schichtweisen Fertigungstechnik basieren. D-Shape ist darauf ausgerichtet bautechnisch und materiell undifferenzierte Strukturen zu konstruieren, welche nur statischen Anforderungen genügen, während das CC-Verfahren die Gesamtheit aller bautechnischen Herausforderungen, wie die bauliche Integrierung von haustechnischen, elektrischen und statischen Elementen, adressiert und versucht Problemlösungen dafür anzubieten.

D-Shape dient der reinen baulichen Umsetzung, also der Fabrikation, und setzt sich anders als bei Oxman nicht mit der Entwurfsmethodik auseinander. Die fertigen Objektdaten werden in Form eines digitalen Datenformats an den Drucker weitergegeben.

---

<sup>431</sup> <http://www.d-shape.com/cose.htm> (Stand 20.12.2014).

<sup>432</sup> <http://www.d-shape.com/tecnologia.htm> (Stand 20.12.2014).

<sup>433</sup> <http://www.d-shape.com/tecnologia.htm> (Stand 20.12.2014).

<sup>434</sup> Hauschild, M., Karzel, R.: „Digitale Prozesse. Planung, Gestaltung, Fertigung“, Institut für internationale Architektur-Dokumentation, München, 2010, S. 46.



19. Gedruckte Skulptur Radiolaria, D-Shape

20. Erste Schichten des Druckverfahrens, Skulptur Radiolaria, D-Shape

## 6. Projektagenda

Das Hauptziel dieser Fallstudie beruht auf der Entwicklung einer robotischen Fabrikationsstrategie, geeignet für den Einsatz auf der Baustelle. Der Ausgangspunkt des Projekts besteht somit nicht in der Entwicklung einer Maschine, welche gewisse funktionelle Aufgaben übernehmen kann, sondern richtet sich primär auf die ganzheitliche Entwicklung einer Strategie. Innerhalb dieser Arbeit bezeichnet Strategie das Entwerfen eines Verfahrens, das über eine innere und eigene operationelle Struktur verfügt, welche Teilaktionen zu einem kohärenten Zusammenspiel organisiert. Somit verweist der Begriff Strategie bzw. Fabrikationsstrategie innerhalb dieses Kontexts auf die Anordnung von parallelen oder konsekutiven Prozessen, aus deren Gesamtheit und Interdependenz sich ein Mehrwert funktioneller und logistischer Natur erzielen lässt. Die einzelnen Prozesse innerhalb einer solchen Strategie können separaten Fabrikationsphasen entsprechen oder gebündelt Phasen der Fabrikation darstellen. Aus dem Erarbeiten und Festlegen der verschiedenen Verfahrensphasen ergeben sich auch die Anforderungen, welche von einer oder mehreren Maschinen erfüllt werden müssen.

Dieser methodologische Ansatz wurde bewusst gewählt, um möglichen Zwängen und den damit verbundenen Schwächen, welche einerseits von dem Einsatz industrieller Maschinen oder andererseits durch die Anwendung etablierter Prozessabläufe potenziell ausgehen, entweichen zu können. Somit wurde zunächst auf einer konzeptionellen Ebene die zu verfolgende Fabrikationsstrategie entworfen. Das Zustandekommen dieser wird im Folgenden erläutert.

Um eine detaillierte Projektagenda festlegen zu können, wurde eine umfassende Recherche unternommen, welche sich auf zwei technologische Schwerpunkte konzentriert hat. Als erster Fokuspunkt diente der gegenwärtige Einsatz von industriellen Roboterarmen und den dazugehörigen Materialien. Ein Vielzahl unterschiedlicher robotischer Technologien, sowohl aus dem Bereich der Architektur, als auch aus den Bereichen Automobilindustrie, Schiffs- und Flugzeugbau wurden betrachtet. Der Sinn und Zweck dieser Recherche bestand darin, die ansonsten schwer überschaubare Bandbreite robotischer Fabrikationsprozesse, Verfahren und der eingesetzten Materialien zu umreißen. Abgesehen von dem Wirtschaftssektor wurden gleichermaßen experimentelle Projekte aus dem akademischen Feld betrachtet und analysiert. Den zweiten Interessenschwerpunkt bildeten 3D-Druckverfahren und ihre Anwendbarkeit innerhalb der Architektur. Ziel dieser Betrachtungen war die Identifizierung von wesentlichen Nachteilen, die sich aus dem industriellen und Architektur bezogenen Einsatz ableiten lassen und deren Behebung in einer Steigerung der angemessenen Anwendung dieser Technologien im Architekturbereich resultieren. Zu erwähnen ist der Umstand, dass sämtliche Betrachtungen und die einhergehende kritische Auseinandersetzung mit den genannten Technologien und Verfahren aus einem architektonischen Standpunkt erfolgten. Der architektonische Standpunkt bezieht sich hauptsächlich auf die Angemessenheit für architektur-spezifische Anforderungen wie zum Beispiel der Baustelleneinsatz.



21. Schichtenqualität nach abgeschlossenem Druckvorgang, Skulptur Radiolaria, Fabrikationsmethode D-Shape

Diese Datensammlung und -analyse hat zu einer Auswertung geführt, deren Hauptresultat die zwei im Folgenden aufgezählten Beschränkungskomplexe sind, welche sich aus dem Einsatz industrieller Roboterarme ergeben:

1. Reichweite - Mobilität - Gewicht - Größe.
2. Kontinuierliche Prozesse.

1. Reichweite, Mobilität, Gewicht und Größe von Roboterarmen werden als miteinander verbundene und sich gegenseitig beeinflussende Parameter betrachtet, welche in einer beschränkten Operationalität beim Baustelleneinsatz resultieren. Als grundsätzlich an ihrem Standort verankerte Maschinen verfügen Roboterarme über eine beschränkte Reichweite und Mobilität. Zur Überwindung dieser Hindernisse und somit zu einer signifikanten Steigerung der Reichweite und Mobilität können Bewegungsschienen oder mobile Plattformen eingesetzt werden. Bewegungsschienen bedeuten das Schaffen einer Infrastruktur, welche während der Funktionsdauer des Industrieroboters bestehen bleiben muss und ihrerseits durch die physische Präsenz auf der Baustelle zur Beeinträchtigung parallel ablaufender Prozesse führen kann. Mobile Bewegungsplattformen setzen einen zusätzlichen Energieverbrauch voraus und sind nur bedingt funktionell auf der Baustelle vertretbar. Dies hängt mit der Größe und dem Durchschnittsgewicht von Industrierobotern zusammen. Das durchschnittliche Gewicht, das sich auf circa 600 kg beläuft, erweist sich dabei als ein Beschränkungsfaktor für schnelle und flexible Bewegungsabläufe. Spontane manuelle Interventionen zur Fehlerbehebung, Redirektionierung oder Neupositionierung sind somit ausgeschlossen. Bezieht man sich nun auf den konkreten Baustelleneinsatz kann eine Zusatzlast von diesem Umfang nach ergänzenden statischen und konstruktiven Maßnahmen verlangen. Die räumliche Größe von Roboterarmen beschränkt oder verhindert ihre eigene Zugänglichkeit zu schwer erreichbaren Punkten. Somit erweist sich das Vierergespinn von Reichweite, Mobilität, Gewicht und Größe als signifikant relevante Faktoren für die Baustellenangemessenheit des Roboterarms.

2. Begrenzte Anwendungsspanne. Ausgenommen von wenigen Projekten werden industrielle Roboterarme in der Architektur nur für das Exekutieren von Teilaufgaben benutzt. Dies orientiert sich an ihrer ursprünglichen Rolle als Fließbandakteure im Industriebereich. Der Einsatz von Industrierobotern als permanentes Werkzeug, das in allen Bauprozessen und -phasen innerhalb desselben Projektes eingesetzt und somit zu einem Hauptakteur und Verbindungselement eines kontinuierlichen Bauprozesses wird, befindet sich noch in seinen Anfängen.

Der Forschungspavillon 2012, entwickelt aus der Zusammenarbeit des Institutes for Computational Design (ICD) und des Instituts für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE), beide an der Fakultät für Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart, illustriert diese neue Vorgehensweise. In einem kontinuierlichen Prozess werden Glas- und Kohlenstofffasern durch eine Fabrikationstechnik, welche sich eines KUKA Roboters bedient, zu einem

eigenständigen Pavillon miteinander verflochten. Der Fabrikationsprozess ist kontinuierlich: auf einem vorgefertigten Gerüst appliziert der Roboter die unterschiedlichen Fasertypen, bis die festgelegte Entwurfsform erreicht wird. Es entsteht dabei eine Monocoque-Schale, die trotz ihrer nicht-euklidischen Geometrie keiner Gussformen oder Schalung bedarf, wobei die Verteilung der Fasern einem aus der Biologie abgeleiteten Prinzip folgt.<sup>435</sup> Dieses Verfahren wurden bei dem ICD/ITKE Folgepavillon 2013/2014 weiterentwickelt, indem die biomimetischen Prinzipien der Materialverteilung beibehalten, aber die robotische Fabrikationsstrategie auf ein modulares System übertragen wurde. Der Übergang von der gesamtheitlichen Fabrikation zu einer modularen Fertigung lässt sich als Lösungsansatz zur Überwindung der begrenzten Reichweite des Roboterarms lesen.<sup>436</sup> Im Vergleich zum Vorgängerpavillon wird jedoch der kontinuierliche Fertigungsprozess unterbrochen, wobei man von zwei separaten Phase sprechen kann, Fertigung und manuelle Montage.

Bei den meisten Strukturen bei denen Industrieroboter zum Einsatz kommen, werden Teilbereiche, separate Elemente oder Module robotisch hergestellt, wobei dann deren Montage auf der Baustelle manuell erfolgt. Bei diesen Vorgehensweisen handelt es sich um eine robotisierte Vorfabrikation und nicht um einen zusammenhängenden Fabrikations- und Konstruktionsprozess. Als Beispiele hierfür lässt sich der ICD/ITKE Forschungspavillon 2011 nennen. In diesem Fall wurde eine robotische Fertigungsstrategie entwickelt, bei der der Industrieroboter zum Fräsen aufwändiger Fingerzinkungen an Sperrholzplatten benutzt wird. Als Vorlage für die Art und Ausführung der Zinken diente das Plattenskelett des Seeigels.<sup>437</sup> Die manuelle Herstellung dieser Holzverbindung für eine Freiformflächengeometrie wäre sowohl ineffizient als auch äußerst schwer durchführbar, berücksichtigt man die alternierenden Fräswinkel, die sich aus der komplexen Geometrie ergeben. Ein anderer Ansatz besteht darin Roboterarme zu Montagezwecken innerhalb einer Aufbausequenz zu benutzen. Als Beispiel hierfür lässt sich die bereits beschriebene Projektserie *Die programmierte Wand* anführen. Es handelt sich hierbei um eine Serie von Wandelementen bestehend aus Ziegeln. Bei dieser additiven Fabrikationsmethode montiert ein Roboterarm die einzelnen Ziegelemente vorgegebenen Anleitungen folgend.

---

<sup>435</sup> Vgl. Parascho, S., Knippers, J., Dörstelmann, M., Prado, M., Menges, A.: „Modular Fibrous Morphologies: Computational Design, Simulation and Fabrication of Differentiated Fibre Composite Building Components“ In: Block, P., Knippers, J., Mitra N.J., Wang, W. (Hrsg.): „Advances in architectural Geometry 2014“, Springer, Heidelberg, 2015, S.31

<sup>436</sup> Vgl. Parascho, S., Knippers, J., Dörstelmann, M., Prado, M., Menges, A.: „Modular Fibrous Morphologies: Computational Design, Simulation and Fabrication of Differentiated Fibre Composite Building Components“ In: Block, P., Knippers, J., Mitra N.J., Wang, W. (Hrsg.): „Advances in architectural Geometry 2014“, Springer, Heidelberg, 2015, S. 44

<sup>437</sup> Vgl. Knippers, J., Gabler, M., La Magna, R., Waimer, Menges, A.: „From Nature to Fabrication: Biomimetic Design. Principles for the Production of Complex Spatial Structures“ In: Hesselgren, L., Sharma, S., Wallner, J. (Hrsg.): „Advances in Architectural Geometry 2012“, Springer, Wien, 2013, S. 107 ff.



22. Gesamtstruktur, ICD/ITKE Pavillon 2012

23. Fertigungssequenz Industrieroboter und Gerüst, ICD/ITKE Pavillon 2012

Aus der Festlegung dieser Beobachtungen wurden die nachfolgenden Objektiv für das Forschungsprojekt formuliert:

1. Das Hauptziel liegt in der Entwicklung einer robotischen Fabrikationsstrategie, welche potentiell alle Bauprozesse und -phasen umfassen kann und für den Baustelleneinsatz geeignet ist.
2. Die zweite Anforderung setzt sich mit dem Thema der Größe und des Gewichts auseinander, also dem Maßstab der Maschine. Anders als bei den industriellen Roboterarmen, sollen die zu entwickelnden Maschinen folgende Merkmale aufweisen: Leichtbau, kleine Dimensionen und autonome Mobilität. Das Erfüllen dieser Kriterien führt zur Entwicklung flexibler und leicht manövrierfähiger Maschinen. Die verkleinerte Größe und das reduzierte Gewicht dürfen sich allerdings nicht beschränkend auf die Fähigkeit dieser Roboter, Gebilde eines normalen Maßstabs zu konstruieren, auswirken.
3. Nachhaltigkeit bezogen auf Materialgebrauch bildet die dritte Zielsetzung. Berücksichtigt man die steigende Neigung zum Bau von gekrümmten Geometrien, sollte die entwickelte Strategie die Baubarkeit von sowohl linearen und als auch nichtlinearen Geometrien adressieren und gewährleisten. Das Bauen gekrümmter Flächen oder Volumen beinhaltet die Herausforderung der Handhabung baulich-konstruktiver Problematiken. Ein wichtiger Aspekt dabei ist die Notwendigkeit komplizierter Baugerüste oder die aufwendige Ausführung von Guss- oder Schalungsformen, was in einer erhöhten Material- und Energieverwendung resultiert. Das Reduzieren des energetischen Fussabdrucks, Materialaufwands und Zeitkonsums kann erreicht werden, indem ein Bauverfahren entworfen wird, das nicht auf Baugerüste, Schalungen oder Pressformen angewiesen ist.

## **7. Robotische Konstruktionsstrategie**

Vorausgehend ist es wichtig anzugeben, dass der Fokus innerhalb dieser Arbeit auf die methodologische Entwicklung einer Fabrikationsstrategie und den zur Umsetzung notwendigen Werkzeugen, in diesem Fall Roboter, gelegt wird. Das Auftreten einer sich intensivierenden Neigung zum Entwickeln totalitärer, parametrischer Strategien, die sich sowohl bei Architekten als auch Ingenieuren bemerkbar macht, wird vom Theoretiker Antoine Picon signalisiert. Er bewertet dies als ein Symptom der stetig wachsenden Rechenkapazität von Computern und Leistungsfähigkeit von Softwarepaketen, die aufwendige Berechnungsleistungen seitens des Benutzers überflüssig machen, so dass zwangsweise dessen Blick in eine andere Richtung gelenkt wird.<sup>438</sup> Es findet ein Verlagern der Kernkompetenz statt, von der Spezialisierung auf Teilaspekte zur gesamtheitlichen Organisation verknüpfter

---

<sup>438</sup> Picon, A.: „Digital Culture in Architecture. An Introduction for the Design Professions“, Birkhäuser Verlag, Basel, 2010, S. 163.



24. Manuelle Montage der robotisch gefertigten Module, ICD/ITKE Pavillon 2013/2014  
25. Robotische Fabrikation der Module, ICD/ITKE Pavillon 2013/2014

Prozesse. Dies stellt mit Sicherheit einen gültigen Erklärungsansatz dar, dabei werden aber wichtige Einflussfaktoren vernachlässigt. Diese Verlagerung des Interessenschwerpunkts zur Entwicklung von Gesamtstrategien ist mindestens an zwei weitere Sachverhalte gekoppelt. Als ein wesentlicher Faktor lässt sich die digital bedingte, geometrische Komplexität, die sich in dem Auftreten von nicht-standard Geometrien äußert, aufzählen. Das Generieren solcher Formen verlangt auf imperative Weise nach der simultanen Entwicklung einer Realisierungsstrategie, da die Parameter der konstruktiven Baubarkeit der Relevanz der Entwurfsparameter gleichgestellt sind. Der zweite Aspekt, der von Picon vernachlässigt wird, ist die Bezugnahme der Architekturdiziplin auf die Wiederentdeckung der Vorbildfunktion biologischer Systeme und auf die Forschungsentwicklung in den Bereichen der Materialforschung und Technik. Das sinnvolle Implementieren benötigt eine Kohärenz des Kontexts, die nur dann gegeben sein kann, wenn eine gegenseitige Abstimmung der Teilsysteme besteht. Ein einzelnes und isoliertes Implementieren würde sich als gegenstandslos erweisen. Als Beispiel hierfür lässt sich Oxmans VPRP-VPM-System nennen. Das Übernehmen biologischer Materialverteilungsstrategien per se ergibt keinen Sinn, wenn diese nicht gleichzeitig an funktionelle Kriterien gebunden sind, die wiederum aus dem Entwurf selber abgeleitet werden. Somit muss zum Erreichen eines logischen prozessualen Zusammenhangs eine Gesamtstrategie verfolgt werden.

Auch im Fall dieses Forschungsprojekts wurde das Ziel angestrebt eine robotische Fabrikationsstrategie zu entwickeln, die Aspekte des Entwurfs, der konstruktiven Optimierung, der Baustellenfabrikation und des Materials in sich integriert. Die Arbeit konzentriert sich auf das Hervorheben der Relevanz von selbst entwickelten Technologien, seien es Roboter oder technische Werkzeuge anderer Natur, und die Bedeutung der Wechselbeziehung zwischen Architekt, Maschine, Material und Entwurf. Aufgrund dieser Vorgehensweise wird auf die Angabe profunder technischer Details bezüglich des Maschinenbaus und der technischen Ausführung verzichtet. Die Relevanz dieser Fallstudie für das Thema der digitalen Handwerklichkeit entspringt aus dem methodologischen Vorgehen und dem untersuchten Mehrwert, welcher sich aus der Einbindung des Architekten in sämtliche Prozesse ergibt, vom Entwurf zur technischen Entwicklung von Maschinen bis hin zu Materialforschung und Konstruktion. Derselben Argumentation folgend, wird die Frage der Ästhetik ausser Acht gelassen. Bei der in den folgenden Bildern veranschaulichten Struktur, wurde die Form bewusst minimal gehalten. Die gewählte bauliche Form stellt kein Plädoyer für eine bestimmte Formensprache dar. Ästhetik wird als ein Bereich betrachtet, der sich abseits der technologisch-konstruktiven Betrachtungen befindet. Denn Fertigungsverfahren und Material können je nach Entwerfer zur Realisierung unterschiedlicher Ästhetiken oder Baustile eingesetzt werden und resultieren aus einem komplexen Gefüge theoretischer und angewandter Unternehmungen. Die entwickelte Technologie sollte im Mittelpunkt der Betrachtung stehen, ohne dass die Bewertung dieser von formal-ästhetischen Beurteilungen beeinflusst werden sollte.



26. Gesamtstruktur, ICD/ITKE Pavillon 2011

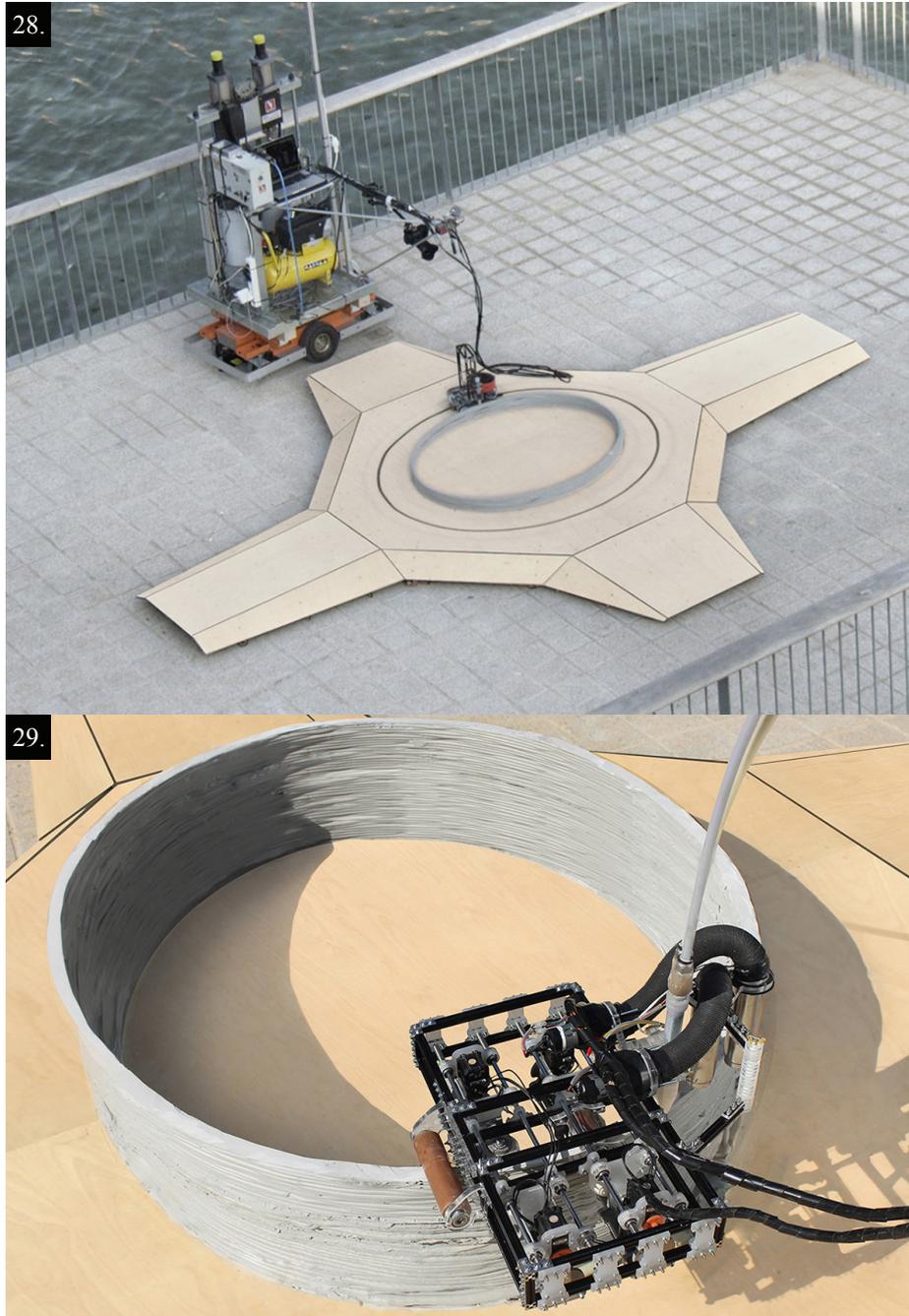
27. Robotische Fertigung der Fingerzinkungen, ICD/ITKE Pavillon 2011

Um die im Voraus genannten Kriterien erfüllen zu können, basiert die ausgearbeitete Fabrikationsstrategie auf der Entwicklung einer Serie von mobilen Robotern. Diese Roboter können unabhängig voneinander agieren, so dass das präterminierte Erfüllen von separaten funktionellen Anforderungen sichergestellt wird und durch den Architekten oder Entwerfer präzise kontrolliert werden kann. Die Serie der *Minibuilders* besteht aus drei Robotern, welche für die Baubarkeit und Umsetzung einer entworfenen Form gewährleisten. Bezüglich ihrer Operationsweise und der technischen Ausbildung repräsentieren diese eine hybride Form zwischen Roboter und 3D-Drucker. Während die technische Ausprägung die eines Roboters entspricht, korrespondiert das integrierte Materialverteilungssystem in seinen prozesstechnischen Eigenschaften mit der Funktionsweise von 3D-Druckern.

Die entwickelte Strategie beruht auf die Unterteilung der sich auf der Baustelle abspielenden Prozesse in drei wesentliche Phasen, gemäß funktioneller Anforderungen. Bei dem hier vorgeschlagenen Phasenmodell und somit auch Baumodell handelt es sich um eine konsekutive Abfolge, wobei jede Phase mit dem Einsatz eines anderen Roboters korreliert. Die drei Phasen entsprechen dem Bau einzelner architektonischer Grundelemente: Fundament, Wand und statische Aussteifung.

Bei dem ersten eingesetzten Roboter handelt es sich um den *foundation robot* bzw. Fundament-Roboter. Die ersten zehn bis fünfzehn Schichten der zu bauenden Struktur werden von dem Fundament-Roboter errichtet. Nachdem die Errichtung des Fundaments abgeschlossen ist, folgt die zweite Phase und somit erfolgt der Einsatz des *grip robot* bzw. Wand-Roboters. Dieser fährt mit der schichtweisen Materialverteilung fort bis die entworfene Form fertiggestellt ist. Während der Fundament-Roboter sich nur am Boden entlang bewegen kann, muss der Wand-Roboter manuell auf die im Voraus gebauten Fundamentschichten platziert werden. Entsprechend seiner zu erfüllenden Aufgabe, entspricht der Wand-Roboter typologisch betrachtet einem Kletterroboter. Nach seiner manuellen Platzierung an der geeigneten Position bewegt sich dieser Roboter vorwärts, indem er sich an den bereits bestehenden Schichten hochdrückt und währenddessen kontinuierlich die neuen Bauschichten aufträgt. Bei dem eingesetzten Material handelt es sich um ein schnell trocknendes Zwei-Komponenten-Harzsystem. Das Aushärtungsverhalten des Materials kann durch Hitzezufuhr massgeblich beschleunigt werden, so dass der Kletterroboter mit einem zweifachen Heizgerät ausgestattet ist. Da der Wand-Roboter sich auf die zuvor gebauten Schichten stützt um seiner Bewegungslaufbahn zu folgen, setzt dies das komplette Aushärten dieser Schichten voraus. Die Aktivierung der Heizgeräte stellt somit die rechtzeitige Verfestigung der Schichten und das Erreichen der notwendigen statischen Stabilität sicher, damit der Wand-Roboter unbehindert seine Bewegungsabläufe fortführen kann. Der Wand-Roboter ist der Roboter welcher den Hauptteil der baulichen Aufgabe übernimmt.

Da sowohl Fundament- als auch Wand-Roboter die Materialschichten in einer horizontalen Ebene ablagern, wird jedes gebaute Gebilde, unabhängig von seiner Form, eine beschränkte statische Stabilität aufweisen. Dies lässt sich auf das Fehlen vertikaler Bewehrung oder Aussteifung zurückführen. Um diesem Effekt



28. Druckvorgang der ersten Fundamentschichten, Foundation Robot, Minibuilders  
29. Anfangsphase des Druckvorgangs, Grip Robot, Minibuilders

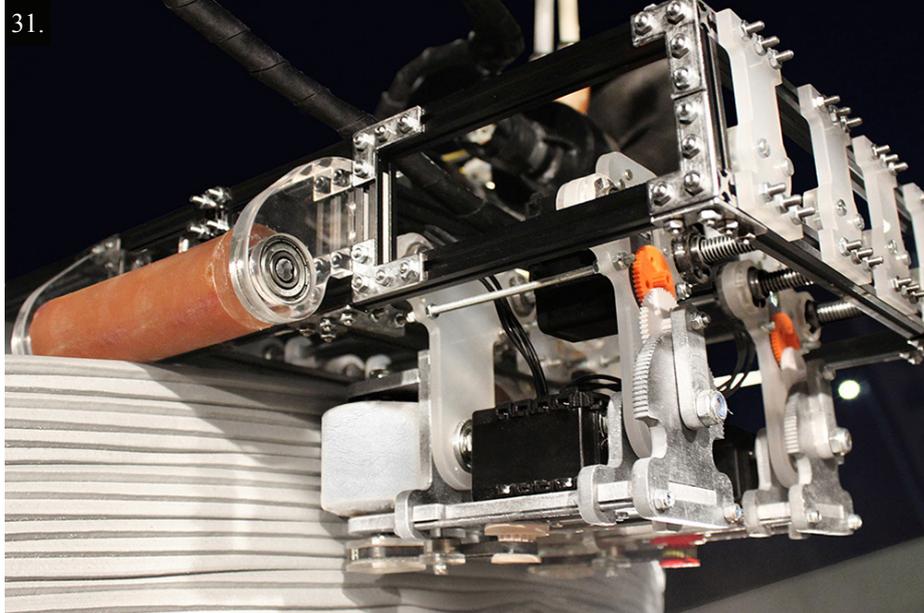
entgegenzuwirken und die statische Festigkeit zu erhöhen, müssen vertikale Verstärkungen entlang der horizontalen Bauschichten hinzugefügt werden. Die dritte Phase adressiert diese Problematik und widmet sich der statischen Aussteifung. In dieser Stufe wird der *vacuum robot* bzw. Vakuum-Roboter eingesetzt. Während die anderen beiden Roboter sich in der horizontalen Ebene bewegen, ist dieser Roboter für vertikale Bewegungsabläufe prädestiniert. Wie es bereits der Name andeutet, erzeugt der letzte Roboter ein Vakuum zwischen sich selbst und der Oberfläche entlang derer er sich fortbewegt. Ähnlich wie bei seinem Vorgänger, muss auch der Vakuum-Roboter manuell auf der Oberfläche platziert werden, um sich anschließend vertikal entlang dieser zu bewegen und so die benötigten Aussteifungsschichten abzulagern.

### **Materialzufuhr und Strategie der Materialverteilung**

Alle drei *Minibuilder* sind mit einem externen, industriellen Extruder verbunden. Der Extruder ist mit zwei getrennten Behältern ausgestattet. Die Behälter beinhalten Sondernmischungen eines Zwei-Komponenten Harzsystems, das speziell von der Projektgruppe für diese Bauaufgabe und die verwendeten Roboter entwickelt wurde. Die Entwicklungsprozesse vom Material und von den Robotern haben parallel stattgefunden, so dass die Materialeigenschaften den Erfordernissen der Maschine entsprechen und vice versa. Diese reziproke Feinabstimmung ermöglicht eine ausgeweitete Optimierung eines störungsfreien Prozessablaufs.

Als Arbeitsmaterial wurde ein Zwei-Komponenten-Harzsystem gewählt. Da es sich bei der gewählten Fabrikationsart um ein additives Extrusionsverfahren handelt, bedarf es eines extrusionsfähigen Materials, wodurch sich übliche Konstruktionsmaterialien wie Holz, Naturstein oder vorgefertigte Elemente wie Ziegel oder Metallelemente ausschließen lassen. Diese grundsätzliche Wahl lässt sich durch ein weiteres Kriterium begründen, der aktiven Manipulierbarkeit des Materials durch den Forscher. Das Materialverhalten von Holz, als ein natürlicher Baustoff, lässt sich nur begrenzt steuern. Durch die Zufuhr von Feuchtigkeit oder Wärme kann das Verhalten zwar begrenzt beeinflusst und gesteuert werden, auf molekularer Ebene lässt sich jedoch nicht eingreifen. Durch die Wahl für ein Harzsystem ist es möglich das Material auch auf molekularer Ebene kontinuierlich zu verändern, indem das Mischverhältnis während des Extrudierens verändert wird. Die Änderung des Mischverhältnisses lässt sich durch die Veränderung des Extrusionsdrucks bei den zwei Behältern bewirken. Innerhalb desselben Vorgangs entstehen so Abschnitte unterschiedlicher Materialkompositionen.

Eine Serie von Materialtests wurde durchgeführt, bei denen das Materialverhalten unter wechselnden externen Einflüssen und bei alternierenden Mischverhältnissen beobachtet wurde. Zunächst betrachtet wurde die Wechselbeziehung zwischen dem Mischverhältnis der zwei Komponenten und der Aushärtezeit. Weitere Experimente haben sich mit der Relation zwischen der externen Zufuhr von Hitze, der Dauer der Exposition, der Aushärtezeit und Materialsteifigkeit auseinandergesetzt. Kunstharze gehören der Kategorie der Kunststoffe an und werden in der Bauindustrie überwiegend als Klebstoff eingesetzt. Aufgrund ihrer chemischen Komposition sind



30. Zwischenphase des Druckvorgangs, Grip Robot und Industrieextruder, Minibuilders  
31. Nahaufnahme vom Bewegungsmechanismus, Grip Robot, Minubuilders

sie nicht zum Bau von statisch hoch belastbaren Konstruktionen geeignet. Um die Materialbelastbarkeit zu erhöhen, wurde die Harzmischung um eine dritte Komponente ergänzt. Feiner Marmorsand wurde der Mischung beigefügt, so dass sich die konstruktive Stabilität und Belastbarkeit erhöhen.

Die Komponenten werden jeweils separat mit dem Marmorsand vermengt und anschließend in die Behälter des Extruders umgefüllt. Der beigemischte Marmorsand reagiert nicht mit den einzelnen Komponenten und beeinflusst auch nicht das weitere gegenseitige Reaktionsverhalten. Während des Extrudierens werden die zwei Komponenten in einem statischen Mixer miteinander vermischt und werden über den Extrusionsschlauch an den verbundenen Roboter weitergeleitet. Dieser verteilt das Material als aufeinanderfolgende Schichten.

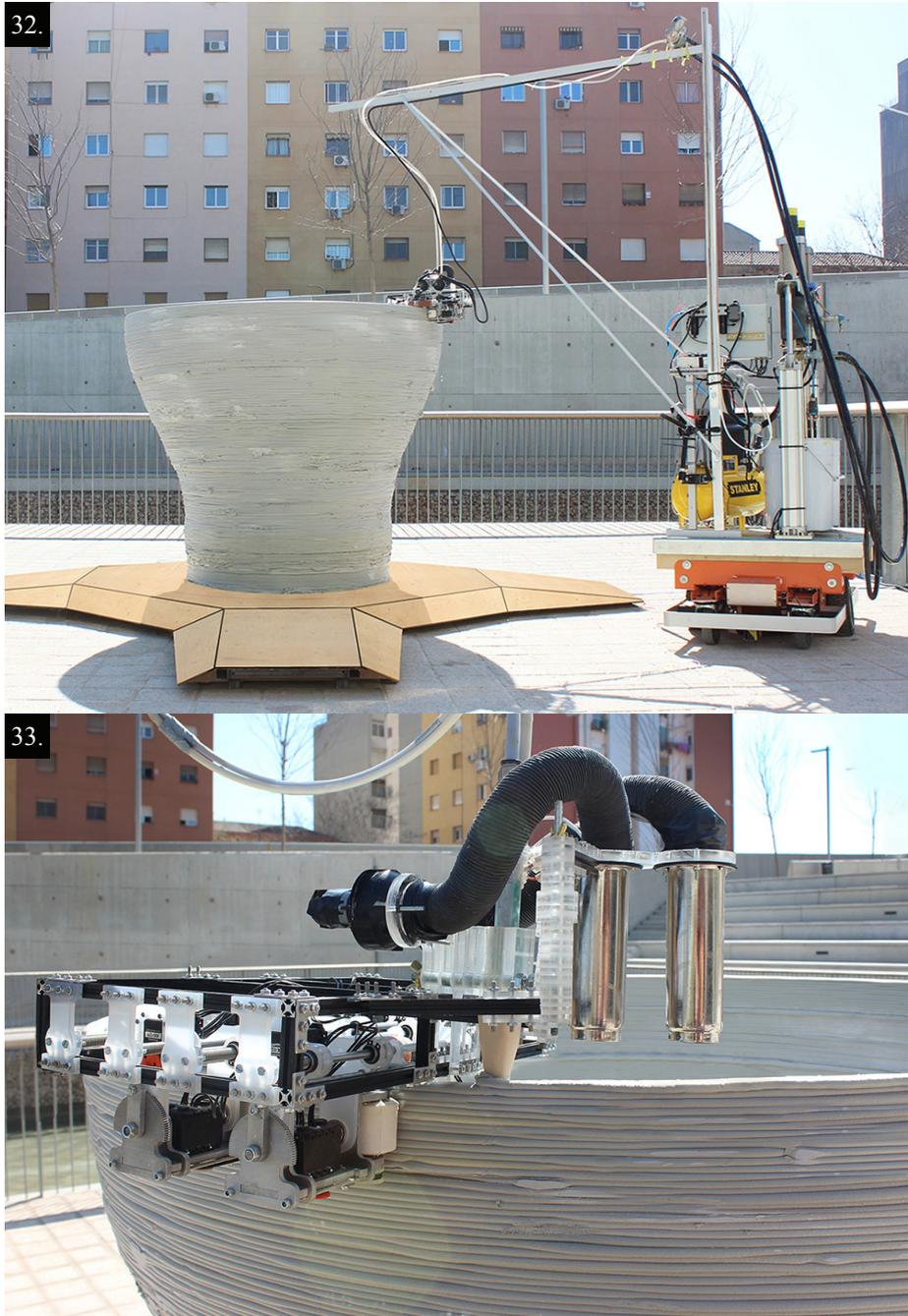
Die Materialexperimente wurden zunächst als reine Mischexperimente durchgeführt, um ein geeignetes Mischverhältnis der zwei Harzkomponenten mit dem Marmorstaub festzulegen. Anschließend wurden die Materialexperimente mit einem von der Forschungsgruppe eigens angefertigten Extruder durchgeführt. In seinem Aufbau gleicht dieser selbstgefertigte Extruder einer technisch vereinfachten Form eines Industriextruders. Dieser Testextruder besteht in seinen wesentlichen Teilen aus einem Antriebsmotor, einem stabilisierenden Rahmen und zwei Behältern, welche mit den jeweiligen, bereits mit Marmorsand vermengten, Harzkomponenten aufgefüllt wurden. Der Testextruder diente dazu, das Extrusionsverhalten des Materials, unter Berücksichtigung alternierender Extrusionsraten, also der Extrusionsgeschwindigkeit, zu beobachten. Durch eine Vielzahl von Experimenten mit variierender Extrusionsgeschwindigkeit, konnte ein optimaler Wert für diese bestimmt werden. Daran lässt sich die Abhängigkeit von Material und Maschine erkennen und die Notwendigkeit deren Abstimmung aufeinander beurteilen.

Ein weiterer Aspekt, der bei der Durchführung der Experimente Beachtung fand, war die Schichtendicke. Diesem Faktor wurde eine Wichtigkeit aus form-ästhetischer Sicht zugesprochen. Ähnlich wie bei anderen 3D-Druck-Verfahren steht die Schichtdicke in direkter Relation zu der Präzision der Bauteilkontur.<sup>439</sup> Die Ausführung der Schichten, bezüglich ihrer Materialstärke, wirkt sich auf die Oberflächenmaterialität aus und hat unterschiedliche Effekte zur Folge. Bei einer hohen Schichtdicke muss die Bauteilkontur an Genauigkeit und Prägnanz einbüßen. Je höher die Schichtdicke, desto abgestufter erscheint das Gesamtbild.

Gekrümmte Oberflächen können ohne das Verwenden einer Unterkonstruktion gefertigt werden. Durch das Ausnutzen der Materialeigenschaft von Harzsystemen lässt sich das erreichen. Die gegenseitige Adhäsion der Oberflächen zwischen konsekutiven Schichten ist so hoch, dass ein teilweises Überlappen der Schichten genügt, um eine konstruktive Krümmung der gebauten Struktur zu ermöglichen. In diesem Sinne lässt sich die Vision eines schalungsfreien Bauens erahnen.

---

<sup>439</sup> Vgl. Westkämpfer, E., Warnecke, H.: „Einführung in die Fertigungstechnik“, Teubner Verlag/ GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2006, S. 254.



32. Endphase des Druckvorgangs, Grip Robot und Industriextruder, Minibuilders

33. Nahaufnahme von Extrusionsdüse und Heizelementen, Grip Robot, Minibuilders

Die angewandte robotische Druckstrategie bei den *Minibuilders* und die Betriebsweise eines konventionellen 3D-Druckers ähneln sich in ihrer konzeptionellen Natur, differieren aber bezüglich der Art der Materialablagerung. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher 3D-Druckmethoden, von dem FDM - Fused Deposition Modelling bis hin zum selektiven Lasersintern. Wie zu Anfang des Kapitels erklärt, basieren die erwähnten Verfahren auf dem gemeinsamen Prinzip des parallelen Querschnittaufbaus.

### **Zukünftige Entwicklungsfelder**

Ein erster Schritt in der weiteren Entwicklung der präsentierten Fallstudie liegt in der Verbesserung und Verfeinerung der funktionsorientierten Unterteilung entsprechend einer differenzierteren Klassifizierung architektonischer Elemente. Nur Fundament, Wände und Aussteifungen wurden innerhalb dieses Forschungsvorhabens adressiert, was einer ersten sehr groben Gliederung entspricht. Die systematische Liste architektonischer Elemente, bezogen auf ihre verschiedenen Funktionalitäten, ist weitaus feingliedriger. In einer umfassenden Studie, die angesichts der Architekturbiennale erstellt wurde, identifiziert der Architekt Rem Koolhaas 15 verschiedene Elemente in der Architektur, vom Fenster zur Decke bis hin zur Wand, Treppe und Bodenelementen.<sup>440</sup> Das Erweitern des Betrachtungsfeldes, indem man zwischen Außen- und Innenelementen unterscheidet und somit die verschiedenen funktionellen Ansprüche bedient, würde in einer Mehrzahl spezialisierter Roboter resultieren. Eine erweiterte funktionelle Unterteilung resultiert in einer Spezialisierung und Optimierung der Fabrikationsprozesse und -phasen.

Daran anlehnend liegt eine umfangreiche Entwicklungsoportunität in der gegenseitigen Koordination und dem Informationswechsel zwischen den einzelnen Robotern, gemäß dem Vorbild von Schwarmrobotern bzw. swarm robotics. Die Schwarmrobotik greift die Grundlagenforschung der Schwarmintelligenz auf und transferiert die identifizierten Verhaltensmuster und -regeln von Schwärmen auf robotische Systeme. Kontrollierte physische Koordination eines multiplen Robotersystems ist das Ziel.<sup>441</sup> Die Schwarmintelligenz bezeichnet eine Forschungsdisziplin, welche sich mit der Entwicklung von Multi-Agenten-Systemen beschäftigt und als Grundlage das Schwarmverhalten von biologischen Modellen, wie Ameisen-, Vogel- oder Bienenschwärmen, studiert.<sup>442</sup> Im Fall der Schwarmrobotik wird auf eine Schwarmintelligenz abgezielt, welche die abgestimmte Koordinationen von zahlreichen Einzelaktionen zum sinnvollen und effektiven Organisieren und Steuern eines Gesamtverhaltens gewährleistet. Überträgt man diese Prinzipien auf ein

<sup>440</sup> Vgl. Koolhaas, R. (Hrsg.): „Fundamentals Catalogue: 14th International Architecture Exhibition- La Biennale di Venezia“, Marsilio, Venedig, 2014, S. 193.

<sup>441</sup> Vgl. Sahin, E., Girgin, S., Bayındır, L. und Turgut, A.: „Swarm Robotics“ In: Blum, C., Merkle, D. (Hrsg.): „Swarm Intelligence Introduction and Applications“, Springer, Berlin Heidelberg, 2008, S. 87.

<sup>442</sup> Vgl. Blum, C., Li, X.: „Swarm Intelligence in Optimization“ In: Blum, C., Merkle, D. (Hrsg.): „Swarm Intelligence Introduction and Applications“, Springer, Berlin Heidelberg, 2008, S. 43.



34. Ablagerung der vertikalen Aussteifungsschichten, Vacuum Robot, Minibuilders

multiple Robotersystem eröffnet sich die Möglichkeit von parallel ablaufenden Fabrikationsprozessen, welche untereinander koordiniert sind, so dass es nicht der separaten Steuerung von einzelnen Robotern bedarf, sondern einer gesamtheitlichen Koordination.

Eine weitere Verbesserungsvariante dieser Technologie liegt in dem Erweitern der Materialauswahl. Zum Erreichen dieses Ziels kann das *Variable-Property Rapid Prototyping*<sup>443</sup> als indikatives Paradigma dienen. Bei diesem Verfahren werden multiple Materialien eingesetzt, welche von der Maschine innerhalb eines fortlaufenden Vorgangs variierend abgelagert werden können. Diese Variation in der Materialwahl hängt von den spezifischen statischen oder funktionsorientierten Anforderungen des zu druckenden Bereichs ab. Während bei Oxman die Bemühung betrieben wird, dass ein Roboter bzw. eine Maschine so viele Funktionen wie möglich übernehmen kann und in ihm integriert sind, verfolgt das Projekt *Minibuilders* den Ansatz des klaren funktionellen Separierens der Roboter.

Eine zusätzliche Verbesserung der Technologie liegt in der Ausdehnung dieser additiven Fertigungsmethode. Das Potenzial liegt in der Ergänzung der Methode um die Möglichkeiten subtraktiver Verfahrensweisen. Die subtraktive Fertigungstechnik steht in direkter Korrelation mit Fehlerbehebungsmechanismen. In dem Fall von fehlerhaften Schichten oder eines nicht korrekten Auftragens von Material bedarf es eines manuellen Eingreifens. Dieses setzt eine Unterbrechung der Prozessabläufe voraus, wobei das Resultat der menschlichen Intervention nur bedingt über die qualitative Präzision des Roboters verfügt. Daraus ergibt sich auch eine Steigerung der Materialeffizienz, denn falsch verbautes Material, das vor Ort und zeitnah entfernt wird, kann wiederverwendet werden.

Darüber hinaus, betrachtet man die Forschungsprojekte von Skylar Tibbits als Leiter des Self-Assembly Labs am Massachusetts Institute of Technology, lässt sich eine weitere Entwicklungsrichtung aufzeigen. Bei den rezentesten Forschungsvorhaben des Labors beschäftigt man sich mit dem Technikkonzept des 4D-Drucks (4D-Printing). Dieses visionäre Forschungsvorhaben zeichnet eine erstrebenswerte Steigerungsebene auf. Das Prinzip des 4D-Drucks, ähnelt dem des 3D-Druck-Verfahrens unter dem Miteinbeziehen einer vierten Dimension, der zeitlichen Veränderbarkeit. Es handelt sich um Multiple-Material-Drucke mit der Eigenschaft sich an ihren veränderbaren Kontext über Formveränderungen anzupassen. Die Objekte, die aus dem 4D-Druck-Verfahren resultieren, sind so programmiert, dass sie im Verlauf der Zeit ihre Struktur ändern können. Die Fähigkeit der strukturellen Transformation wird mittels Magneten oder Nitinoldraht ermöglicht. Die Fertigung adaptiver, dynamischer und intelligenter Strukturen ist das erklärte Ziel.<sup>444</sup> Diese

---

<sup>443</sup> Oxman, N.: „Material-Based Design Computation“, Massachusetts Institute of Technology, 2010, S. 278 ff., abrufbar unter: <http://hdl.handle.net/1721.1/59192>, (Stand 10.12.2014).

<sup>444</sup> Vgl. Tibbits, S.: „4D Printing“ In: „Sheil, B. (Hrsg.): „Zero Tolerance in Design and Production AD“, Architectural Design, No. 227, John Wiley and Sons, 2014, S. 119 ff.

Technologie befindet sich noch in einer frühen Entwicklungsphase, aber erfolgreiche Tests mit Prototypen wurden bereits verzeichnet. Die Möglichkeit ein Gebäude unter dem Einsatz solcher Roboter eröffnet neue Perspektiven für das Bauen und die Architektur und hätte das Potenzial tatsächlich zu einem allumfassenden Paradigmenwechsel betreffend der Natur des Gebauten zu führen.

## **8. Schlussfolgerungen**

Das beschriebene experimentelle Forschungsvorhaben mit der zugrunde liegenden Fabrikationsstrategie veranschaulicht auf schematische Art eine interdisziplinäre Arbeitsweise und eine methodologische Vorgehensart, welche sich auf ein Zusammenlegen von mehreren Aktivitätenfeldern für den Entwerfer oder die Entwurfsgruppe bezieht. Gleichwohl werden die Vorteile des interdisziplinären Arbeitens auf diesen Ebenen beleuchtet. Dabei muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass die vom Forschungsteam erhaltene wissenschaftliche Unterstützung, seitens der Forschungseinrichtung und dem Personal, ebenfalls von einem grundlegenden interdisziplinären Charakter geprägt war.

### **Interdependenz**

Während des Projekts Minibuilders hat sich die Forschergruppe mit den Bereichen der Materialforschung und -entwicklung, des Maschinenbaus, der Informatik, der Fabrikation und Architektur auseinandergesetzt. Die Prozesse des Auseinandersetzens mit Aspekten, welche diesen zuvor aufgezählten Fachbereichen entstammen fand nicht etappenweise statt, sondern simultan. Um die festgelegte Fabrikationsstrategie erfüllen zu können, war es weder möglich, noch wäre es sinnvoll gewesen die Forschungs- und Arbeitsabläufe in strikt getrennte Etappen zu unterteilen. Bei den hier angesprochenen Arbeitsphasen handelt es sich im Wesentlichen um die Materialexperimente, den Bau der Roboter, das Definieren der Materialverteilungsart und das Programmieren der Software. Diese parallel stattfindenden Phasen sind voneinander abhängig und informieren sich gegenseitig. Somit kann man von einem kontinuierlichen Informationskreislauf sprechen. An dieser Stelle ist es wichtig erneut festzuhalten, dass der Ausgangspunkt dieses Forschungsprojekts in der Festlegung und dem Definieren einer klaren Projektagenda liegt, welche in ihrer Gesamtheit aus den Erfordernissen der Architektur entstammt und von diesen informiert wurde. Sowohl Entwurf als auch Material und Maschinen wurden entwickelt und verfeinert, um diesen Ansprüchen zu genügen.

Die Protostruktur, die mit den Minibuilders gedruckt wurde, verfügt über keine prägnanten gestalterischen Merkmale und erfüllt kein funktionales Programm, so dass das Benutzen des Wortes Entwurf in diesem Zusammenhang als irritierend erscheinen kann. Selbst bei dieser reduziert artikulierten Form musste Bezug auf die Druckmethode, Material und Maschine genommen werden. Die Höhendefinition der Schichten, die Auflösung der geometrischen Krümmung und die Wandstärke selber stellen Parameter da, die berücksichtigt werden mussten. Daher lässt sich behaupten,

dass je klarer der Entwurf ausformuliert ist und mit seiner steigenden geometrischen Komplexität, desto betonter und ausgeprägter bildet sich auch die Interdependenz der Parameter untereinander aus.

### **Code und Programmieren**

Das Programmieren bzw. die Fähigkeit des Programmierens hat bei der Abwicklung dieses Projekts eine essentielle Rolle eingenommen. Das Vorgeben von vordefinierten Bewegungsabläufen, die kontrollierte Materialverteilung, die Steuerung der einzelnen Roboter, das Vorgeben der Bewegungspfade, die Durchführung all dieser Aktionen setzt die Anwendung einer Programmiersprache voraus. Ähnlich wie bei Gramazio und Kohler formuliert, kann das Programmieren als Schlüssel zum selbstständigen Entwerfen von Prozessen gesehen werden. Die zunächst auf einer konzeptionellen Ebene entwickelte Fabrikationsstrategie berücksichtigt in ihrer Ausprägung die Logik und die Notwendigkeiten der Baustelle. Diese festgelegte Logik entspringt der Auseinandersetzung mit den Nachteilen und Problemen, die aus dem Benutzen additiver Fabrikationsstrategien und Industrierobotern in der Praxis entspringen.

Die Kontrolle über die Phasen des Bauprozesses, über Form und Geometrie, über die Minibuilders selber verlangen nach einem vernünftigen Grad des Beherrschens des Programmierens und ebenso nach interdisziplinären Arbeitskonfigurationen. Es muss aber signalisiert werden, dass ein Vorhaben, das den Dimensionen der beschriebenen Fallstudie entspricht, problemlos von Architekten durchgeführt werden kann. Werden ein gewisser Maßstab und eine Komplexität überschritten, bedarf es externer Unterstützung von Spezialisten in diesen Bereichen. Es wird nicht die Ansicht vertreten, dass Architekten sich zu Programmierern entwickeln müssen oder sollen. Zudem ist es nicht realistisch den Anspruch zu erheben, dass der Entwerfer sowohl über eine ausgereifte architektonische, kybernetische und maschinenbauliche Ausbildung verfügt. Ähnlich wie beim Baumeister-Paradigma wird eine umfassende Beschäftigung mit diesen zwei zusätzlichen Fachbereichen vorgeschlagen, so dass der Architekt in alle planerischen Aspekte eingebunden ist und über das erzielte Fachwissen befähigt ist, informierte Äußerungen zu formulieren bezüglich der als notwendig empfundenen Veränderungen und die stattfindenden Prozesse zu koordinieren.

### **Roboter als Fabrikationswerkzeug**

Wie bereits erklärt wurde, steht der Ausgangspunkt und Ansatz des Projekts Minibuilders in der Problemlösung und der Optimierung des Fabrikationsprozesse auf der Baustelle durch den Einsatz von Robotern. Bezüglich dieses Ansatzes ähnelt dieses Forschungsvorhaben in seiner Konzeption dem Projekt des *contour craftings*. Hierfür wurde eine robotische Fabrikationsstrategie entwickelt. Diese basiert auf der Entwicklung eines multiplen Robotersystems. Dies passiert unter Berücksichtigung der Abhängigkeit von Material, Maschine, Entwurf, Konstruktion. Als Resultat dieser Bemühungen entstanden die Minibuilders, eine Serie von drei spezialisierten, mobilen Fabrikationsrobotern. Die Idee der Übertragung der Vorteile von Industrierobotern

findet ihren Mehrwert in der Tatsache, dass diese Bestrebungen in der Entwicklung kleiner, mobiler und leichtgewichtiger Roboter resultiert haben. Der Großteil heute auf der Baustelle eingesetzter Fabrikationstechnologien zeichnet sich durch ihre Größe und Gewicht aus. Minibuilders bringen die potenzielle Kapazität mit sich, Aufgaben dieser gewichtigen Werkzeuge zu übernehmen, ungeachtet ihres reduzierten Formats. Mobilität, ein reduziertes Format, die Abwendung von der Idee der Portalsysteme und das Leichtgewicht der Roboter stellen wesentliche Veränderungen zu den üblichen Technologien dar, die auf dem Markt verfügbar sind und bei ähnlichen Vorhaben eingesetzt wurden.

Der Architekt wird von der Position des Entwerfers zur Position des Strategen und Organisators avanciert. Dadurch dass der Architekt nicht nur als Entwerfer von Form und Bauplänen, sondern auch als Planer in dem maschinellen Entwicklungsprozess einbezogen wird, ist es möglich die gewählte Fabrikationsart den projektspezifischen Anforderungen anzupassen. Darüber hinaus ermöglicht dies die Aufstellung einer integralen Fabrikationsstrategie, welche detaillierte Aspekte bezüglich der Materialwahl, Funktionsweise der Maschine, Baustellenorganisation, Entwurfsausprägung und Bauteilfunktionalität berücksichtigt und in sich vereint. Das Involvieren des Architekten in mechanische Entwicklungsprozesse von den später zu benutzten Werkzeugen verlangt nach einem ausführlichen Wissen über das Material. Das Verständnis bezüglich des spezifischen Materialverhaltens unter alternierenden Bedingungen, wie Viskosität, Elastizität, Kriechverhalten usw. kann durch experimentelle Versuche erlangt werden. Noch relevanter, durch die Einbeziehung des Entwerfers in die Materialforschung entwickelt sich ein Verständnis für die Art und Weise wie diese Eigenschaften bei der technischen Entwicklung der Maschine zum Projektvorteil genutzt werden können. Dieser Informationskreislauf funktioniert ebenfalls in umgekehrter Richtung. Das Involvieren des Entwerfers in dem Bereich der Maschinenentwicklung ermöglicht bei der Materialentwicklung Rücksicht auf die technischen Anforderungen der Maschine zu nehmen, die Limitierungen dieser möglichst im Sinne des Entwurfs zu nutzen. Diese Art von methodologischen Prozessen resultieren in eine korrelierte Optimierung des Materials und der Maschine in Bezug auf einen spezifischen Entwurf. Die somit erarbeiteten Fabrikationsstrategien stützen sich auf Parameter, welche gleichermaßen von Entwurf, Material und Maschine bestimmt werden.

Die Fabrikationswerkzeuge werden als invariable, gegebene Entitäten betrachtet und werden beim Entwurfsprozess nicht beachtet. Sie stellen keinen relevanten Entwurfsmoment dar. Die Idee der Ausweitung des Entwurfsprozesses, abgesehen von der Formgenerierung, bezieht sich auf den Umstand, dass der Architekt sich im gleichen Maße mit Material und Maschine auseinandersetzt.

### **Handwerklichkeit durch den Roboter**

Aus Materialexperimenten gewonnene Erkenntnisse werden dem Roboter oder der selbstentwickelten Maschine in digitaler Form zugespielt und somit wieder in den

Informationskreislauf eingeführt. Der oft erwähnte Verweis, dass der maschinelle Einsatz die Handwerklichkeit aus den Prozessabläufen eliminiert,<sup>445</sup> wird überflüssig. Somit ist es legitim von einer digitalen Handwerklichkeit zu sprechen. Es findet eine Reintegration von Erfahrungswerten, welche über handwerkliches Arbeiten angeeignet wurden, in den Informationskreislauf statt. Das Befassen mit dem Material, das Durchführen von Materialexperimenten bei denen der Zusammenhang zwischen Materialzusammensetzung, Viskosität, Extrusionsgeschwindigkeit und -raten geprüft wurde haben nach einer handwerklichen Arbeitsweise verlangt, wie sie zu Beginn dieser Schrift erläutert wurde und in Übereinstimmung mit dem Vorgehensmodell des Baumeisters ist. Die angesammelten Erfahrungswerte in Kombination mit vorhandenen Praxiserfahrungen haben zu der Ausbildung einer logischen Intelligenz<sup>446</sup> geführt. Diese logische Intelligenz untermauert sämtliche Entscheidungsprozesse und erleichtert das Antizipieren der Abstimmung von Entwurf, Material, Fertigung und Maschine aufeinander. Diese in der Praxis verankerten Prozesse und Methoden decken gleichzeitig neue Perspektiven im Bereich des Theoretischen auf, was vollkommen dem Konzept der griechischen *techné* entspricht und auf den gewonnenen Erkenntnisse sich das Konzept der Machinecraft stützt.

### **Die Maschine als weiterer Ausgangspunkt**

Während Oxman in ihrer Argumentation davon ausgeht, dass das biologische Modell der Materialverteilung verfolgt und verinnerlicht werden muss und ihre These auf dieser Grundlage aufbaut, beziehen sich Gramazio und Kohler auf den inneren Kreis der Architektur, und rekonstruieren daraus das Paradigma einer digitalen Materialität und die Rolle, welche der Roboter dabei spielt. Daher wird bei ihnen auch die digitale Handwerklichkeit thematisiert. Wie bereits in den vorausgehenden Abschnitten behandelt, setzen sich Gramazio und Kohler mit den Auswirkungen der Digitalisierung auseinander und dem Potenzial welches daraus entspringt. Die Veränderungen und Vorteile, welche sich aus der digitalen Logik ergeben, werden formuliert, wobei der Industrieroboter als Vermittler, als Kettenelement, zwischen Entwurf und Fabrikation präsentiert wird. Im Gegensatz dazu, beleuchtet Oxman weniger die Relevanz der Maschine in diesen Prozessen. Die Maschine wird zwar als Medium benutzt, welches diese Prozesse erst ermöglicht. Die Rolle der Maschine, des Roboters wird bei Oxman aber nicht theoretisiert. Ebenso wenig werden die Rolle des Digitalen auf die Architekturtheorie oder der Einfluss digitaler Elemente auf das Berufsbild thematisiert. Oxmans gesamte Verfahren, vom Entwurf bis hin zur Fabrikation, basieren auf dem Computerprogrammieren und dem Einsatz digitaler Fertigungsverfahren. Theoretisiert wird aber die Optimierung und Effizientisierung der Prozesse in der Architektur durch das Transferieren biologischer Modelle bzw. Logiken aus der Natur in den Bereich der Architektur.

---

<sup>445</sup> Vgl. Risatti, H.: „A Theory of Craft. Function and Aesthetic Expression“, The University of North Carolina Press, 2007, S. 51.

<sup>446</sup> Vgl. Porphyrios, D.: „Klassisches Bauen“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1993, S. 29.

Gramazio und Kohler entwickeln spezifische Effektoren für ihre Industrieroboter, Oxman beteiligt sich an der Weiterentwicklung bestehender 3D-Drucker in Abhängigkeit zu neuen Softwarepaketen und Kholarevic leitet die Entwicklung eines neuen robotischen Fabrikationssystems. Bei der Fallstudie Minibuilders handelt es sich um das Aufstellen einer neuen robotischen Fabrikationsstrategie basierend auf einem multiplen und mobilen spezifischen Robotersystem in Kombination mit einem angepassten Druckmaterial. Den Ausgangspunkt des Projekts stellen die Roboter selbst, also die Minibuilders bzw. aus genereller Sichtweise betrachtet die Maschine dar. Der Architekt agiert als Maschinenentwickler, zielt aber auf die Erweiterung der Entwurfsmöglichkeiten ab, indem eine Technologie entwickelt wird, die gekrümmte Flächenelemente drucken kann, ohne dass der Einsatz einer Unterkonstruktion, Schalung oder Gussform notwendig ist. Es werden nicht nur Effektoren entwickelt, die an einen Industrieroboter zu montieren sind oder bestehende Maschinen weiterentwickelt. Das Befassen mit dem Erfinden des Robotersystems hat zu einem Informationskontinuum zwischen Entwurf, Material, Fertigung und Maschine geführt, ähnlich wie beim Modell des Baumeisters, wobei bei der Umsetzung des Vorhabens keine Trennung zwischen Planung und Konstruktion möglich gewesen wäre.

### **Demokratisierung und Liberalisierung durch die Maschine**

In seinem Buch „*Makers. The New Industrial Revolution*“ setzt sich Chris Anderson mit der Maker-Bewegung auseinander und beleuchtet die Auswirkungen, die sich aus der immer weiter steigenden öffentlichen Zugänglichkeit von technischen Systemen, welche bislang versierten Spezialisten der Fachbereiche der Informatik und des Maschinenbaus zugänglich waren. Die Maker-Bewegung bezeichnet den Prozess, bei dem mittels günstig zu erwerbender Fabrikationsmaschinen für den Eigenbedarf, wie 3D-Drucker, Fräsen oder Lasercutter, und dem Zugang zu Open Source Software, die Fertigung von Produkten aller Art von der industriellen Fabrikationsstätte in den Einflussbereich des Einzelnen verschoben wird.<sup>447</sup> Dadurch können Produkte, die auf dem Markt als standardisierte Sonderprodukte erhältlich sind, den Bedürfnissen des Benutzers angepasst werden bzw. der zukünftige Besitzer kann diese in einem hohen Maß seinen Vorstellungen anpassen und somit spezifische Einheiten produzieren. Anderson argumentiert, dass somit im Rahmen der Maker-Bewegung eine Liberalisierung und Demokratisierung der Fertigungsprozesse und -mittel erreicht werden kann. Der Gedanke wird weiterführend sehr detailliert auf der Ebene der marktwirtschaftlichen Implikationen betrachtet, wobei Anderson sich für eine graduelle Verlegung der globalen Produktionsstätten zurück ins Lokale und für eine daraus resultierende Neuverteilung der Märkte ausspricht.<sup>448</sup> Dieser Leitgedanke Andersons erfreut sich mit Sicherheit seiner Legitimität, jedoch tragen an dieser Stelle Betrachtung zur Marktwirtschaft und Bauindustrie nicht weiter zu dem verfolgten

---

<sup>447</sup> Vgl. Anderson, C.: „*Makers: The New Industrial Revolution*“, Random House Business, London, 2013, S. 40-51.

<sup>448</sup> Ebd., S. 203-215.

Diskurs bezüglich der Machinecraft bei. Diese neue Methodik der individuellen Fertigung und Anpassung begünstigt zum einen unternehmerische Handlungen, zum anderen, und was viel relevanter für die Architektur ist, wird so Innovation gefördert.<sup>449</sup> Dasselbe Prinzip gilt auch für die Fallstudie Minibuilders und in einem erweiterten Kontext kann dies auch für die Architektur als Disziplin zutreffen. Durch die Integrierung selbst entwickelter Roboter, als autonome Entwurfsagenten innerhalb architektonischer Prozesse, kann eine Liberalisierung und Demokratisierung der Disziplin erreicht werden. Beide Begriffe meinen, dass Entwerfer sich von den Zwängen der Fabrikation oder besser formuliert der Maschinen befreien können, indem sie Gebrauch von Open Source Daten, Programmieren und digitalen Fertigungsmaschinen machen. Die Mittel der Fabrikation werden so demokratisiert und liberalisiert, sie stehen jedem zur Verfügung und können von jedem manipuliert werden, unabhängig von der vorausgehenden professionellen Spezialisierung. Es ist für jeden der daran interessiert ist zugänglich. Nicht nur Hersteller, im Sinne von Produktionsfirmen bestimmen die technische Ausbildung und Arbeitsmethodik von Maschinen, sondern dasselbe steht auch dem Benutzer, in diesem Fall dem Architekten oder Entwerfer zu. Natürlich ist es nicht zwingend sich von der industriellen Produktion und ihren Verfahren abzuwenden, aber sollten diese nicht den spezifischen Anforderungen eines Entwurfs genügen, so steht es dem Entwerfer frei, Maschine und Software so zu verändern, so dass seine Kriterien erfüllt werden.

---

<sup>449</sup> Ebd., S. 51.

## **VIII. Abschließende Schlussfolgerungen**

### **1. Integraler Ansatz der Machinecraft**

Es gibt eine Vielfalt unterschiedlichster Ansätze, die Potenziale, welche sich aus der Implementierung des Roboters in der Architektur ergeben, zu interpretieren. Es lassen sich zwei grundsätzliche Ebenen der Betrachtung identifizieren: die Ebene der gesamtheitlichen Betrachtung, bei der Entwurf und Fabrikation als gemeinsame Einheit betrachtet werden, welche dem Einfluss des Roboters unterliegt. Industrieroboter kommen zum Einsatz und werden Teil von robotischen Fabrikationsprozessen und -strategien. Die entwickelten Fabrikationsstrategien berücksichtigen Entwurf, Material und Fabrikation gleichermaßen, wobei keines priorisiert wird.

Die zweite Ebene der Betrachtung bezieht sich ausschließlich auf die Fabrikation. Aspekte der Effizientisierung der Fertigungsmethoden und der Baustelle durch Roboter stellen den Interessenschwerpunkt dar. Hierbei steht die Idee der Technologieentwicklung im Vordergrund. Bei diesem Ansatz wird versucht eine sinnvolle Implementierung des Roboters für die spezifischen Bedürfnisse der Bauindustrie zu erreichen. Die Anpassung disziplinfremder Technik an die bautechnischen Realitäten wird verfolgt.

Die Maschinenhandwerklichkeit versucht beide Ansätze zu vereinen. Der Roboter wird gleichzeitig als Entwurfsparameter und Instrument der Fabrikation betrachtet. Prozessoptimierung und Effizienz der Fabrikation werden gleichermaßen verfolgt, wie die Entfaltung der gestalterischen Fähigkeiten des Architekten, dadurch dass eine digitale Handwerklichkeit gefördert wird.

### **2. Zur materiellen und konstruktiven Natur**

Während der Industrialisierung ersetzte der Stahl Holz und Stein als neues Baumaterial, welche überwiegend Anwendung fand. Zunächst folgten Architekten und Konstrukteure bei ihren Stahlbauten den konstruktiven Vorbildern aus der Holz und Steinbauweise. Erst nach einer längeren Etappe des konstruktiven Experimentierens erreichte die Stahlbauweise ihre konstruktive Maturität und entwickelte eine eigene konstruktive Natur und sogar Identität. Diese Entwicklung sollte als Beispiel für die heute vorliegende Situation der Robotik und der eigens dafür entwickelten Materialien dienen. Ähnlich wie im Falle von Stahl, werden heute mit den neuen Verfahren alte, bestehende Bauweisen kopiert. Diese imitative Phase muss überwunden werden, so dass eine spezifische, Sinn ergebende konstruktive Natur ermittelt werden kann. Wir befinden uns mitten im Findungsprozess, der diesen neuen Verfahren, Materialien, Prozessen und Logiken eine eigen konstruktive Natur zuweist. Durch die Positionierung des Architekten als Entwickler und Erfinder von Robotersystemen muss sich dieser sowohl mit Material als auch Konstruktion vertieft auseinandersetzen. Die materielle und konstruktive Natur der Architektur, die durch

das albertianische Paradigma in einem beträchtlichen Maß vernachlässigt wurde, wird dadurch reaktiviert. Das Befassen mit der Maschine ist unumgänglich an Material und Konstruktion gebunden. Entwirft man Maschinenteknik, befasst man sich automatisch mit den Fragen der Konstruktion und des Konstruktiven, was wiederum an das Materielle gebunden ist.

### **3. Neuintegrierung der Handwerklichkeit**

Das handwerkliche Arbeiten setzt ein tiefes Kennen und Verstehen des Materials und gleichzeitig des Werkzeugs voraus. Zwar haben sich Architekten immer schon mit dem Material auseinandergesetzt, aber dabei wurde dieses als gegebene Entität verstanden, deren Eigenschaften und Verhalten Konstruktionsart und Baumethode vorgeben. Bezüglich der Fertigungsinstrumente entwickelte sich ab der Renaissance und mit der Einführung der Trennung von Planen und Bauen eine Distanz zu den Instrumenten der Fertigung. Architekt und Maschine kamen nur auf einer planerischen Ebene miteinander in Berührung. Diese Verhältnisse können nun erweitert werden, indem Material und Werkzeug als Einheit verstanden werden. Die Entwicklung von neuen Fertigungsinstrumenten ist unumgänglich auch an die Frage des Materials gebunden. Beteiligt sich der Architekt als Erfinder eines Robotersystems, muss gleichzeitig auch die Materialthematik adressiert werden. Die Bearbeitung des Materials setzt Kenntnisse handwerklichen Arbeitens voraus, die auf das Werkzeug bzw. die Maschine transferiert werden.

Die Maschine ersetzt das handwerkliche Werkzeug. Roboter und spezifische Robotersysteme, bei deren Entwicklung der Architekt mitwirkt, werden zu Entwurfs- und Fabrikationsinstrumenten. Das Instrument der Fabrikation wird an den Entwurf gekoppelt und verhält sich wie ein aktiver Agent. Fabrikationsmaschinen werden nicht länger als neutrale Glieder der Fabrikationsprozesse behandelt. Der Übergang von der passiven Natur der Fertigungswerkzeuge als Teile eines Fabriksystems zu der Einschätzung dieser als Bestandteil des Entwurfsvokabulars wird durch den Architekten in seiner Position als Maschinenerfinder begünstigt. Die Maschine, der Roboter, entwickelt sich zum aktiven Werkzeug des Architekten.

### **4. Material**

Durch die Entwicklungen im Bereich der additiven Fabrikation und der damit im Zusammenhang stehenden Materialverteilung wird die Abwendung von der Homogenisierung des Materials gefördert. Der Architekt kann sich als Materialforscher und -entwickler behaupten und direkten Einfluss auf die Evolution der Materialentwicklung nehmen. Die Entwicklung neuer Maschinen, spezifischer Roboter und Robotersysteme verlangt nach der parallelen Auseinandersetzung mit den Fragen des Materials und seiner Materialität. Durch kollaboratives und interdisziplinäres Arbeiten können neue Materialien entwickelt werden, die den Anforderungen der Maschinen als auch des Entwurfs und der Konstruktion genügen. Dies entspricht dem Konzept der Handwerklichkeit, bei dem der Ausführende an der

direkten Manipulation des Materials beteiligt ist. Manipulation hat in diesem Kontext eine doppeldeutige Bedeutung. Zum einen beschreibt es die direkte Interaktion mit dem Material im Sinne der angewandten Fertigungsverfahren. Zum anderen ist damit der Einfluss auf die Materialbeschaffenheit und die Verteilung des Materials gemeint. Mittels der computergesteuerten Fabrikationstechnologie und dazugehörigen Scripten, die den spezifischen Anforderungen des Entwurfs entsprechen, können Strategien der Materialverteilung entwickelt werden, wodurch eine Effizienz und Optimierung des Materialeinsatzes erzielt werden können. Diese Strategien können mittels des Programmierens der Maschine direkt vom Architekten generiert und kontrolliert werden.

## 5. Die Frage des technologischen Primats

In dem Essay „*Escape from the Revolving Door: Architecture and the Machine*“ setzt sich Robert McCarter mit der Technologisierung und der empfundenen Übertechnologisierung der Architektur auseinander. McCarter erhebt den Vorwurf „*der Dominanz des technologischen Denkens*“<sup>450</sup> in der Architektur und dass „*der Architekturentwurf sich zu einem Instrument mit exklusivem technologischen Charakter entwickelt*“.<sup>451</sup> Zum richtigen Verständnis dieser Aussagen muss angegeben werden, dass McCarter sich bei dem 1987 publizierten Artikel eher auf das Aufkommen der High-Tech-Architektur bezieht, einem Baustil mit einem stark zur Schau gelegten technologischen Charakter, zu dessen Vertretern das Centre Pompidou in Paris oder das Lloyd's Building in London gezählt werden können. Trotzdem ist es wichtig auf diesen Punkt einzugehen, denn durch den Einsatz des Roboters und der damit einhergehenden Notwendigkeit des Programmierens entsteht oft der Eindruck, dass in diesem Zusammenhang Architektur nicht mehr als Baukunst verstanden wird oder sein soll, sondern dass Architektur fachentfremdet wird und in eine der Disziplin nicht eigene Richtung geführt wird. Das Konzept der Machinecraft und der damit verbundene Einsatz des Roboters zielt nicht auf eine neue Ausrichtung der Disziplin oder eine thematische Entfremdung ab, sondern wird als ein weiteres Hilfsmittel verstanden, welches das Zusammenwirken von Entwurf, Material und Fabrikation weiter miteinander vereinen soll. Die Absicht besteht nicht darin den gestalterischen Charakter der Architektur zu minimalisieren und diesen dann mit einem Charakter technologischer Natur zu substituieren, sondern das Technologische soll zu der freien Entfaltung des Gestalterischen im Sinne des Gestalters beitragen und unter dessen Kontrolle stehen.

---

<sup>450</sup> McCarter, R.: „*Escape from the Revolving Door: Architecture and the Machine*“ In: McCarter, R. (Hrsg.): „*Pamphlet Architecture No. 12, Building; Machines*“, Princeton Architectural Press, New York, 1987, S. 7.

<sup>451</sup> Ebd., S. 7.

## **6. Neupositionierung des Architekten**

Die weitere Technologisierung der Architektur durch den Roboter oder die Maschine zielt nicht allein, wie bei Le Corbusier oder den Vertretern der Moderne, auf eine Effizientisierung, Rationalisierung und Optimierung der Prozesse und des Gesamtergebnisses ab. Diese stellen sekundäre Resultate dar, denn das primäre Ziel liegt in der Bevollmächtigung des Entwerfers und in der Liberalisierung der Disziplin. Der Architekt soll mittels des robotischen oder maschinellen Einsatzes zur Rekonziliation der gestalterischen und konstruktiven Natur der Architektur beitragen. Das Ziel liegt in der Repositionierung des Architekten als Koordinator, dem Modell des Baumeisters folgend. Das Erstellen einer Strategie, die sämtliche Aspekte des Entwurfs, der Planung, der Ausführung und der Fertigung abdeckt liegt dem Konzept der Maschinenhandwerklichkeit zugrunde. Die wachsende Kontrolle über die Prozesse des Entwurfs und vor allem der Fabrikation korreliert mit einem Autoritätszuwachs. Das Überwinden des albertianischen Schismas zwischen Entwerferischem und Ausführenden führt zur Rückkehr zum Baumeister-Paradigma. Die Kontrolle über die Fertigungsprozesse und -maschinen verleiht dem Architekten die Rolle des Vermittlers zwischen allen Prozessbeteiligten, so dass seine Marginalisierung aufgehoben wird.

## **7. Erweiterung des Gestalterischen**

Die Unterstützung und Erweiterung des gestalterischen Willens und die Loslösung von den Limitierungen der Fabrikation nehmen eine zentrale Position ein. Vorgaben im Bereich der Fabrikation sollen somit umgangen und ignoriert werden können, so dass das Gestalterische weitestgehend von diesen Limitierungen befreit wird. Dies soll nicht missverstanden werden. Das Anliegen besteht nicht darin, den Entwurf von der Auseinandersetzung mit der Komplexität der Bautechnik zu befreien, sondern ein Zusammenspiel zwischen Entwurf und Fabrikation mit der Maschine als Bindeelement zu ermöglichen, so dass die Werkzeuge der Fabrikation zu direkten Entwurfsparametern werden. Es besteht eine direkte Relation zwischen den Freiheitsgraden der Fabrikation und denen des Entwurfs. Betätigt sich der Architekt bei der Entwicklung spezifischer Robotersysteme, die an die Anforderungen des Projekts angepasst sind, können bestehende fabrikative Zwänge umgangen werden, so dass das Gestalterische den Limitationen standardisierter Fertigungseinheiten nicht weiter ausgesetzt ist.

## **8. Bezug zur baulichen Tradition**

McCarter setzt sich kritisch mit dem Thema der technologischen Produktion auseinander und der ihr innewohnenden Natur des Wechsels. Dies basiere auf dem Prinzip des stetigen Progresses, da die technologische Produktion eine Steigerung

ihrer selbst verfolgt, also ihr eigenes Fortschreiten determiniert und dieses auch selber generiert:

*„Diese Art der Produktion [Anm. d. A.: die technologische Produktion], während sie eine scheinbar lineare Geschichte generiert, resultiert eigentlich in etwas zyklischem, ähnlich wie in der Natur. Durch die eigene Definition verneint sie die Kontinuität mit der Vergangenheit und daher auch jede Möglichkeit zum Bau einer Zukunft - sie existiert nur in einer verarmten Gegenwart bestimmt für eine schnelle Auswechslung.“<sup>452</sup>*

Laut McCarter ergibt sich aus dieser inhärenten Orientierung zum technischen Fortschritt das Abstreiten und der Bruch mit der Kontinuität und somit auch mit der Vergangenheit. Dadurch unterstellt er dem Technologischen eine gewisse Sinnlosigkeit bzw. Oberflächlichkeit, was die historische Verankerung anbelangt. In seinem theoretischen Diskurs bezieht sich McCarter auf Heidegger und sieht eine Selbstdienlichkeit im technologischen Denken, da dieses sich immer öfter keinem höheren Nutzen fügt. Anstelle also eines Mittels zum Zweck, wird dieses selber zum Zweck.<sup>453</sup> Entgegengesetzt der hier beklagten Richtungslosigkeit und Entfremdung mit der Vergangenheit, findet das Konzept des Machinecrafts seine Wurzeln und den benötigten Rückhalt in den Ursprüngen der Architektur, indem es auf die Reintegration der Handwerklichkeit in die Disziplin abzielt. Vitruv sieht den Maschinenbau als essentiellen Teil der Architektur an. Mit dem Konzept der Maschinenhandwerklichkeit wird einer Neuinterpretation des Baumeisters nachgegangen. Nicht die optimierte, kontinuierliche Produktion und deren Fortschritt werden verfolgt oder als Ziel gesehen. Sondern ein Fortschritt im Sinne der Verfeinerung eines Informationskreislaufs zwischen Entwurf, Material, Fabrikation und Maschine wird beabsichtigt.

## 9. Die Variation der Maschine

Bereits Konrad Wachsmann erkannte, dass im Kontext der technologischen Weiterentwicklung die Auseinandersetzung des Architekten mit Maschine, Produktion und Fabrik von größter Relevanz und Signifikanz ist. Zwar bezieht er sich in seinen Überlegungen auf den Kontext der baulichen Automation und im Speziellen auf die Massenproduktion, dennoch verweist er darauf, dass ebenso die Fertigungsprozesse selbst und die Fabrikationswerkzeuge, die er als Maschine und Fabrik identifiziert, einen integralen Teil der Bauaufgabe darstellen:

---

<sup>452</sup> McCarter, R.: „Escape from the Revolving Door: Architecture and the Machine“ In: McCarter, R. (Hrsg.): „Pamphlet Architecture No. 12, Building; Machines“, Princeton Architectural Press, New York, 1987, S. 8.

<sup>453</sup> Ebd., S. 8.

*„Die Bauaufgabe ist unter Umständen also nicht nur Planung, Konstruktion, Materialforschung, Verteilung der mechanischen Installation, Detaillierung aller Art usw., sondern sie umfasst auch genaue Bestimmungen des Produktionsprozesses, die Planung der gesamten Produktionsanlage miteinbeziehend.“<sup>454</sup>*

Durch nichtstandardisierte Mittel der Produktion auf die spezifischen Anforderungen des Entwurfs einzugehen ist das revolutionäre Potenzial, das vom Industrieroboter oder selbstentwickelten Robotersystemen ausgeht. Dieses kann ausgeschöpft werden, indem Maschinen und Roboter, als Werkzeuge der Fertigung, durch den Eingriff des Architekten auf die spezifischen Fertigungsanforderungen des Entwurfs angepasst werden. Die Flexibilität und Variabilität der Fertigungswerkzeuge wird verfolgt. Ähnlich wie ein Entwurf auf den spezifischen Kontext, Lage, Klima, Umgebung, Ausrichtung usw. reagiert, soll auch eine ähnliche Korrelation im Bereich der Fabrikation stattfinden. Durch das Eingreifen des Architekten kann die Maschine auf die entwurfsspezifischen Anforderungen abgestimmt werden und auf diese reagieren. Maschinen können als maßgefertigte, entwurfsspezifische Werkzeuge der Fertigung interpretiert werden, deren technische Auslegung vom Architekten mitbestimmt wird. Die Bandbreite der Betätigung des Architekten sollte somit erweitert werden.

## **10. Interdisziplinarität**

Ab einem gewissen Punkt verlangt die Komplexität der Bauaufgabe nach einem hohen Programmierungskönnen, sowie einem mehr als generellen Verständnis für den Maschinenbau. Mit steigender Komplexität des Bauvorhabens steigt auch der Programmierungsbedarf. Es muss daher der Frage nachgegangen werden, inwiefern der Architekt zum Programmierer wird oder werden soll. Ab welchem Punkt ist der kritische Moment erreicht, wo auf Spezialisten dieses Fachgebiets zurückgegriffen werden muss? Architektur hat einen inhärenten interdisziplinären Charakter, als Disziplin welche Kunst und Wissenschaft vereint. Durch die Digitalisierung der Disziplin, sowohl im entwerferischen als auch im konstruktiven Bereich, wird das Feld der Interdisziplinarität erweitert, um neue Fachgebiete, wie eben die Informatik, einzuschliessen. Bei erweiterten Bauaufgaben führt dies unweigerlich zu Kollaborationen mit Informatikspezialisten und Maschinenbauern, jedoch setzt dies ausführliche Kenntnisse des Architekten in diesen Fachgebieten als Voraussetzung, so dass erhobene Forderungen in Übereinstimmung mit den Aktionslogiken und Funktionsweise von Maschinen oder Robotern stehen.

### **Abschliessend**

Eines der elementaren Werkzeuge des Architekten ist der Bleistift. Ausgangspunkt aller Entwürfe ist die Skizze, deren Entstehung oft durch das Benutzen eines Bleistifts angestossen wird. Die Hintergrundinformation, die sich den meisten entzieht, ist dass

---

<sup>454</sup> Wachsmann, K.: „Wendepunkt im Bauen“, Krauskopf Verlag, Wiesbaden, 1959, S. 103.

der Bleistift, als Utensil und auch als Material von Architekten erfunden und entwickelt wurde. Erfunden wurde der Bleistift von Joseph Hardtmuth, dem Hofarchitekten des Fürsten Lichtenstein.<sup>455</sup> Das Konzept der in Holz eingelegten Mine und des Minenmaterials bestehend aus Graphit und Ton wurde in einer Zusammenarbeit zwischen Hardtmuth und dem französischen Erfinder Nicolas-Jacques Conté entwickelt.<sup>456</sup> Natürlich stellt der Bleistift kein Instrument der Fertigung dar, sondern des Entwurfs. Architekten waren seit jeher an der Entwicklung ihrer Werkzeuge beteiligt, sei es auf dem Gebiet des Entwurfs oder der Fabrikation. Machinecraft dient dazu diese Seite der Architektur zu reaktivieren und somit neue Wege für die Disziplin und den Beruf zu eröffnen.

---

<sup>455</sup> Vgl. Krasny, E.: „Architektur beginnt im Kopf. The Making of Architecture“, Birkhäuser Verlag, Basel, 2008, S. 140.

<sup>456</sup> Ebd., S. 152.

## Literaturverzeichnis

1. Abel, C.: „Architecture and Identity. Responses to cultural and technological change“, Architectural Press, Oxford, 2000.
2. Adamson, G. (Hrsg.): „The Craft Reader“, Berg Publishers, Oxford, 2010.
3. Alberti, L.B.: „Die zehn Bücher der Architektur“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2005.
4. Anderson, C.: „Makers: The New Industrial Revolution“, Random House Business, London, 2013.
5. Bahmann, W.: „Werkzeugmaschinen kompakt. Baugruppen, Einsatz und Trends“, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
6. Barthelmeß, U., Furbach, U.: „iRobot – uMan. Künstliche Intelligenz und Kultur: Eine jahrtausendealte Beziehungskiste“, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
7. Benevolo, L.: „Geschichte der Architektur des 19. und 20. Jahrhunderts“, Band 1, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, München, 1990.
8. Binding, G.: „Baubetrieb im Mittelalter“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1993.
9. Binding, G.: „Meister der Baukunst. Geschichte des Architekten und Ingenieurberufes“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2004.
10. Battisti, E.: „Fillippo Brunelleschi. Das Gesamtwerk“, Belser Verlag, Stuttgart Zürich, 1979.
11. Block, P., Knippers, J., Mitra N.J., Wang, W. (Hrsg.): „Advances in architectural Geometry 2014“, Springer, Heidelberg, 2015.
12. Blum, C., Li, X.: „Swarm Intelligence in Optimization“, S. 43-86 In: Blum, C., Merkle, D. (Hrsg.): „Swarm Intelligence Introduction and Applications“, Springer, Berlin Heidelberg, 2008.
13. Blum, C., Merkle, D. (Hrsg.): „Swarm Intelligence Introduction and Applications“, Springer, Berlin Heidelberg, 2008.
14. Bock, T., Prochiner, F.: „Automatisierungssysteme im Wohnungsbau“, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart, 1999.
15. Borsi, F.: „Leon Battista Alberti. Das Gesamtwerk“, Belser Verlag, Stuttgart Zürich, 1982.
16. Broadbent, G.: „Design in Architecture. Architecture and the Human Sciences“, David Fulton Publishers, London, 1988.
17. Carpo, M.: „The Alphabet and the Algorithm (Writing Architecture)“, MIT Press, Cambridge, 2011.
18. Carpo, M. (Hrsg.): „The Digital Turn in Architecture 1992-2012“, AD Reader, John Wiley & Sons Ltd Publications, Chichester, 2013.

19. Carpo, M.: „Vom Handwerker zum Zeichner. Das Alberti'sche Paradigma und die Erfindung des Bauplans in der Moderne“, S. 278-280 In: Spiro, A., Ganzoni, D. (Hrsg.): „Der Bauplan. Werkzeug des Architekten“, Park Books, Zürich, 2013.
20. Ceccanti, F., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V. und Pambaguian, L.: „3D Printing Technology for a Moon Outpost exploiting Lunar Soil“, 61<sup>st</sup> International Astronautical Congress, Prag, 2010.
21. Choay, F.: „De re aedificatoria als Metapher einer Disziplin“, S. 217-231, In: Forster, K. W., Locher, H. (Hrsg.): „Theorie der Praxis. Leon Battista Alberti als Humanist und Theoretiker der bildenden Künste“, Akademie Verlag, Berlin, 1999.
22. Cousineau, L., Miura, N.: „Construction Robots. The Search for New Building Technology in Japan“, ASCE Press, Reston, Virginia, 1998.
23. Denari, N.: „Precise Form for an Imprecise World“, S. 28-32 In: Marble, S. (Hrsg.): „Digital Workflows in Architecture. Designing Design - Designing Assembly - Designing Industry“, Birkhäuser, Basel, 2012.
24. Emmons, P.: „Architectural Encounters between Material and Idea“, S. 89-106 In: Mindrup, M. (Hrsg.): „The Material Imagination. Reveries on Architecture and Matter“, Ashgate Publishing Limited, Farnham, 2015.
25. Esch, P.: „Mit etwas Abstand betrachtet. Möglichkeiten des Vermittelns“, S. 306-308 In: Spiro, A., Ganzoni, D. (Hrsg.): „Der Bauplan. Werkzeug des Architekten“, Park Books, Zürich, 2013.
26. Evers, B. (Hrsg.): „Architekturmodelle der Renaissance. Die Harmonie des Bauens von Alberti bis Michelangelo“, Prestel Verlag, München New York, 1995.
27. Fanelli, G.: „Brunelleschi“, Scala Verlag, Florenz, 1988.
28. Forster, K. W., Locher, H. (Hrsg.): „Theorie der Praxis. Leon Battista Alberti als Humanist und Theoretiker der bildenden Künste“, Akademie Verlag, Berlin, 1999.
29. Friemert, C.: „Die Gläserne Arche. Kristallpalast London 1851 und 1854“, Prestel Verlag, München, 1984.
30. Galluzzi, P.: „Renaissance Engineers. From Brunelleschi to Leonardo da Vinci“, Giunti Verlag, Florenz, 1996.
31. Giedion, S.: „Raum. Zeit. Architektur. Die Entstehung einer neuen Tradition“, Birkhäuser Verlag, Basel, 1996.
32. Giovannetti, B., Martucci, R.: „Architect's Guide to Florence“, Butterworth Architecture, Oxford, 1994.
33. Gispén, K.: „Der gefesselte Prometheus: Die Ingenieure in Großbritannien und in den Vereinigten Staaten 1750-1945“, S. 127-174 In: Kaiser, W., König, W. (Hrsg.): „Geschichte des Ingenieurs. Ein Beruf in sechs Jahrtausenden“, Carl Hanser Verlag, München, 2006.
34. Goodman, N.: „Sprachen der Kunst. Entwurf einer Symboltheorie“, Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main, 1995.

35. Graefe, R. (Hrsg.): „Zur Geschichte des Konstruierens“, Fourier Verlag, Wiesbaden, 1997.
36. Grafton, A.: „Leon Battista Alberti. Baumeister der Renaissance“, Berlin Verlag, Berlin, 2002.
37. Gramazio, F., Kohler, M.: „Digital Materiality in Architecture“, Lars Müller Publishers, Baden, 2008.
38. Gramazio, F.; Kohler, M. and Willmann, J.: „Authoring Robotic Processes“. In: F. Gramazio and M. Kohler (ed.), *Made by Robots: Challenging Architecture at a Large Scale*, Architectural Design, Wiley, London, 2014.
39. Gramazio, F.; Kohler, M., Willmann, J.: „The Robotic Touch: How Robots Change Architecture“, Park Books, Zürich, 2014.
40. Haun, M.: „Handbuch Robotik. Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter“, Springer Vieweg, Berlin, 2013.
41. Hauschild, M., Karzel, R.: „Digitale Prozesse. Planung, Gestaltung, Fertigung“, Institut für internationale Architektur-Dokumentation, München, 2010.
42. Hehenberger, P.: „Computerunterstützte Fertigung. Eine kompakte Einführung“, Springer Verlag Berlin-Heidelberg, 2011.
43. Hesselgren, L., Sharma, S., Wallner, J., Baldassini, N. (Hrsg.): „Advances in Architectural Geometry 2012“, Springer, Wien, 2013.
44. Hovestadt, L.: „Jenseits des Rasters - Architektur und Informationstechnologie. Anwendungen einer digitalen Architektonik“, Birkhäuser Verlag, Basel, 2010.
45. Huse, N.: „Geschichte der Architektur im 20. Jahrhundert“, C. H. Beck Verlag, München, 2008.
46. Huse, N.: „Le Corbusier“, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg, 2002.
47. Hwang, D., Khoshnevis, B.: *An Innovative Construction Process-Contour Crafting*, 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC 2005 - September 11-14, 2005, Ferrara, abrufbar unter: <http://www.iaarc.org/publications/fulltext/isarc2005-03hwang.pdf>.
48. Ichbiah, D.: „Robots. From Science to Technological Revolution“, Harry N. Abrahams Publishers, Geneva, 2005.
49. Jesberg, P.: „Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996.
50. Kaiser, W., König, W. (Hrsg.): „Geschichte des Ingenieurs. Ein Beruf in sechs Jahrtausenden“, Carl Hanser Verlag, München, 2006.
51. Kieran, S., Timberlake, J.: „Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies are Poised to Transform Building Construction“, McGraw-Hill Professional, New York, 2003.
52. Khoshnevis, B.: „Automated Construction by Contour Crafting - Related Robotics and Information Technologies“ in *Journal of Automation in Construction - Special Issue: The best of ISARC 2002*, Vol. 13, Ausgabe 1, 2004.

53. Khoshnevis, B., Hwang, D., Yao, K. und Yeh, Z.: „Mega-Scale Fabrication by Contour Crafting“, In : Int. J. Industrial and Systems Engineering, Vol. 1, No. 3, 2006.
54. Klemm, F.: „Geschichte der Technik: der Mensch und seine Erfindungen im Bereich des Abendlandes“, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1998.
55. Klotz, H.: „Fillippo Brunelleschi. Seine Frühwerke und die mittelalterliche Tradition“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1990.
56. Kluge, F.: „Etymologisches Wörterbuch der Deutschen Sprache“, 17. Auflage, Walter de Gruyter & Co., Berlin, 1957.
57. Knell, H.: „Vitruvs Architekturtheorie. Versuch einer Interpretation“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1985.
58. Knippers, J., Gabler, M., La Magna, R., Waimer, Menges, A.: „From Nature to Fabrication: Biomimetic Design. Principles for the Production of Complex Spatial Structures“, S. 107-122 In: Hesselgren, L., Sharma, S., Wallner, J. (Hrsg.): „Advances in Architectural Geometry 2012“, Springer, Wien, 2013.
59. Kolarevic, B. (Hrsg.): „Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing“, Taylor and Francis, New York, 2009.
60. Kolarevic, B.: „Digital Production“, S. 31-54 In: In: Kolarevic, B. (Hrsg.): „Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing“, Taylor and Francis, New York, 2009.
61. Kolarevic, B., Klinger, K. (Hrsg.): „Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture“, Routledge Taylor and Francis, New York, 2008.
62. Kolarevic, B.: „The (Risky) Craft of Digital Making“, S. 119-128 In: Kolarevic, B., Klinger, K. (Hrsg.): „Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture“, Routledge Taylor and Francis, New York, 2008.
63. Koolhaas, R. (Hrsg.): „Fundamentals Catalogue: 14th International Architecture Exhibition - La Biennale di Venezia“, Marsilio, Venedig, 2014.
64. König, W.: „Technikgeschichte. Eine Einführung in ihre Konzepte und Forschungsergebnisse“, Grundzüge der Modernen Wirtschaftsgeschichte, Band 7, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2009.
65. Kostof, S.: „Geschichte der Architektur. Vom Frühmittelalter bis zum Spätbarock“, Band 2, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1993.
66. Krasny, E.: „Architektur beginnt im Kopf. The Making of Architecture“, Birkhäuser Verlag, Basel, 2008.
67. Kula, D., Ternaux, E., Hirsinger, Q.: „Materiology. Handbuch für Kreative: Materialien und Technologien“, Frame Publisher, Amsterdam, Birkhäuser, Basel, 2009.
68. Laukemper, J.: „Automation im Mauerwerksbau. Voraussetzungen, Verfahren, Wirtschaftlichkeit“, Band 33, Expert Verlag, Ehningen bei Böblingen, 1992.
69. Le Corbusier: „Ausblick auf eine Architektur“, Birkhäuser Verlag, Braunschweig, 2013.

- 70.Lynn, G.: „Fold, Bodies and Blobs: Collected Essays“, Lettre Volee, New York, 1998.
- 71.Lynn, G. (Hrsg.): „Archaeology of the Digital: Peter Eisenman, Frank Gehry, Chuck Hoberman, Shoji Yoh; [to accompany the Exhibition Archaeology of the Digital presented at the CCA from 7 May to 13 October 2013]“, Sternberg Press, Berlin, 2013.
- 72.Lynn, G.: „The End of “In the Future”“ In: Lynn, G. (Hrsg.): „Archaeology of the Digital: Peter Eisenman, Frank Gehry, Chuck Hoberman, Shoji Yoh; [to accompany the Exhibition Archaeology of the Digital presented at the CCA from 7 May to 13 October 2013]“, Sternberg Press, Berlin, 2013.
- 73.Manetti, A.: „The Life of Brunelleschi“, The Pennsylvania State University Press, 1970.
- 74.Marble, S. (Hrsg.): „Digital Workflows in Architecture. Designing Design - Designing Assembly - Designing Industry“, Birkhäuser, Basel, 2012.
- 75.McCarter, R. (Hrsg.): „Pamphlet Architecture No. 12, Building; Machines“, Princeton Architectural Press, New York, 1987.
- 76.McCullough, M.: „Abstracting Craft. The Practiced Digital Hand“, S. 310-316 In: Adamson, G. (Hrsg.): „The Craft Reader“, Berg Publishers, Oxford, 2010.
- 77.Millon, H. A.: „Italienische Architekturmodelle im 16. Jh.“ In: Evers, B. (Hrsg.): „Architekturmodelle der Renaissance. Die Harmonie des Bauens von Alberti bis Michelangelo“, Prestel Verlag, München New York, 1995.
- 78.Mindrup, M. (Hrsg.): „The Material Imagination. Reveries on Architecture and Matter“, Ashgate Publishing Limited, Farnham, 2015.
- 79.Mitchell, J. W.: „Design Worlds and Fabrication Machines“, S. 75-79 In: Kolarevic, B. (Hrsg.): „Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing“, Taylor and Francis, New York, 2009.
- 80.Möller, E.: „Zu einer entfesselten Architektur. Über Industrialisierung und Digitalisierung des Bauens“, S. 31-37 In: Nerdinger, W., Barthel, R., Junge, R., Krippner, R., Petzold, F. (Hrsg.): „Wendepunkte im Bauen. Von der seriellen zur digitalen Architektur“, Edition Detail, München, 2010.
- 81.Mumford, L.: „Mythos der Maschine. Kultur, Technik und Macht. Die umfassende Darstellung der Entdeckung und Entwicklung der Technik“, Fischer Taschenbuch Verlag, Wien, 1977.
- 82.Müller, K., Söndermann, M. und Marktworth, S.: „Das Handwerk in der Kultur- und Kreativwirtschaft“, Göttinger Handwerkswirtschaftliche Studien, Band 84, Verlag Mecke Druck, Duderstadt, 2011.
- 83.Negroponte, N.: „Being Digital“, Vintage Books, New York, 1996.
- 84.Negroponte, N.: „Toward a Theory of Architecture Machines“, in Journal of Architectural Education, 23(2), 9-12, 1969.

- 85.Nerdinger, W., Barthel, R., Junge, R., Krippner, R., Petzold, F. (Hrsg.): „Wendepunkte im Bauen. Von der seriellen zur digitalen Architektur“, Edition Detail, München, 2010.
- 86.Neugebauer, R.: „Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen“, Springer Vieweg, Berlin, 2012.
- 87.Oxman, N.: „Material-Based Design Computation“, Massachusetts Institute of Technology, 2010, abrufbar unter: <http://hdl.handle.net/1721.1/59192>, (Stand 10.12.2014).
- 88.Oxman, N.: „Variable property rapid prototyping“, S. 3-31 In: „Virtual and Physical Prototyping“, Vol. 6, No. 1, Taylor & Francis, London, 2011, abrufbar unter: [http://matter.media.mit.edu/assets/pdf/Publications\\_VPRP.pdf](http://matter.media.mit.edu/assets/pdf/Publications_VPRP.pdf) (Stand 03.12.2014).
- 89.Parascho, S., Knippers, J., Dörstelmann, M., Prado, M., Menges, A.: „Modular Fibrous Morphologies: Computational Design, Simulation and Fabrication of Differentiated Fibre Composite Building Components“, S. 29-45 In: Block, P., Knippers, J., Mitra N.J., Wang, W. (Hrsg.): „Advances in architectural Geometry 2014“, Springer, Heidelberg, 2015.
- 90.Picon, A.: „Digital Culture in Architecture. An Introduction for the Design Professions“, Birkhäuser Verlag, Basel, 2010.
- 91.Pizzigoni, A.: „Fillippo Brunelleschi“, Verlag für Architektur, Zürich München, 1991.
- 92.Popplow, M.: „Unsichere Karrieren: Ingenieure im Mittelalter und Früher Neuzeit 500-1750“, S. 71-123 In: Kaiser, W., König, W. (Hrsg.): „Geschichte des Ingenieurs. Ein Beruf in sechs Jahrtausenden“, Carl Hanser Verlag, München, 2006.
- 93.Porphyrrios, D.: „Klassisches Bauen“, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1993.
- 94.Prager, F. D., Scaglia, G.: „Brunelleschi, Studies of his Technology and Inventions“, Dover Publications, New York, 1970.
- 95.Reichardt, J.: „Robots: Facts, Fiction + Prediction“, Thames and Hudson, London, 1978.
- 96.Ricken, H.: „Der Architekt. Geschichte eines Berufs“, Henschelverlag Kunst und Gesellschaft, Berlin, 1977.
- 97.Risatti, H.: „A Theory of Craft. Function and Aesthetic Expression“, The University of North Carolina Press, 2007.
- 98.Rutishauser, S.: „Zukunftspläne. Von der grafischen Darstellung zum digitalen Code“, S. 281-283 In: Spiro, A., Ganzoni, D. (Hrsg.): „Der Bauplan. Werkzeug des Architekten“, Park Books, Zürich, 2013.
- 99.Sahin, E., Girgin, S., Bayındır, L. und Turgut, A.: „Swarm Robotics“, S. 87-100 In: Blum, C., Merkle, D. (Hrsg.): „Swarm Intelligence Introduction and Applications“, Springer, Berlin Heidelberg, 2008.

- 100.Schädlich, C.: „Der Baustoff Eisen als Grundlage für die Herausbildung qualitativ neuer Baukonstruktionen im 19. Jahrhundert“, S. 138-151 In: Graefe, R. (Hrsg.): „Zur Geschichte des Konstruierens“, Fourier Verlag, Wiesbaden, 1997.
101. Scheurer, F.: „Digital Craftsmanship: From Thinking to Modeling to Building“, S. 110-118 In: Marble, S. (Hrsg.): „Digital Workflows in Architecture. Designing Design - Designing Assembly - Designing Industry“, Birkhäuser, Basel, 2012.
- 102.Schumacher, P.: „The Autopoiesis of Architecture. A New Framework for Architecture“, Wiley Verlag, Chichester, 2011.
- 103.Sennett, R.: „Handwerk“, Berlin Verlag, Berlin, 2008.
- 104.Siciliano, B., Khatib, O.: „Handbook of Robotics“, Springer Verlag, Berlin, 2008.
- 105.Spiro, A., Ganzoni, D. (Hrsg.): „Der Bauplan. Werkzeug des Architekten“, Park Books, Zürich, 2013.
- 106.Stark, J., Wicht, B.: „Geschichte der Baustoffe“, Bauverlag, Berlin, 1998.
- 107.Thoenes, C.: „Anmerkungen zur Architekturtheorie“ In: Evers, B. (Hrsg.): „Architekturmodelle der Renaissance. Die Harmonie des Bauens von Alberti bis Michelangelo“, Prestel Verlag, München New York, 1995.
- 108.Tibbits, S.: „4D Printing“ In: „Sheil, B. (Hrsg.): „Zero Tolerance in Design and Production AD“, Architectural Design, No. 227, John Wiley and Sons, 2014.
- 109.Ungers, L.: „Über Architekten. Leben, Werk & Theorie“, DuMont Literatur und Kunst Verlag, Köln, 2002.
- 110.Vitruv: „Baukunst“, Erster und Zweiter Band, Artemis Verlag für Architektur, Zürich, 1987.
- 111.Wachsmann, K.: „Wendepunkt im Bauen“, Krauskopf Verlag, Wiesbaden, 1959.
- 112.Werner, E.: „Der Kristallpalast zu London 1851“, Werner-Verlag, Düsseldorf, 1970.
- 113.Westkämpfer, E., Warnecke, H.: „Einführung in die Fertigungstechnik“, Teubner Verlag/ GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2006.
- 114.Zardini, M.: „Archaeologist of the Digital - Some Fields“ In: Lynn, G. (Hrsg.): „Archaeology of the Digital: Peter Eisenman, Frank Gehry, Chuck Hoberman, Shoji Yoh; [to accompany the Exhibition Archaeology of the Digital presented at the CCA from 7 May to 13 October 2013]“, Sternberg Press, Berlin, 2013.

## Internetquellen

1. Duden Wörterbuch, <http://www.duden.de/node/673423/revisions/1362058/view> (Stand 05.11.2014).
2. Duden Wörterbuch, <http://www.duden.de/node/701684/revisions/1326016/view> (Stand 02.09.2014).
3. Duden Wörterbuch, <http://www.duden.de/node/773456/revisions/1370933/view> (Stand 06.02.2015).
4. <http://www.d-shape.com/tecnologia.htm> (Stand 20.12.2014).
5. <http://www.d-shape.com/cose.htm> (Stand 20.12.2014).
6. International Federation of Robotics, ISO 8373, abrufbar unter: <http://www.ifr.org/industrial-robots/> (Stand 06.01.2015).
7. [http://www.toyota-global.com/company/history\\_of\\_toyota/75years/data/business/housing/toyotahome.html](http://www.toyota-global.com/company/history_of_toyota/75years/data/business/housing/toyotahome.html) (Stand 20.08.2014).
8. [http://www.toyota-global.com/company/history\\_of\\_toyota/75years/data/business/housing/housing\\_sales\\_volumes.html](http://www.toyota-global.com/company/history_of_toyota/75years/data/business/housing/housing_sales_volumes.html) (Stand 20.08.2014).
9. <http://www.yhbm.com/index.php?siteid=3> (Stand 09.09.2013).
10. <http://www.kuka-robotics.com/de/company/group/milestones/1971.htm> (Stand 05.09.2014).
11. ISO 8373:2012(en): Robots and robotic devices, abrufbar unter: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en> (Stand 04.06.2014)
12. International Federation of Robotics: „Executive Summary“, 2014, abrufbar unter: [http://www.ifr.org/uploads/media/Executive\\_Summary\\_WR\\_2014\\_02.pdf](http://www.ifr.org/uploads/media/Executive_Summary_WR_2014_02.pdf) (Stand 03.01.2015).
13. United Nations Economic Commission for Europe, International Federation of Robotics: Pressemitteilung zur Studie „World Robotics 2005“, Geneva, 2005, abrufbar unter: [http://www.unece.org/fileadmin/DAM/press/pr2005/05stat\\_p03e.pdf](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/press/pr2005/05stat_p03e.pdf) (Stand 03.09.2014).

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1. „Porträtbüste von Filippo Brunelleschi, Andrea Cavalcanti, Dommuseum, Florenz“ In: Pizzigoni, A.: „Fillippo Brunelleschi“, Verlag für Architektur, Zürich München, 1991.

Abb. 2. „Mögliche Variante des Lehrgerüsts bzw. der armadura“, Zeichnung nach Nelli, 1755 In: Prager, F. D., Scaglia, G.: „Brunelleschi, Studies of his Technology and Inventions“, Dover Publications, New York, 1970, S. 28.

Abb. 3. „Die Version des innenliegenden Gerüsts, verglichen mit der außenliegenden Option“, Schematische Zeichnung von G. Rich, 1969 In: Prager, F. D., Scaglia, G.: „Brunelleschi, Studies of his Technology and Inventions“, Dover Publications, New York, 1970, S. 26.

Abb. 4. „Gesamtstruktur der Domkuppel“, Zeichnung nach P. A. Rossi In: Pizzigoni, A.: „Fillippo Brunelleschi“, Verlag für Architektur, Zürich München, 1991, S. 36.

Abb. 5. „Aufbau der Domschale“, Modellsektion nach Verga In: Pizzigoni, A.: „Fillippo Brunelleschi“, Verlag für Architektur, Zürich München, 1991, S. 40.

Abb. 6. „Maschinerie auf der Baustelle zum Abhängen des Rahmenwerks, Kristallpalast“ In: Friemert, C.: „Die Gläserne Arche. Kristallpalast London 1851 und 1854“, Prestel Verlag, München, 1984, S. 32.

Abb. 7. „Maschinerie auf der Baustelle zum Bohren des Rahmenwerks, Kristallpalast“ In: Friemert, C.: „Die Gläserne Arche. Kristallpalast London 1851 und 1854“, Prestel Verlag, München, 1984, S. 33.

Abb. 8. „Das Mittelschiff, von der ersten Galerie her gesehen, erste Bauphase, Kristallpalast“ In: Friemert, C.: „Die Gläserne Arche. Kristallpalast London 1851 und 1854“, Prestel Verlag, München, 1984, S. 15.

Abb. 9. „Südliches Querschiff, vom Park her gesehen, Kristallpalast“ In: Friemert, C.: „Die Gläserne Arche. Kristallpalast London 1851 und 1854“, Prestel Verlag, München, 1984, S. 25.

Abb. 10. „Das Mittelschiff, vom Südende aus gesehen, Innenraum, Kristallpalast“ In: Friemert, C.: „Die Gläserne Arche. Kristallpalast London 1851 und 1854“, Prestel Verlag, München, 1984, S. 129.

Abb. 11. „Karosseriebearbeitung in der Automobilindustrie, Kuka-Industrieroboter“, Urheber: KUKA Systems GmbH, abrufbar unter: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Application\\_field\\_automotive.jpg?uselang=de#filelinks](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Application_field_automotive.jpg?uselang=de#filelinks) (Stand 03.05.2015).

Abb. 12. „Bearbeitung von Solarzellelement, Kuka-Industrieroboter“, Urheber: KUKA Systems GmbH, abrufbar unter: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Application\\_field\\_solar.jpg?uselang=de](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Application_field_solar.jpg?uselang=de) (Stand 03.05.2015).

Abb. 13. „*Gesamtstruktur, Die programmierte Wand, ETH Zürich, 2006*“, Urheber: Gramazio Kohler Research, ETH Zürich, abrufbar unter: [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=81&Copyright=18&lang=d&BilderGezuegelt=1&image\\_count=3&closeText=click%20to%20close](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=81&Copyright=18&lang=d&BilderGezuegelt=1&image_count=3&closeText=click%20to%20close) (Stand 03.05.2015).

Abb. 14. „*Roboter mit Endeffektor, Die programmierte Wand, ETH Zürich, 2006*“, Urheber: Gramazio Kohler Research, ETH Zürich, abrufbar unter: [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=81&Copyright=18&lang=d&BilderGezuegelt=1&image\\_count=4&closeText=click%20to%20close](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=81&Copyright=18&lang=d&BilderGezuegelt=1&image_count=4&closeText=click%20to%20close) (Stand 03.05.2015).

Abb. 15. „*Robotic Clay Molding - Detail, Gramazio Kohler Research, Barcelona, 2012*“, Urheber: Gramazio Kohler Research, ETH Zürich, abrufbar unter: [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=235&Copyright=18&lang=d&BilderGezuegelt=1&image\\_count=0&closeText=click%20to%20close](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=235&Copyright=18&lang=d&BilderGezuegelt=1&image_count=0&closeText=click%20to%20close) (Stand 03.05.2015).

Abb. 16. „*Robotic Clay Molding, Gramazio Kohler Research, Barcelona, 2012*“, Urheber: Gramazio Kohler Research, ETH Zürich, abrufbar unter: [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=235&Copyright=18&lang=d&BilderGezuegelt=1&image\\_count=1&closeText=click%20to%20close](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=235&Copyright=18&lang=d&BilderGezuegelt=1&image_count=1&closeText=click%20to%20close) (Stand 03.05.2015).

Abb. 17. „*Patentierter Druckkopf für das VPRP-Verfahren*“ In: Oxman, N.: „Variable property rapid prototyping“, S. 25 In: „Virtual and Physical Prototyping“, Vol. 6, No. 1, Taylor & Francis, London, 2011, abrufbar unter: [http://matter.media.mit.edu/assets/pdf/Publications\\_VPRP.pdf](http://matter.media.mit.edu/assets/pdf/Publications_VPRP.pdf) (Stand 03.12.2014).

Abb. 18. „*Nahaufnahme der Oberflächenstruktur, Chaiselongue Beast, Neri Oxman*“, Urheber: Yoram Reshef, abrufbar unter: <http://www.materialecology.com/projects/details/beast#prettyPhoto> (Stand 09.06. 2014).

Abb. 19. „*Gedruckte Skulptur Radiolaria, D-Shape*“, Urheber: Edyta Zwirecka, abrufbar unter: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c0/3D-Printed-Building-5641.jpg?uselang=de> (Stand 17.03.2015).

Abb. 20. „*Erste Schichten des Druckverfahrens, Skulptur Radiolaria, D-Shape*“, abrufbar unter: <http://press.d-shape.com/index.php?flag=2.1&id=84> (Stand 17.03.2015).

Abb. 21. „*Schichtenqualität nach abgeschlossenem Druckvorgang, Skulptur Radiolaria, Fabrikationsmethode D-Shape*“, abrufbar unter: <http://press.d-shape.com/index.php?flag=2.1&id=85> (Stand 17.03.2015).

Abb. 22. „*Gesamtstruktur, ICD/ITKE Pavillon 2012*“, Urheber: ICD/ITKE, Universität Stuttgart, abrufbar unter: <http://www.achimmenges.net/?p=5561> (Stand 07.05.2015).

Abb. 23. „*Fertigungssequenz Industrieroboter und Gerüst, ICD/ITKE Pavillon 2012*“, Urheber: ICD/ITKE, Universität Stuttgart, abrufbar unter: <http://www.achimmenges.net/?p=5561> (Stand 07.05.2015).

Abb. 24. „*Manuelle Montage der robotisch gefertigten Module, ICD/ITKE Pavillon 2013/2014*“, Urheber: ICD/ITKE, Universität Stuttgart, abrufbar unter: <http://www.achimmenges.net/?p=5713> (Stand 07.05.2015).

Abb. 25. „*Robotische Fabrikation der Module, ICD/ITKE Pavillon 2013/2014*“, Urheber: ICD/ITKE, Universität Stuttgart, abrufbar unter: <http://www.achimmenges.net/?p=5713> (Stand 07.05.2015).

Abb. 26. „*Gesamtstruktur, ICD/ITKE Pavillon 2011*“, Urheber: ICD/ITKE, Universität Stuttgart, abrufbar unter: <http://www.achimmenges.net/?p=5123> (Stand 07.05.2015).

Abb. 27. „*Robotische Fertigung der Fingerzinkungen, ICD/ITKE Pavillon 2011*“, Urheber: ICD/ITKE, Universität Stuttgart, abrufbar unter: <http://www.achimmenges.net/?p=5123> (Stand 07.05.2015).

Abb. 28. „*Druckvorgang der ersten Fundamentschichten, Foundation Robot, Minibuilders*“, Urheber: IaaC Barcelona, abrufbar unter: <http://iaac.net/printingrobots/> (Stand 20.03.2014).

Abb. 29. „*Anfangsphase des Druckvorgangs, Grip Robot, Minibuilders*“, Urheber: IaaC Barcelona, abrufbar unter: <http://iaac.net/printingrobots/> (Stand 20.03.2014).

Abb. 30. „*Zwischenphase des Druckvorgangs, Grip Robot und Industrieextruder, Minibuilders*“, Urheber: IaaC Barcelona, abrufbar unter: <http://iaac.net/printingrobots/> (Stand 20.03.2014).

Abb. 31. „*Nahaufnahme vom Bewegungsmechanismus, Grip Robot, Minibuilders*“, Urheber: IaaC Barcelona, abrufbar unter: <http://iaac.net/printingrobots/> (Stand 20.03.2014).

Abb. 32. „*Endphase des Druckvorgangs, Grip Robot und Industrieextruder, Minibuilders*“, Urheber: IaaC Barcelona, abrufbar unter: <http://iaac.net/printingrobots/> (Stand 20.03.2014).

Abb. 33. „*Nahaufnahme von Extrusionsdüse und Heizelementen, Grip Robot, Minibuilders*“, Urheber: IaaC Barcelona, abrufbar unter: <http://iaac.net/printingrobots/> (Stand 20.03.2014).

Abb. 34. „Ablagerung der vertikalen Aussteifungsschichten, Vacuum Robot, Minibuilders“, Urheber: IaaC Barcelona, abrufbar unter: <http://iaac.net/printingrobots/> (Stand 20.03.2014).

