

Kunsthochschule für Medien Köln  
Bereich Kunst und Medienwissenschaften

# In-situ-Fabrikation

Neue Potenziale roboterbasierter Bauprozesse auf der Baustelle

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades Dr. phil.  
im Fach Experimentelle Informatik

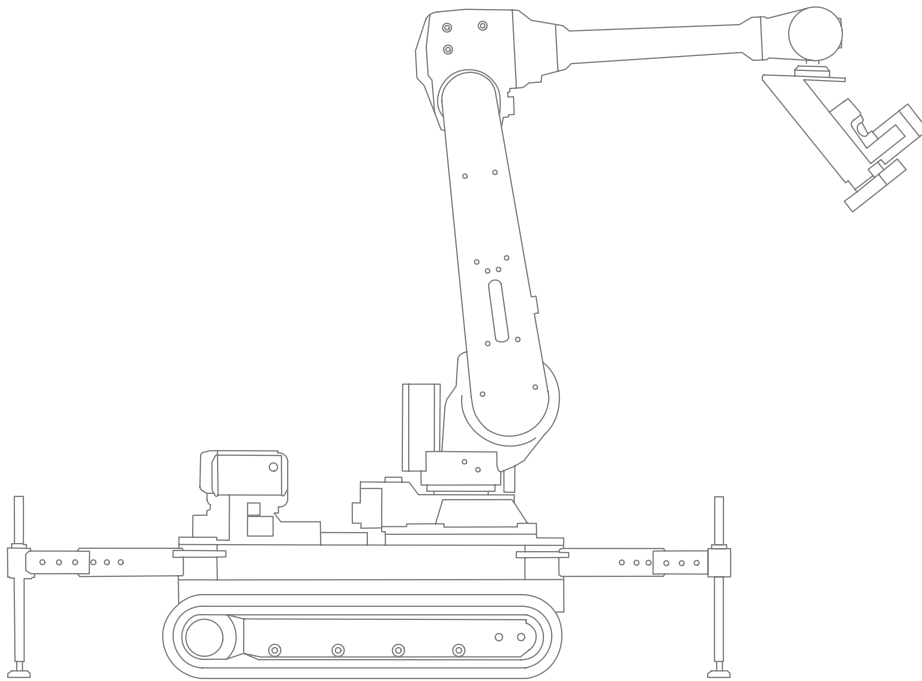
vorgelegt von  
Volker Helm  
Dipl.-Ing. Architekt aus Siegen

Köln, November 2014

Mit Genehmigung der Kunsthochschule für Medien Köln

1. Gutachter: Prof. Dr. Georg Trogemann  
Kunsthochschule für Medien Köln  
Lehrstuhl für Experimentelle Informatik im  
Lehrgebiet Kunst- und Medienwissenschaften

2. Gutachter: Prof. Matthias Kohler  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Departement Architektur  
Professur für Architektur und Digitale  
Fabrikation



*Abbildung 1: Die mobile Robotereinheit*

Die mobile Robotereinheit wurde im Rahmen eines von der Europäischen Union geförderten Forschungsprojektes an der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation des Departements Architektur der ETH Zürich in Kooperation mit einem Industriepartner entwickelt (siehe Kapitel 4.4.1 *Experimentaufbau*).

**Inhaltsverzeichnis**

Zusammenfassung ..... VII  
Schlüsselwörter ..... VIII  
Abstract ..... IX  
Keywords ..... X

**1. Einleitung ..... 1**

    1.1 Forschungsleitende Frage ..... 5  
    1.2 Forschungsleitende These ..... 8  
    1.3 Methode ..... 9  
    1.4 Stand der Praxis und Forschung ..... 13  
        1.4.1 Stationäre Fabrikation ..... 18  
        1.4.2 Baustellenfabrik und Feldfabrikation ..... 26  
        1.4.3 In-situ-Fabrikation ..... 31  
    1.5 Abgrenzung und Ziel der Arbeit ..... 33

**2. Algorithmen und Automaten ..... 35**

    2.1 Vom Anwender zum Entwickler ..... 37  
    2.2 Algorithmen in der Architektur ..... 40  
    2.3 Algorithmen und Material ..... 43  
    2.4 Programmierbare Produktionsmaschinen ..... 45  
    2.5 Die Steuerung und Regelung maschineller Bauprozesse ..... 52



## In-situ-Fabrikation

<b>3. Die digitale Kette im Bauprozess .....</b>	<b>67</b>
3.1 Die konventionelle digitale Prozesskette.....	67
3.2 Individuelle Massenproduktion .....	72
3.3 Verwendung parametrischer Werkzeuge in Großprojekten .....	75
3.3.1 Digitale Werkzeuge .....	77
3.3.2 Datengenerierung .....	77
3.3.3 Umsetzung.....	79
<b>4. In-situ-Fabrikation.....</b>	<b>82</b>
4.1 Potenziale der In-situ-Fabrikation .....	83
4.2 Forschungsinhalte .....	88
4.3 Experimente I – Vorstudien zur In-situ-Fabrikation .....	91
4.3.1 Experimentaufbau.....	93
4.3.2 Materialparameter.....	95
4.3.3 Datengenerierung .....	98
4.3.4 Fabrikationsprozess .....	103
4.3.5 Produktumsetzung .....	118
4.4 Experimente II – In-situ-Fabrikation.....	123
4.4.1 Experimentaufbau.....	124
4.4.2 Toleranzen und Scanprozesse.....	136
4.4.3 Mensch-Maschine-Interaktion.....	143
4.4.4 Lokalisation und Mobilität .....	151
4.4.5 Reaktive Prozesse .....	162
<b>5. Zusammenfassung und Auswertung der Experimente.....</b>	<b>167</b>
5.1 Zusammenfassung und Auswertung der Experimente I.....	167
5.2 Zusammenfassung und Auswertung der Experimente II .....	170

<b>6. Schlussbetrachtung .....</b>	<b>173</b>
6.1 Forschungsergebnisse .....	173
6.2 Zukünftige Herausforderungen der In-situ-Fabrikation .....	174
6.2.1 Erweiterung dynamischer Prozesse .....	175
6.2.2 Kooperierende Baurobotik .....	175
6.2.3 Künstliche Intelligenz.....	176
6.2.4 Untersuchung weiterführender architektonischer Konzepte .....	176
<b>7. Anhang .....</b>	<b>178</b>
7.1 Literaturverzeichnis .....	178
7.2 Publikationen zur In-situ-Fabrikation.....	186
7.3 Benutzte Internetseiten .....	187
7.4 Tabellen- und Abbildungsnachweis .....	189
7.5 Projektverzeichnis .....	191
7.6 Danksagung .....	197
7.7 Curriculum Vitae in Deutsch.....	198
7.8 Curriculum Vitae in English.....	199
7.9 Eidesstattliche Erklärung.....	200

### **Zusammenfassung**

Die technischen Anforderungen zukünftiger Bauprozesse werden immer komplexer und erfordern maßgeschneiderte Lösungen. Computergesteuerte Produktionsmethoden ermöglichen die Herstellung individuell gestalteter Bauteile ohne erhöhten Kosten- und Zeitaufwand. Im Gegensatz zu stationären Maschinen können mobile Einheiten direkt auf einer bestehenden Baustelle eingesetzt werden und die Leistungsfähigkeit digital beschriebener Elemente produktiv mit einer In-situ-Bauweise vereinen.

Der direkte Einsatz von Industrierobotern in der Architektur und die roboterbasierte Fertigung im Maßstab 1 : 1 sind Kernthemen dieser Arbeit. Mobile Robotersysteme müssen die gebaute Umgebung wahrnehmen und auf veränderte Bedingungen reaktiv eingehen können. Als Grundlage für die Dissertation dient die erforderliche Untersuchung des neuartigen Zusammenschlusses der roboterbasierten digitalen Fabrikation mit kognitiven Fähigkeiten. Der experimentelle Schwerpunkt dieser Forschungsarbeit liegt daher ebenso auf der digitalen Ansteuerung und Durchführung maschineller Bauprozesse wie auf der Entwicklung einer mobilen Robotereinheit und von erweiterten Rückkopplungs- und Lokalisierungstechniken durch Sensorik.

Der Synergieeffekt zwischen den Forschungsbereichen Architektur und Experimentelle Informatik ist angesichts dieser interdisziplinären Themenbereiche von zentraler Bedeutung.

Volker Helm

**Schlüsselwörter**

Additive Fabrikation, Algorithmen, Baustellenproduktion, Daten und Material, digitale Fabrikation, digitale Prozesskette, generatives Design, In-situ-Fabrikation, Mensch-Maschine-Interaktion, Objekterkennung, mobile Robotik, reaktive Systeme, Rückkopplungsprozesse

### **Abstract**

The technical demands of future construction processes are becoming increasingly complex and require customised solutions. Computer-controlled production methods allow for the manufacture of individually designed building components without increasing outlay in terms of costs or time. In contrast to stationary machines, mobile units can be deployed directly on an existing building site and thus combine the capabilities of digitally defined elements with an in-situ construction technique.

The core themes of this dissertation are the direct use of industrial robots in architecture and robot-assisted in-situ fabrication on a 1 : 1 scale. Mobile robotic systems must be able to perceive the constructed environment and respond to changing conditions. The necessary investigation of the innovative fusion of robot-based digital fabrication and cognitive abilities forms the basis of this research. Thus, the experimental focus of this research is on the development of a mobile robotic unit and advanced feedback and localisation techniques, as well as the digital management and implementation of mechanical construction processes.

Due to the interdisciplinary nature of this subject area, the synergetic effect between the research areas of architecture and experimental computer science is of central importance.

Volker Helm

**Keywords**

additive fabrication, algorithms, data and material, digital fabrication, digital process chains, feedback processes, generative design, in-situ fabrication, human-machine interaction, object recognition, on site production, mobile robotics, reactive systems

## 1. Einleitung

Überwiegend sind die Auswirkungen von Computern in immaterieller Form spürbar. Aufgrund der zunehmenden Kompaktheit leistungsstarker Mikrochips werden Kleinstrechner heutzutage in jeder erdenklichen Situation eingesetzt. Im Alltag finden sie sich in Objekten sowie bei der automatischen Identifizierung und Lokalisierung von Waren und Lebewesen. Sogenannte Funketiketten<sup>1</sup>, wiederzufinden beispielsweise auf Personalausweisen und als Klebefolie auf Postsendungen, besitzen derart geringe Abmessungen, dass sie sogar problemlos in Menschen oder Tiere implantiert werden können: kleine, eigenständige Einheiten, die miteinander vernetzt sind und mit ihrer Umwelt verschmelzen. Die Kosten für diese Technologien liegen je nach Stückzahl im Bereich von nur wenigen Cent pro Transponder.<sup>2</sup> Die gewonnenen Informationen werden in Sekundenschnelle auf Datenbanken verknüpft, gebündelt sortiert und ausgewertet. Dies geschieht ohne Verzögerungen und digital.

Ziel dieser Digitalisierung des Alltags – auch als *Ubiquitous Computing*<sup>3</sup> bezeichnet – ist es, möglichst unauffällig und versteckt agieren zu können. Jedoch können verdeckte Handlungsanweisungen, *Algorithmen*<sup>4</sup>, mithilfe computergesteuerter Produktionsmaschinen als reale materielle Produkte in die physische Welt überführt werden. Durch die Verknüpfung von *Code und Material*<sup>5</sup> besteht die Möglichkeit, die anonymisierten digitalen Zeichen wieder aufzudecken

---

<sup>1</sup> Funketikett ist der umgangssprachliche Begriff für die Abkürzung RFID, die aus dem Englischen für *radio-frequency identification* abgeleitet ist.

<sup>2</sup> Ein Transponder ist ein Mikrochip, der eingehende Signale aufnimmt und sie weiterleitet.

<sup>3</sup> Der Begriff *Ubiquitous Computing* wurde 1988 erstmals von Mark Weiser ins Leben gerufen und beschreibt die Allgegenwärtigkeit von Computern. Weiser, Mark. „The computer for the 21st century.“ *Scientific American*, Vol. 265, Nr. 3 (1991): 94–104.

<sup>4</sup> „Ein Algorithmus ist ein abstraktes Rezept zur Beschreibung eines Prozesses, der von einem Menschen, von einem Computer oder von einem anderen Werkzeug ausgeführt werden kann.“ In Harel, David, und Yishai Feldman. *Algorithmik: Die Kunst des Rechnens*. Übersetzung: Micaela Krieger-Hauwede. Berlin/Heidelberg: Springer, 2006, S. ix.

<sup>5</sup> „Die Materialeigenschaften digitaler Objekte sind mit dem Code verwachsen. Genauso wichtig, wie die entstehenden neuen Eigenschaften, ist der sich aus dem Verbund von Code und Material neu formierende Eigensinn. In jedem Material stecken mehr Informationen, als wir uns im explizit bewusst sind.“ Trogemann, Georg, Hg. *Code und Material: Exkursionen ins Undingliche*. Wien/New York: Springer, 2010, S. 25.

und auf die gebaute Umwelt<sup>6</sup> Einfluss nehmen zu lassen. Beispiele hierfür sind in der Industrie, in der Architektur und in der medialen Kunst zu finden. Für industrielle Anwendungen hat sich die Kopplung von Programmen und automatisierter Fertigung in Form der *Mass Customization*<sup>7</sup>, des Individualisierens von Massenprodukten, etabliert. Kunden haben die Möglichkeit, ein auf mehrere verstellbare Parameter ausgelegtes Produkt in einem vorgegebenen Rahmen nach ihren Wünschen virtuell zu konfigurieren. Ohne dass spezielle Programmierkenntnisse vorhanden sein müssen, kann der Anwender direkt an der Schnittstelle zur Ansteuerung einer Produktionsmaschine eingreifen und deren Determinanten beeinflussen. Für die Herstellungskosten spielen die unterschiedliche Ausführung und die scheinbare Ungleichheit der Ware eine untergeordnete Rolle, da die Produktionsmaschine direkt mit den eingestellten Spezifikationen angesteuert wird und auf alle Kombinationsmöglichkeiten automatisiert eingehen kann.<sup>8</sup>

Die Auswirkungen des Zusammenspiels von Algorithmen und Fabrikation in der Architektur, der gebauten Umwelt, sind hinsichtlich der Komplexität vielschichtiger als die *Mass Customization* industrieller Produkte und haben in Anbetracht des rasanten Bedeutungsanstiegs für die Praxis eine heftige Diskussion entfacht. Im architektonischen Kontext ist die *Digitale Materialität*<sup>9</sup> daher nicht mehr nur als reine Verknüpfung von Datengenerierung und Herstellung anzusehen. Die Verflechtung von Daten und Material ermöglicht vielmehr die individuelle Einbettung von Entwurfs- und Konstruktionszusammenhängen. Es entsteht eine Synthese zwischen

---

<sup>6</sup> Der Begriff „gebaute Umwelt“ wird im Kontext der Architektur, des Designs und der Kunst verwendet und beschreibt das vom Menschen Geschaffene. Dies können beispielsweise Straßen, Gebäude, Kunstwerke oder Produkte aus der Industrie sein. Im Zusammenhang mit der In-situ-Fabrikation sind mit der gebauten Umwelt bestehende Gebäudestrukturen unterschiedlicher Baustellensituationen, wie beispielsweise Roh-, Um- oder Anbauten, gemeint.

<sup>7</sup> Der Begriff *Mass Customization* setzt sich aus den gegensätzlichen Begriffen „Massenproduktion“ und „Einzelfertigung“ zusammen. Der Durchbruch der *Mass Customization* im digitalen Zeitalter ist auf B. Joseph Pine II zurückzuführen. Pine II, B. Joseph. „Mass Customizing Products and Services.“ *Strategy & Leadership*, Vol. 21, Nr. 4 (1993): 6–55.

<sup>8</sup> In diesem Zusammenhang fällt häufig der Begriff „Scheinindividualität“.

<sup>9</sup> Auf die digitale Materialität im Kontext der Architektur wird erstmalig eingegangen in: Gramazio, Fabio, und Matthias Kohler. *Digital Materiality in Architecture*. Baden: Lars Müller Publishers, 2008.



## In-situ-Fabrikation

abstrakten Algorithmen und einem realen Baumaterial, das durch diese Verknüpfung mit digitalen Informationen belegt werden kann.

Der noch vor wenigen Jahren als reines Zeichenwerkzeug eingesetzte Computer befreit den Architekten zunehmend von den Zwängen klassischer Geometrie. Komplexe Formen werden im Rechner generiert und analysiert. Gewissermaßen papierlos werden die optimierten Produktionsdaten an eine Maschine gesendet, die ohne Pause oder Konzentrationsschwächen in großer Geschwindigkeit präzise Bauteile in der Vorfabrikation herstellen kann. Diese Bauteile folgen zwar alle denselben Grundregeln, können aber in der Ausformulierung unterschiedlich sein. Die fertigen Elemente werden zur Baustelle transportiert, und der meist manuell erfolgende Assemblierungsprozess kann beginnen. Die Rede ist von einer digitalen Prozesskette, die einen durchgängigen digitalen Entwurfs- und Produktionsprozess erlaubt.<sup>10</sup>

Gegenwärtige computergestützte Fabrikationsvorgänge sind meist auf eine subtraktive, das heißt materialabtrennende Fertigung<sup>11</sup> einzugrenzen. Eine entscheidende Weiterentwicklung dieser Prozesskette stellt die Einbindung additiver Fertigungsmethoden dar. Neben dem positiven ökologischen Aspekt, der vollständigen Verwendung des Baustoffes, besteht hierbei die Möglichkeit, das Potenzial der Verknüpfung von Algorithmen und maschinellen Prozessen größtmöglich auszunutzen. Räumlich komplexe Strukturen lassen sich aus einzelnen Elementen kontrolliert und automatisiert assemblieren. Dies betrifft konstruktive Aspekte wie statische Anforderungen oder die Fügung, daneben fließt aber zusätzlich und gezielt Funktionalität in die Ausformulierung neuartiger architektonischer Entwürfe ein. Der Entwurf und der Herstellungsprozess sind gekoppelt, die Bauteile digital organisiert und informiert. Außerdem ist, aufgrund des erhöhten beherrschbaren Komplexitätsgrades, durch die additive Erstellung

---

<sup>10</sup> Mehrere Anwendungsbeispiele für die digitale Kette sind in der folgenden Buchveröffentlichung zu finden: Hovestadt, Ludger. *Jenseits des Rasters – Architektur und Informationstechnologie: Anwendungen einer digitalen Architektonik/ Beyond the Grid – Architecture and Information Technology: Applications of a Digital Architectonic*. Basel/Boston/Berlin: Birkhäuser, 2010, S. 130–143.

<sup>11</sup> Materialabtrennend sind beispielsweise zerspanende Vorgänge wie das Fräsen. Tschätsch, Heinz, und Jochen Dietrich. *Praxis der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008, S. 157.

neuartiger Material- und Konstruktionssysteme ein Mehrwert an gestalterischen Möglichkeiten gegeben.

Für die Umsetzung additiver Bauprozesse eignen sich vor allem Industrieroboter.<sup>12</sup> Hierbei handelt es sich um einen präzisen Bewegungsapparat in Form eines Armes, der im Regelfall sechs Gelenke hat. Er ist als offenes generisches System anzusehen, da die Werkzeuge dem jeweiligen Prozess angepasst werden können. Dies stellt ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zur *Mass Customization* dar und bedeutet, dass der Anwendungsbereich nicht gänzlich vorbestimmt ist. Die konzeptuellen Überlegungen des Entwerfers werden somit nicht eingeschränkt und ermöglichen einen erweiterten Handlungsspielraum.

Die hier beschriebenen Ansätze, Algorithmen in Form von Architektur zu materialisieren, legen gleichwohl die Annahme einer perfekt dimensionierten Umwelt zugrunde, wie sie beispielsweise in der industriellen Vorfertigung anzutreffen ist. Ein fertiger Planungsstand mit den gewünschten Sollmaßen ist daher zwingend notwendig. Auf sich ändernde oder abweichende Bedingungen, die im Bauwesen häufig auftreten, kann nur vorgängig durch das Einplanen großer Toleranzen oder mit sehr aufwendigen nachträglichen Anpassungsarbeiten eingegangen werden. Die logische Konsequenz hieraus ist, dass es eines reaktiven Systems<sup>13</sup> bedarf, das sich im ständigen Austausch mit der Umwelt befindet und wechselseitig an Ort und Stelle agiert. Für die bauliche Umsetzung dieser reaktiven Prozesse wird eine kompakte mobile Roboteranlage vorgeschlagen. Diese Einheit, ausgestattet mit unterschiedlichen Feedbacksystemen, nimmt den Istzustand der zu bearbeitenden Situation direkt auf einer Baustelle auf. Hierbei wird

---

<sup>12</sup> In Kapitel 1.4 *Stand der Praxis und Forschung* und in Kapitel 2.4 *Programmierbare Produktionsmaschinen* werden Roboter, einschließlich Industrieroboter, näher untersucht.

<sup>13</sup> Stark kontrollgesteuerte oder ereignisgesteuerte Systeme werden als „reaktive“ Systeme bezeichnet. „Ihre Lebensaufgabe besteht darin, auf viele verschiedenartige Ereignisse, Signale und Bedingungen komplex zu reagieren.“ Harel, David, und Yishai Feldman. *Algorithmik: Die Kunst des Rechnens*. Übersetzung: Micaela Krieger-Hauwede. Heidelberg/Dordrecht/London/New York: Springer, 2006, S. 434. In dieser Arbeit wird unter einem „reaktiven“ System verstanden, dass sich ein System während seines Ablaufes im ständigen Austausch beziehungsweise in Kommunikation mit seiner Umgebung (Baustelle) befindet. Das System soll auf bauliche Ungenauigkeiten, Materialtoleranzen, Neupositionierung und menschliche Anweisungen reagieren.

## In-situ-Fabrikation

aufgrund der unübersichtlichen und unsaubereren Gegebenheiten einer Baustelle bewusst von einem völlig autonomen System abgesehen. Die Mensch-Maschine-Interaktion ist daher eine unbedingte Voraussetzung: Sie kann beispielsweise komplexe Scanvorgänge durch intuitive menschliche Anweisungen stark reduzieren und vereinfachen. Neben der Fähigkeit, Umgebungsparameter zu erkennen, ist diese Maschine in der Lage, die gesammelten Daten direkt zu verarbeiten, auf Abweichungen von der Idealplanung an Ort und Stelle einzugehen und aufgrund einer computerbasierenden Herstellung vielschichtige architektonische Bauteile im Maßstab 1 : 1 herzustellen.

Der neuartige Zusammenschluss der digitalen Fabrikation mit kognitiven Fähigkeiten ermöglicht es, dass die Information des Materials um den wichtigen Faktor der Echtzeitinformation bezüglich der Umgebung erweitert wird.

### 1.1 Forschungsleitende Frage

*Wie können roboterbasierte Fertigungsmaschinen in einer nicht definierten und sich ständig ändernden Bauumgebung operativ<sup>14</sup> eingesetzt werden?*

Bauprozesse vollziehen sich zu einem großen Teil durch manuelle Arbeit; die Automatisierung auf einer Baustelle ist im Vergleich zu anderen Industriezweigen sehr gering.<sup>15</sup> Auf der anderen Seite steigen aber die gestalterischen und technischen Anforderungen, die heutzutage an Bauten gestellt werden, und werden dabei immer komplexer. Die oftmals aus dem gewissermaßen „ad hoc“ digital generierten Entwurf hervorgehenden, individuell angepassten Bauelemente verursachen hohe Kosten und ein erhöhtes Fehlerpotenzial in der Ausführung. Für die Realisierung solcher Bauvorhaben sind innovative Umsetzungskonzepte erforderlich. Gemeint sind computergestützte

---

<sup>14</sup> Der Duden online definiert die Bedeutung des Begriffs „operativ“ unter anderem mit: „konkrete Maßnahmen treffend, sie unmittelbar wirksam werden lassend“. Duden online, Stichwort: operativ, vgl.

<http://www.duden.de/node/650675/revisions/1329384/view> (abgerufen am 11.08.2014). In dieser Arbeit werden die konkreten Maßnahmen auf die unmittelbare Erstellung architektonischer Bauteile auf einer Baustelle bezogen.

<sup>15</sup> Balaguer, Carlos, und Mohamed Abderrahim. „Trends in Robotics and Automation in Construction.“ In *Robotics and Automation in Construction*, herausgegeben von Carlos Balaguer und Mohamed Abderrahim, 1–20. Wien: InTech, 2008, S. 2.

Entwurfswerkzeuge, die in direkter Verbindung mit programmierbaren Fertigungsmaschinen stehen. Angesteuert durch eine generierte Datenerzeugung ermöglichen sie eine durchgängig digital beschriebene Produktion von nicht standardisierten und somit ungleichen Bauteilen – ohne den erhöhten Kostenaufwand, der einer Einzelfertigung entgegensteht. In der Architektur hat sich diese Methode in der Vorfabrikation etabliert, da der ökonomische Nutzen erkannt wurde. Gleichwohl zeigen sich bei genauer Betrachtung der herkömmlichen digitalen Prozesskette wesentliche Nachteile. Diese Unzulänglichkeiten führen zu drei Grundannahmen, auf denen die in dieser Arbeit gestellte zentrale Forschungsfrage gründet:

### *1) Additive Fabrikation*

Die meisten der programmierten Unikate werden in der gängigen CAD/CAM-Praxis<sup>16</sup> subtraktiv hergestellt. Darunter sind material-abtragende Techniken wie zum Beispiel Fräsen, Laserschneiden und Wasserstrahlschneiden oder computergesteuerte Stanzmaschinen zu verstehen. Das Bauteil wird maschinell aus einem Werkstoff herausgetrennt. Nachteilig bei der subtraktiven Fertigung sind der Verlust von Material durch Zerspanen und das Produzieren von Reststücken. Die Energie, die für die Herstellung dieser Abfallprodukte benötigt wird, findet zumeist keinen Nutzen und geht verloren. Resultierend aus den Nachteilen und Einschränkungen der subtraktiven Fertigungsprozesse stellt sich die Ausgangsfrage nach den Additiv- und Schichtbauverfahren. Die additiven Methoden zeichnen sich dadurch aus, dass Bauteile durch das Hinzufügen von einem oder mehreren verschiedenartigen Werkstoffen entstehen. Dadurch fallen Materialreste weg, da nur das effektiv benötigte Material verwendet wird. Im Gegensatz zu den gängigen subtraktiven Maschinen, die meist auf nur einen bestimmten Fertigungsprozess ausgelegt sind, werden in dieser Forschungsarbeit Industrieroboter als additive Fabrikationssysteme untersucht. Aufgrund der Größe und der Freiheitsgrade

---

<sup>16</sup> CAD (Computer Aided Design) steht für den rechnergestützten Entwurf, CAM (Computer Aided Manufacturing) für die computergestützte Produktion. Die Verbindung CAD/CAM bezeichnet einen durchgängigen digitalen Entwurfs- und Produktionsprozess. Gershenfeld, Neil. *FAB: The Coming Revolution on Your Desktop – from Personal Computers to Personal Fabrication*. New York: Basic Books, 2005, S. 43–51.

## In-situ-Fabrikation

dieser Maschinen besteht nur mit Robotern die Möglichkeit, komplexe additive, mit digitalen Informationen angereicherte Strukturen im Maßstab 1 : 1 zu bauen.

### *2) Ortsunabhängige Produktion*

Bauteile, die in der Vorproduktion entstanden sind, müssen zu ihrem Einsatzort transportiert und manuell assembliert werden. Neben den ökologischen und ökonomischen Nachteilen steht der Vorfertigung auch ein zusätzlicher Kostenaufwand durch die spezielle Absicherung empfindlicher Bauteile entgegen. Anstelle der Option, Elemente auf die Baustelle zu befördern, wird der Einsatz einer flexiblen und kompakten mobilen Maschine vorgeschlagen, die es ermöglicht, direkt in einer bestehenden Gebäudestruktur zu produzieren.

### *3) Reaktives System*

Vorgefertigte Bauelemente liegen der theoretischen Dimensionierung ihres Einsatzortes, den Sollmaßen des Planstandes, zugrunde. Weicht die Planung der Sollmaße vom Istzustand der vorhandenen Bausituation ab, ist der Nutzen einer präzisen Vorproduktion sekundär bis hinfällig, da ein nachträgliches Abändern der Fertigteile sehr aufwendig ist und dem eigentlichen Grundgedanken einer maßgeschneiderten digitalen Fabrikation entgegensteht. Zu untersuchen wäre daher, ob eine mobile Produktionsmaschine in der Lage ist, die Istsituation der Umgebung anhand von 3-D-Scantechniken zu erfassen, reaktiv auf sie einzugehen und die aus der Rückkopplung gewonnenen Informationen wieder in die Logik und Ausformulierung der Bauteile einfließen zu lassen.

Ein solches reaktives System muss darüber hinaus imstande sein, außer auf vorhersehbare auch auf unkalkulierbare Situationen zu reagieren. Die Anzahl der Sonderfälle mit nahezu unendlichen Kombinationsmöglichkeiten würde aber die technischen und programmierbaren Möglichkeiten übersteigen, weshalb zusätzlich die Kooperation von Mensch und Maschine untersucht wird. Dort, wo die Apparatur keinen Lösungsweg mehr findet, setzt die Unterstützung durch den Menschen ein. Daher wird von einem völlig autonom arbeitenden System abgesehen und die direkte Interaktion vorgeschlagen.

## 1.2 Forschungsleitende These

Die eingangs beschriebene Forschungsfrage, ob roboterbasierte Fertigungsmaschinen in einer nicht definierten und sich ständig ändernden Bauumgebung operativ eingesetzt werden können, leitet sich als logische Schlussfolgerung aus den vorher dargelegten Nachteilen bestehender Produktionsmethoden ab. Jedoch wird nicht nur die gradlinige Weiterentwicklung vorhandener Systeme vorgeschlagen. Vielmehr sind für diese herausfordernde Arbeit neuartige, für die Architektur unübliche Vorgehensweisen zu untersuchen und zu kombinieren. Beispielsweise sind fächerübergreifend Disziplinen wie Informatik und Robotik mit in die Forschung einzubeziehen. Aus der Forschungsfrage und den formulierten Anforderungen wird daher folgende für diese Arbeit zielsetzende These abgeleitet:

Die genaue Untersuchung der herkömmlichen digitalen Prozesskette im architektonischen Kontext wirft kritische Fragen hinsichtlich Ökologie, Wirtschaftlichkeit und des Abgleichs von präzisen vorfabrizierten Bauelementen zur realen Bausituation auf. Wird die digitale Prozesskette durch ein mobiles reaktives Fabrikationssystem, das sich im ständigen Austausch mit der Umwelt befindet und wechselseitig an Ort und Stelle agiert, ersetzt, entfallen die Logistik komplexer Konstruktionssysteme und die Maßdifferenzen infolge der Vorproduktion. Die aus der Rückkopplung gewonnenen Informationen können in die Logik und Ausformulierung der Bauteile einfließen, was bedeutet, dass der Verbund von Algorithmen und maschinellen Prozessen um den wichtigen Faktor der Echtzeitinformation aus der Umgebung erweitert wird. Dadurch entsteht ein neuartiger Zusammenschluss von digitalen Entwurfs- und Fabrikationsprozessen und einem mobilen reaktiven System (Abbildung 2).

# In-situ-Fabrikation

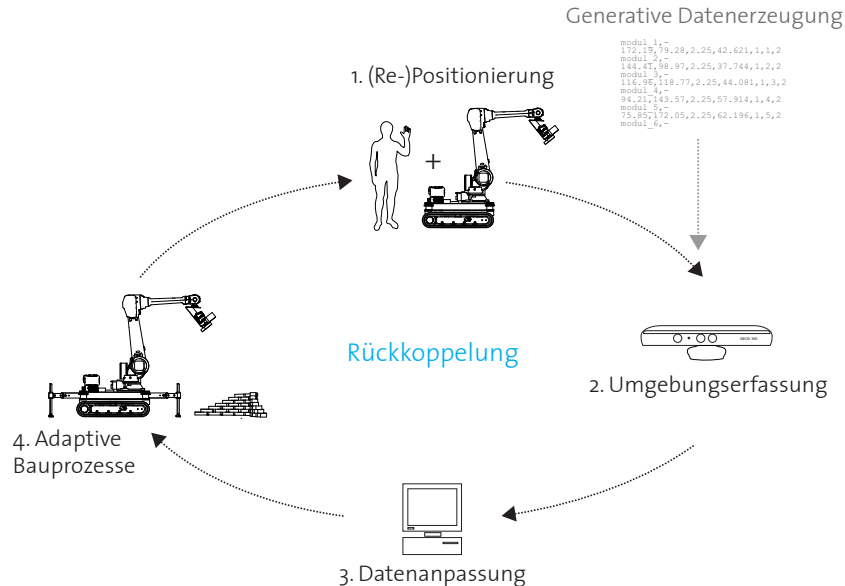


Abbildung 2: Die These eines reaktiven Systems in der digitalen Fabrikation

## 1.3 Methode

Die angeführte Fragestellung bildet mit der genannten These die Grundlage für die in dieser Dissertation angewandte Arbeitsmethodik, die sich vorwiegend auf empirische Forschungen stützt. Neben den architekturbezogenen experimentellen Untersuchungen spielen aber auch die notwendige Auseinandersetzung mit Algorithmen und die Verknüpfung von Code und Material in Verbindung mit programmierbaren Maschinen eine große Rolle. Daher basiert die Forschungsarbeit *In-situ-Fabrikation*<sup>17</sup> auf einer interdisziplinären Kooperation zwischen dem Lehrstuhl für Experimentelle Informatik<sup>18</sup>

<sup>17</sup> Der lateinische Begriff „in situ“ wird in verschiedenen Disziplinen verwendet und beschreibt Objekte, die in ihrer natürlichen Lage verbleiben und dort untersucht oder bearbeitet werden. In dieser Arbeit ist der Begriff im Zusammenhang mit der direkten und endgültigen Produktion von architektonischen Bauteilen „an Ort und Stelle“ (bestehende Grundstruktur eines Gebäudes) zu verstehen. Im Gegensatz zu einer Vorproduktion kann durch diese Vorgehensweise auf die natürlichen und sich ständig ändernden Konditionen der Umgebung eingegangen werden.

<sup>18</sup> Der Lehrstuhl für Experimentelle Informatik ist Teil der Kunsthochschule für Medien Köln (KHM) und steht unter der Leitung von Prof. Dr. Georg Trogemann. Neben der theoretischen Reflexion von Technologie und Anwendung in der Medienkunst bildet das Lab3 die Schnittstelle zwischen künstlerischer Praxis und den Computerwissenschaften. Trogemann, Georg, und Jochen Viehoff. *Code@Art: Eine*

der Kunsthochschule für Medien Köln und der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation<sup>19</sup> der ETH Zürich.

Zur Einführung in die Thematik der In-situ-Fabrikation sind in der Einleitung die Zusammenhänge zwischen Daten und Fabrikation zu beschreiben. Die für die Arbeit wichtigen Begriffe sind zu erörtern und zu definieren. Eine kritische Auseinandersetzung mit der herkömmlichen digitalen Prozesskette ist notwendig. Dadurch lassen sich die erweiterten Möglichkeiten mobiler Maschinen, die direkt und reaktiv auf der Baustelle eingesetzt werden, aufzeigen. Die Aktualität, der Mehrwert und die Einbettung in den Kontext dieser Arbeit sind herauszuarbeiten. Deswegen ist die Untersuchung des Forschungsstandes auf diesem Gebiet essenziell. Vorgegangene Untersuchungen und Beispiele der roboterbasierten Herstellung im Bauwesen sind vorzustellen. Neben eigenen Experimenten bilden sie den Ausgangspunkt für die Ausarbeitung des Untersuchungsgegenstandes in der vorliegenden Arbeit. Da es sich um eine interdisziplinäre Grundlagenforschung handelt, sind die Ziele und das Leistungsspektrum der Arbeit mit Blick auf den zu erwartenden Umfang im Vorfeld abzustecken.

*Methodik der Untersuchungen zu Algorithmen und Automaten in der Architektur*

Um ein Verständnis für die Potenziale einer maschinellen Umsetzung von digitalen Fabrikationseinheiten auf einer Baustelle entwickeln zu können, sind eingehende Voruntersuchungen erforderlich. Hierbei nehmen Algorithmen als eindeutige Handlungsanweisungen eine Schlüsselfunktion ein. Für die Zielsetzung – die Entwicklung neuartiger computergesteuerter In-situ-Bauprozesse – sind die möglichen Verkettungen von Algorithmen mit der Architektur, dem Material und der Maschine aufzuzeigen. Um die zukünftigen Herausforderungen mobiler

---

*elementare Einführung in die Programmierung als künstlerische Praktik.* Wien/New York: Springer, 2005.

<sup>19</sup> Die Professur für Architektur und Digitale Fabrikation der Professoren Fabio Gramazio und Matthias Kohler an der ETH Zürich untersucht das Zusammenwirken von computererzeugten Bauteilen und deren maschineller Fertigung. Die Verbindung von Daten und Material ist in diesem Zusammenhang angesichts der signifikanten Auswirkungen im architektonischen Entwurf von besonderem Interesse. Gramazio, Fabio, und Matthias Kohler. *Digital Materiality in Architecture*. Baden: Lars Müller Publishers, 2008.



## In-situ-Fabrikation

Robotereinheiten besser einschätzen zu können, ist aufbauend auf den Untersuchungen zu Algorithmen in der Architektur eine genaue Betrachtung der Evolution von Produktionsmaschinen – im Besonderen programmierbarer Automaten – notwendig. Weiter sind Schnittstellen von der produzierenden Maschine zur Architektur zu generieren. Der durchgängige Ablauf einer digitalen Prozesskette ist darzustellen und anhand von Beispielen aus Forschung und Praxis zu beleuchten.

### *Methodik der Experimente*

Der Hauptteil der Arbeit, die Experimente, lässt sich nur auf den Ausarbeitungen sowie den Schlussfolgerungen aus den vorherigen Kapiteln aufbauen. Für die experimentelle Forschung müssen daher vorab die Intention und die Potenziale der In-situ-Fabrikation verdeutlicht werden. Erst danach lassen sich die Forschungsinhalte der Experimente beschreiben und die neuartige Verbindung von digitaler Fabrikation und kognitiven Eigenschaften erstmalig anhand von Versuchen aufzeigen.

### *Experimente I – Vorstudien zur In-situ-Fabrikation<sup>20</sup>*

Die Experimente I sind die Grundlagen für die Untersuchung der In-situ-Fabrikation. Damit mit Industrierobotern flexibel auf bereits gebaute Bauteile reagiert werden kann, ist die Entwicklung von Rückkopplungsmethoden zur Gewinnung von Umgebungsinformationen unerlässlich. Mit den Experimenten I soll auf die durch das Material<sup>21</sup> bedingten, natürlich auftretenden Toleranzen mit einer

---

<sup>20</sup> Die Experimente I stehen im Zusammenhang mit dem von der Kommission für Technologie und Innovation geförderten Forschungsprojekt *Flexbrick* mit der Firma Keller AG Ziegeleien als Industriepartner. Ziel dieses Projektes ist es, unter Verwendung von Industrierobotern ein qualitativ hochwertiges, ökologisch nachhaltiges, im Entwurf flexibles, sehr leichtes Fassadensystem aus Ziegelsteinen automatisiert herzustellen.

Vgl. Gramazio & Kohler, *Architektur und Digitale Fabrikation*, ETH Zürich, <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/152.html> (abgerufen am 20.10.2014). Näher wird auf dieses Projekt in Kapitel 4.3 *Experimente I – Vorstudien zur In-situ-Fabrikation* dieser Arbeit eingegangen.

<sup>21</sup> Im Projekt *Flexbrick* bezieht sich der Begriff Material auf Backsteine. Der mit Sensorik ausgestattete Roboter geht auf die herstellungsbedingten geometrischen Verformungen der Steine ein und lässt die gewonnenen Informationen wieder in das Gesamtbau teil einfließen. Das Resultat ist ein gesamthaft hochpräzises Bauteil, dessen Einzelelemente in einem bestimmten Toleranzspektrum variieren können.

digitalen Rückführung der Abweichungen algorithmisch eingegangen werden, um sie durch gezieltes Intervenieren präzise auszugleichen. Zur Erreichung der Forschungsziele wird ein schon vorhandenes Forschungsequipment getestet und für unterschiedliche Versuche erweitert. Die Prüfung der Leistungsfähigkeit des gesamten Prozesses macht einzelne Experimente zur Herstellung des Baumaterials, zur Datengenerierung und zu den Fabrikationsprozessen notwendig. Um generelle Aussagen hinsichtlich Machbarkeit und Nutzen ableiten zu können, ist schließlich eine großformatige Produktumsetzung als Fallbeispiel erforderlich.

#### *Experimente II – In-situ-Fabrikation*<sup>22</sup>

Die weiterführenden Experimente II bauen auf den Untersuchungen zu den Feedbackexperimenten der Experimente I auf. Die Schwerpunkte der Experimente II liegen in der Entwicklung und im direkten Einsatz einer mobilen Robotereinheit auf einer Baustelle, deren Grundstruktur schon besteht.

Um den Sprung zu einer mobilen Fabrikationsmaschine zu ermöglichen, muss in einem ersten Schritt ein geeigneter Experimentaufbau evaluiert und zu einer Einheit montiert werden. Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht die Einbindung der beschriebenen reaktiven Systeme. Hierzu sind erweiterte Toleranz- und Rückkopplungsprozesse experimentell zu erforschen. Die Zielsetzung ist, dass die mobile Robotereinheit ihre eigene Lage und die Bauumgebung unter Berücksichtigung der Materialtoleranzen erkennt und die daraus gewonnenen Informationen verarbeitet.<sup>23</sup> Die in der These vorgeschlagene Prozessvereinfachung durch Kooperation zwischen Mensch und Maschine muss verifiziert werden. Hier sind Experimente und ein Fallbeispiel mittels abgestimmter Sensorik und Kommunikationsstrategien notwendig. Ein weiterer Schwerpunkt für den

---

<sup>22</sup> Die Experimente II wurden im Rahmen des von der EU geförderten Projekts *ECHORD* mit der Firma Bachmann Engineering AG als Industriepartner durchgeführt. Hierbei war es unter anderem das Ziel, eine kompakte mobile Robotereinheit zu konstruieren, die in einem undefinierten Arbeitsbereich adaptive Bauteile erstellt. Näher wird auf dieses Projekt in Kapitel 4.4 *Experimente II – In-situ-Fabrikation* dieser Arbeit eingegangen.

<sup>23</sup> Siehe Projektbeschreibung *Echord*, ETH Zürich, 2011-2012: <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/198.html> (abgerufen am 20.10.2014).

## In-situ-Fabrikation

mobilen Einsatz von Baumaschinen in einem undefinierten Umfeld sind Lokalisierungs- und Mobilitätstrategien. Zu diesem Zweck müssen robuste Lösungsansätze für den Innenbereich gefunden und in wiederholten Studien getestet werden. Um eine gesamthafte Aussage über den Mehrwert eines reaktiven Systems in Verbindung mit der In-situ-Fabrikation treffen zu können, sind in einer abschließenden Untersuchung unterschiedliche Einzelexperimente miteinander zu kombinieren und auf ihre Synergie in einer undefinierten Umgebung zu testen.

### 1.4 Stand der Praxis und Forschung

Der Einsatz mobiler Robotereinheiten ist längst keine Vision mehr, einige Systeme sind sogar schon in den Alltag eingebunden. In der Industrie finden sie ihre Anwendung in kleinen autonomen Sortierrobotern<sup>24</sup>, die in der Lage sind, Regale nach einem bestimmten Algorithmus zu transportieren und anzuordnen. Im militärischen Bereich werden kostspielige halb- und vollautonome Einheiten zur Aufklärung, Beobachtung oder Zielbekämpfung eingesetzt. Ein Schwerpunkt der aktuellen Roboterforschung zielt auf die Entwicklung menschenähnlicher Dienstleistungsroboter ab, deren Kommerzialisierung vorerst durch hohe Sicherheitsbestimmungen eingeschränkt ist. Gleichwohl konnten sich für den privaten Sektor bereits kostengünstige, mit einfacher Sensorik ausgestattete Staubsauger- und Rasenmähdautomaten<sup>25</sup> erfolgreich auf dem Markt etablieren. Auch in der medialen Kunst werden vermehrt autonome mobile Roboter eingesetzt.<sup>26</sup> In diesem Kontext stellen sie entweder selbst das Kunstwerk dar oder sie erschaffen dieses (Abbildung 3).

---

<sup>24</sup> Kiva Systems entwickelt mobile Roboter für die Automatisierung in Lagerhäusern. Vgl. <http://www.kivasystems.com/solutions/> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>25</sup> Die Firma Husqvarna Schweiz AG entwickelt einsatzfähige autonome Rasenmähdautomaten. Vgl. <http://www.husqvarna.com/ch/de/products/robotic-mowers/husqvarna-robotic-mowers-for-homeowners/> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>26</sup> Beispiel 1: Photofeedback (Martin Hesselmeier, 2006, Lab3 – Kunsthochschule für Medien Köln): Vier mobile Roboter gleicher Bauweise reagieren auf akustische Signale. Die Bewegungen (mechanischer Tanz) werden über LEDs auf Fotopapier übertragen. Der Künstler beschreibt diesen Vorgang als „visible traces as notations of their mechanical dance“. Projektbeschreibung und Bilder: Lab3 – Laboratory for Experimental Computer Science, Academy of Media Arts Cologne,



Abbildung 3: Autonome Mähroboter. Skulpturenausstellung am Rheinufer in Bingen; Künstler: David Hahlbrock, 2010

Der Einsatz von Robotern im Bauwesen ist auf Untersuchungen in den 1980er-Jahren, anfänglich in Japan, zurückzuführen.<sup>27</sup> Spezielle Prozesse für die Anwendung auf einer Baustelle, wie die Assemblierung von Bauteilen, Streichen, Betonglätten und das Transportieren von Materialien, wurden bereits zu diesem frühen Zeitpunkt erforscht und entwickelt.<sup>28</sup> Ebenfalls in Japan entstanden die

---

<http://interface.khm.de/index.php/art/projects/photofeedback/> (abgerufen am 11.08.2014).

Beispiel 2: Robotic Chair (Max Dean, Raffaello D'Andrea, Matt Donovan, 2006): Der wie eine gewöhnliche Sitzgelegenheit aussehende Stuhl besitzt die Fähigkeit, selbstständig in Einzelteile zu zerfallen und sich anschließend autonom wieder zusammensetzen.

Vgl. Raffaello D'Andrea. Dynamic Works; <http://raffaello.name/projects/robotic-chair/> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>27</sup> Ueno, T. „A Japanese view on the role of automation and robotics in next generation construction.“ In *Proceedings of the 11th International Symposium On Automation and Robotics in Construction* (ISARC. Brighton 24.–26. Mai 1994), herausgegeben von Denis A. Chamberlain, 633–640. Amsterdam/London/New York/Tokyo: Elsevier, 1994.

<sup>28</sup> Bock, Thomas. „Construction robotics.“ *Autonomous Robots* (Springer Science + Business Media) Vol. 22, Nr. 3 (2007): 201–209. Zahlreiche maßgebliche Veröffentlichungen zum Forschungsstand des maschinellen beziehungsweise roboterbasierten Bauens sind auf Prof. Dr.-Ing. (Univ. Tokio) Thomas Bock zurückzuführen. Vgl. hierzu

## In-situ-Fabrikation

ersten roboterbasierten Prototypen für eine automatisierte Hochhausbaustelle Anfang der 1990er-Jahre.<sup>29</sup> Im Gegensatz zu anderen Industriezweigen sind jedoch der Einsatz von Industrierobotern und die damit verbundene Automatisierung in der Baubranche relativ selten und spielen kaum eine Rolle. Dies belegen die aktuellen Statistiken der International Federation of Robotics (IFR) zum Entwicklungsstand der weltweit verkauften Industrieroboter<sup>30</sup> (Abbildung 4 und Abbildung 5).

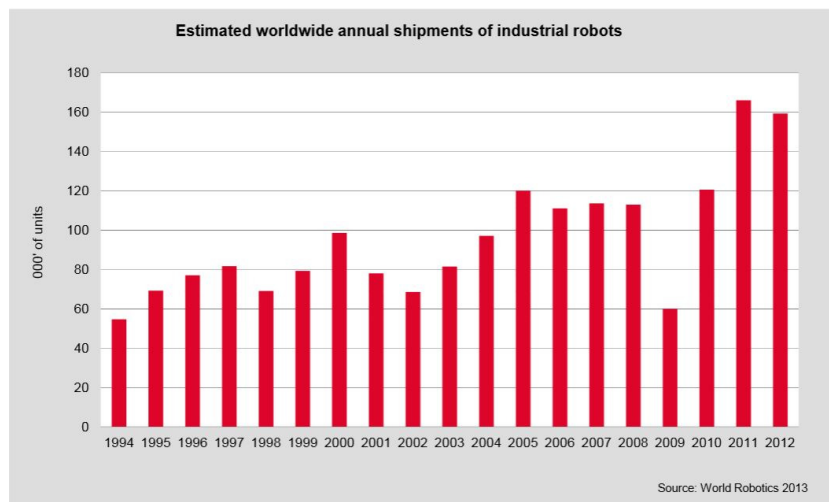


Abbildung 4: Statistik der weltweit jährlich verkauften Industrieroboter

---

[http://www.ar.tum.de/fakultaet/personen/professoren/thomas\\_bock/](http://www.ar.tum.de/fakultaet/personen/professoren/thomas_bock/) (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>29</sup> Bock, Thomas. „Construction robotics.“ *Autonomous Robots* (Springer Science + Business Media) Vol. 22, Nr. 3 (2007): 201–209.

<sup>30</sup> Die vom IFR erhobenen Statistiken beziehen sich auf Industrieroboter nach der ISO-Norm 8373. „Manipulierende Industrieroboter sind nach DIN EN ISO 8373 automatisch geführte, mit drei oder mehr frei programmierbaren Bewegungsachsen ausgerüstete Mehrzweckmanipulatoren, die entweder ortsfest oder mobil in industriellen Anwendungen eingesetzt werden.“ Hägele, Martin und Timo Schäfer. „Definitionen.“ In *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*, herausgegeben von Hans-Jürgen Gevatter und Ulrich Grünhaupt, 739–741. Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 2006, S. 739.

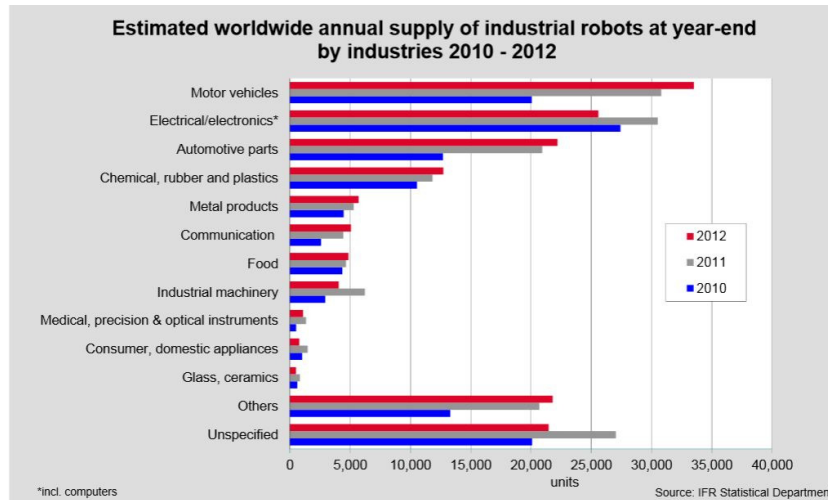


Abbildung 5: Statistik der weltweit jährlich verkauften Industrieroboter nach Industriezweigen sortiert

Verkaufte Industrieroboter für den Bausektor werden aufgrund des geringen Bestandes in den Statistiken nicht gesondert aufgeführt. Dennoch gibt es Studien des IFR, die aufzeigen, dass außer in Japan die Zahlen zu vernachlässigen sind. Unter Berücksichtigung der geschätzten Einsatzdauer eines Roboters von zwölf Jahren betrug im Jahr 2011 der japanische Gesamtbestand 678 Stück.<sup>31</sup> Begründet ist der geringe Einsatz von Industrierobotern einerseits damit, dass Bauvorhaben immer in verschiedenen Umgebungen stattfinden. Kaum eine Bausituation gleicht der anderen, aber auch die Abgrenzung der Fachgebiete wie Hochbau, Tiefbau, Wasserbau macht die Vielfalt der Gewerke im Bauwesen deutlich. Andererseits gibt es in der Architektur unzählige Arten unterschiedlichster Baumaterialien und Assemblierungsmethoden. Gewicht, Materialität, Elementierung und Toleranzabweichungen sind nur einige der zahlreichen Faktoren, die die Komplexität und die Schwierigkeit einer Automatisierung im Bauwesen begründen. Der wesentliche Unterschied gegenüber industriellen Anwendungen ist hierbei, dass deren Prozesse meist gleichbleibend und in einer nicht variierenden Umgebung stattfinden.<sup>32</sup>

<sup>31</sup> Die neben den Statistiken über den Verkauf von Industrieroboter (Abb. 4 und 5) genannten Informationen basieren auf einem Telefoninterview des Verfassers mit dem IFR Statistical Department in Frankfurt am Main am 29.01.2013.

<sup>32</sup> Han, Chang-soo. „Human-Robot Cooperation Technology: An Ideal Midway Solution Heading Toward The Future Of Robotics And Automation In Construction.“ In *Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in*

## In-situ-Fabrikation

Weitere Hürden für den direkten Einsatz von Robotern auf einer Baustelle sind sicherheitsrelevante Aspekte und die Tatsache, dass viele unvorhersehbare Situationen auftreten können, die den Gebrauch von Robotern limitieren.<sup>33</sup> Es gibt aber auch Gründe, warum die roboterbasierte architektonische Forschung trotz dieser Rahmenbedingungen zunimmt: Das Hauptinteresse der Industrie an einer automatisierten Bauproduktion in der Vorfertigung liegt in der Wettbewerbsfähigkeit. Der zunehmende Druck auf Kosten, Termine und Qualität lässt sich teilweise durch eine flexible Automatisierung in Verbindung mit der rechnergenerierten Planung kompensieren. Für Hochlohnländer werden Roboter in diesem Zusammenhang als Schlüsseltechnologie gesehen, mit der auf diese Herausforderungen reagiert werden kann.<sup>34</sup>

Neben den ökonomischen Interessen der Wirtschaft sind aber auch die Vorteile einer digital beschriebenen präzisen Fertigung und der damit verbundenen Möglichkeit einer individuellen Planung ohne den erhöhten Aufwand einer Einzelanfertigung von Bauteilen von hoher Relevanz. Aus diesem Grund erweitern immer mehr universitäre Einrichtungen ihre Labore mit Roboteranlagen.<sup>35</sup>

Meist verbleiben die Ergebnisse jedoch im Modellbaumaßstab, denn nur wenige Institute befassen sich mit einer architektonischen Umsetzung in einem 1 : 1-Maßstab.<sup>36</sup> Um den Stand der Forschung zur In-situ-Fabrikation und zu der damit verbundenen mobilen Einheit beschreiben zu können, ist in Anbetracht der vielen möglichen Forschungsansätze eine Eingrenzung und Differenzierung der für diese

---

*Construction* (ISARC. Seoul 29. Juni – 2. Juli 2011), 13–18. IAARC, 2011; <http://www.iaarc.org/publications/fulltext/K3.pdf> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>33</sup> Bock, Thomas. „Construction robotics.“ *Autonomous Robots* (Springer Science + Business Media) Vol. 22, Nr. 3 (2007): 201–209.

<sup>34</sup> Zilch, Konrad, Claus Jürgen Diederichs, und Rolf Katzenbach, Hg. *Handbuch für Bauingenieure: Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit – Fachwissen in einer Hand*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 2001, S. 2-229.

<sup>35</sup> Vergleiche hierzu die Verteilung von Roboteranlagen in der universitären architektonischen Forschung (Stand 2013): Gramazio, Fabio, Matthias Kohler, und Jan Willmann. *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture*. Zürich: Park Books, 2014, S. 484.

<sup>36</sup> Als Beispiel für die Umsetzung einer nicht standardisierten Mauerwerksfassade im Maßstab 1 : 1 ist an dieser Stelle das Weingut Gantenbein in Fläsch zu erwähnen, weil die Fertigung in der Vorproduktion über einen Industrieroboter erfolgte, der jeden einzelnen Stein nach einem bestimmten Gestaltungsparameter präzise platzierte. Nähere Informationen zu dem Projekt finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*.

Arbeit wichtigsten Disziplinen notwendig. Hierbei steht die Kopplung von computergesteuerten Produktionsmaschinen beziehungsweise Robotern<sup>37</sup> mit der Fertigung architektonischer Bauteile im Vordergrund der Untersuchungen. Folgende Einteilung der relevantesten Systeme wird daher vorgenommen: stationäre Fabrikation, Baustellenfabrik und Feldfabrikation sowie In-situ-Fabrikation. Nach einer kurzen Definition werden sie beispielhaften Arbeiten zugeordnet.

#### 1.4.1 Stationäre Fabrikation

Unter der stationären Baurobotik<sup>38</sup> sind fest verankerte, in ihre Umgebung eingemessene Systeme zu verstehen, die in der Vorfertigung von architektonischen Elementen eingesetzt werden. Die zu bearbeitenden Objekte können zwar mittels Sensorik erkannt und ausgemessen werden, eine baulich relevante Interaktion mit der Umgebung findet jedoch nicht statt. Dem industriellen Einsatz in der Vorfabrikation lag in den Anfängen meist die Idee einer Bauteilstandardisierung mit speziell auf den jeweiligen Prozess ausgerichteten Maschinen zugrunde. Mit der maschinellen, computergesteuerten Fertigung ist nun eine Individualisierung trotz Serienproduktion möglich.

Industrielle Anwendungen finden sich unter anderem im zerspannungsfreien Schalungsbau wieder: Für die Vorfertigung in der Betonindustrie werden einige automatisierte Systeme für Träger und Deckenplatten eingesetzt wie beispielsweise Schalungsroboter, deren Einsatzbereiche von Decken und Wänden bis hin zu Fassadenelementen reichen (Abbildung 6).

---

<sup>37</sup> Wie in Kapitel 2.4 *Programmierbare Produktionsmaschinen* erläutert wird, könnten viele Definitionen unterschiedlichster Quellen für den Begriff „Roboter“ gefunden werden. Eine klare Abgrenzung ist aufgrund der zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten nicht einfach. In diesem Unterkapitel werden auch erweiterte CNC-basierte Fertigungsmaschinen betrachtet, da sie in gewissen Industriezweigen als Roboter bezeichnet werden. Herkömmliche CNC-Maschinen werden in dieser Arbeit aufgrund ihrer Bewegungsfolge und Vorbestimmtheit aber nicht als Roboter bezeichnet. Dennoch sind erweiterte Systeme in den Forschungsstand aufzunehmen, da sie in der maschinellen Vorfertigung oftmals mit Industrierobotern kombiniert werden.

<sup>38</sup> Bei stationären Roboteranlagen ist zu erwarten, dass sich ihr Einsatzort auf längere Zeit nicht ändert. Ihre eigene Lage und Position können als gegeben angenommen werden. Werkzeugpositionen, Werkobjekte oder Materialzuführungen können daher als Konstante zur Roboterlage vermessen werden.



## In-situ-Fabrikation



Abbildung 6a und b: Betonschalungsroboter Twin-Z mit Werkzeugwechsler der Firma Weckenmann

Durch einen integrierten Werkzeugwechsler können magnetische Schalungselemente und weitere Einbauteile computergesteuert gesetzt werden. Ein manuelles Vermessen und Positionieren ist nicht mehr nötig. Auch durchgängig vollautomatisierte Prozesse in der Fertigung von Betonbauteilen inklusive der Biegung der Stahlarmierung sind auf dem Markt vorhanden und werden weiterentwickelt.<sup>39</sup>

Im Bereich der aktuellen universitären Forschung auf dem Gebiet des computergesteuerten Schalungsbaus ist die Arbeit *TailorCrete – Maßgeschneiderte Betonstrukturen* zu erwähnen. Es handelt sich hierbei um ein Projekt, das sich unter anderem mit der Entwicklung einer wiederverwendbaren Betonschalung auf Wachsbasis befasst.<sup>40</sup> Die Geometrie der Schalung kann mithilfe eines digitalen Planungs- und Entwurfswerkzeugs bestimmt und analysiert werden. Ein Schalungstisch, der sich auf der Basis mehrerer höhenverstellbarer Stößel individuell einstellen lässt, wird von einem Industrieroboter aktiviert, dessen Parameter digital übermittelt werden (Abbildung 7).

---

<sup>39</sup> Vgl. Kerkstoel 2000+ NV, <http://www.kerkstoel2000.be/en/floors/wide-slabs/production-process/> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>40</sup> Das Prinzip der wiederverwendbaren Betonschalung auf Wachsbasis wurde innerhalb des Projektes *TailorCrete* (2009–2013, gefördert durch das 7. EU-Forschungsrahmenprogramm) von der Professur Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, der ETH Zürich entwickelt. Weitere Informationen zu dem Projekt finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*. Vgl. auch Oesterle, Silvan, Axel Vansteenkiste, und Ammar Mirjan. „Zero Waste Free-Form Formwork.“ In *International Conference on Flexible Formwork (ICFF. Bath 27.–29. Juni 2012)*, 258–267. Bath, 2012; <http://people.bath.ac.uk/jjo20/icff/ICFF2012/Proceedings.html> (abgerufen am 11.08.2014).

Die Betonfertigteile können aufgrund dieser Freiheitsgrade jeweils unterschiedliche Formen annehmen. Vor dem Hintergrund eines wiederwendbaren Schalungsmaterials in Kombination mit der digitalen Fabrikation lassen sich solche Bauelemente kostengünstig und nahezu abfallfrei produzieren.



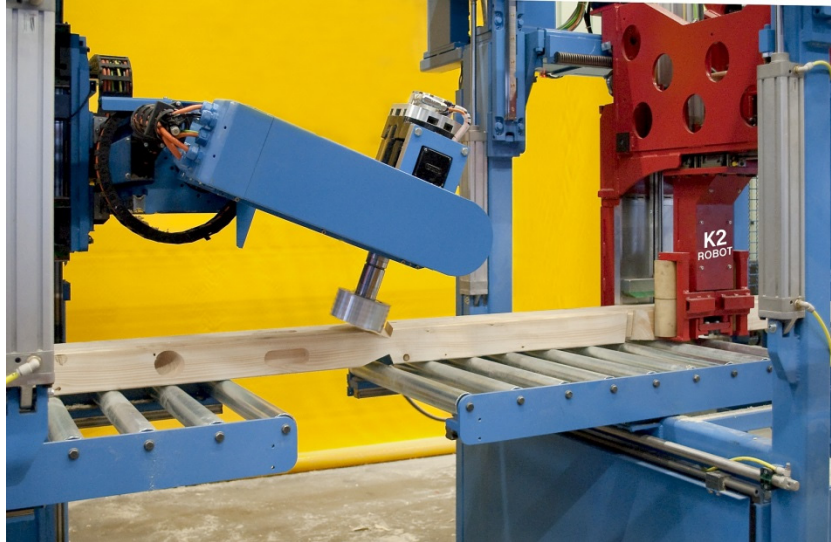
*Abbildung 7: Ein vom Roboter aktivierter Schalungstisch*

Computergesteuerte Fünfachsfräsen, Abbundmaschinen<sup>41</sup> und auch vereinzelt Industrieroboter werden schon seit einigen Jahren in der Holzbauindustrie eingesetzt. Im Gegensatz zu herkömmlichen CNC-Fräsmaschinen mit drei Achsen haben diese Maschinen mehr Freiheitsgrade und meist einen automatischen Werkzeugwechsler zur Verfügung. Dies ermöglicht die Produktion von geometrisch komplexeren Bauteilen. Abschrägungen mit beliebiger Winkereinstellung können ohne ein dafür speziell hergestelltes Fräswerkzeug gefertigt werden (Abbildung 8).

---

<sup>41</sup> Unter einer Abbundmaschine ist eine CNC-gesteuerte Bearbeitungseinheit für Holzwerkstoffe zu verstehen. Moderne Abbundmaschinen sind aufgrund der Anzahl vorhandener Achsen und vollautomatischer Werkzeugwechsler sehr flexibel und können unterschiedliche Bearbeitungsschritte, wie beispielsweise Fräsen, Sägen und Bohren, vornehmen. Schindler, Christoph. *Ein architektonisches Periodisierungsmodell anhand fertigungstechnischer Kriterien, dargestellt am Beispiel des Holzbaus*. Dissertation ETH Nr. 18605, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2009.

## In-situ-Fabrikation



*Abbildung 8: Eine Abbundmaschine (K2-Robot) der Firma Hundegger wird für den Zuschnitt und den Abbund von Brettern und Balken eingesetzt*

Auch die Fabrikation von Flächen mit Hinterschneidungen ist ohne ein Umspannen des Werkstücks durchführbar. Aufgrund der limitierten Abmessungen von CNC-Abbundmaschinen werden teilweise für die Bearbeitung großformatiger und schlecht zugänglicher Elemente siebenachsige<sup>42</sup> Industrieroboter eingesetzt, die aufgrund ihrer Reichweite einen erweiterten Bearbeitungsspielraum besitzen.

Mit diesen computerbasierten Produktionsmethoden besteht die Möglichkeit, umfassende und variierende Verbindungstechniken zum Preis einer Serienherstellung anzubieten – auch bei kleinen Stückzahlen. Zusätzlich sind durch das „Bauen mit dem Computer“ Konstruktionen und Details vorstellbar, die individuell und in hohem Maße an die Architektur angepasst sind.<sup>43</sup> Im Bereich der generativen Planung, insbesondere bei der Ausführung vieler unterschiedlicher Bauteile<sup>44</sup>, ist der Einbezug digitaler Herstellungsprozesse in Holz-

---

<sup>42</sup> Unter der siebten Achse ist eine zusätzliche Linearachse zu verstehen, auf die der Roboter montiert ist. Dadurch erweitert sich der Wirkungsbereich signifikant.

<sup>43</sup> Fritz, Oliver. „Bauen mit Computern: Digitale Technologien in der Vorfabrikation.“ *Archithese*, Nr. 2 (2003): 46–51.

<sup>44</sup> An dieser Stelle kann das Projekt *Metropol Parasol* in Sevilla von Jürgen Mayer H. Architekten angeführt werden. Das Bauwerk gilt als eine der weltweit größten Holzkonstruktionen und besteht aus über 3 000 maschinell unterschiedlich hergestellten Holzelementen. Vgl. J.Mayer.H und Partner. Architekten; <http://www.jmayerh.de/19-0-Metropol-Parasol.html> (abgerufen am 11.08.2014).

werkstätten immer häufiger anzutreffen. Auch in der Vorfabrikation von Betonschalungen aus EPS (expandiertem Polystyrol) findet sich der Einsatz von computergesteuerten Maschinen. Ein möglicher Fertigungsansatz erfolgt über eine Heißdrahtschneideapparatur, die an einem Industrieroboter befestigt ist.<sup>45</sup> Mit diesem Aufbau lassen sich über programmierte Roboterbewegungen Freiformen aus einem Blockmaterial heraustrennen (Abbildung 9).



*Abbildung 9a und b: Der von der Firma Odico entwickelte Heißdrahtschneideprozess für die roboterbasierte Fertigung von EPS-Schalungselementen*

Zu erwähnen ist, dass es sich bei diesen aufgezeigten Prozessen meist um subtraktive, also materialtrennende und zerspanende Verfahren handelt. Im Gegensatz zu additiven Prozessen, bei denen keine erheblichen Reststoffe entstehen, hat dies eine erhöhte Abfallproduktion und die damit verbundene Ressourcenverschwendung

---

<sup>45</sup> Für weitere Informationen bezüglich der roboterbasierten Fertigung von Betonschalungen; vgl. ODICO Formwork Robotics, <http://www.formworks.dk/> (abgerufen am 11.08.2014).

## In-situ-Fabrikation

zur Folge.<sup>46</sup> Als besonders abfallintensiv lassen sich Freiformschalungen ausmachen, die meist nach einmaligem Gebrauch wieder entsorgt werden.<sup>47</sup>

Die Assemblierung diskreter Bauelemente, wie zum Beispiel eines Ziegel- oder Backsteinverbunds zur Herstellung von Mauerwerkswänden, eignet sich in besonderem Maße für die maschinelle Vorfertigung.<sup>48</sup> Abgesehen von möglichen gestalterischen und konstruktiven Vorteilen können belastende wiederholende Tätigkeiten und schwere körperliche Arbeiten durch eine Maschine vereinfacht und optimiert werden. Vereinzelt wurden halb- und vollautomatische Produktionsanlagen entwickelt und teilweise unter industriellen Bedingungen eingesetzt. Die auf dem Markt existierenden automatisierten Produktionslinien bieten millimetergenaue Fertigung in gleichbleibender Qualität an.<sup>49</sup>

Aber nicht nur zur Arbeitserleichterung ist diese Vorgehensweise sinnvoll. Industrieroboter spielen als Herstellungsmaschinen eine große Rolle, da sie in der Lage sind, das Material präzise und kontrolliert

---

<sup>46</sup> Bonwetsch, Tobias, et al. „The Informed Wall: applying additive digital fabrication techniques on architecture.“ In *Synthetic Landscapes, Proceedings of the 25th Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture (ACADIA 06*. Louisville 12.–15. Okt. 2006), 489–495. ACADIA, 2006; [http://cumincad.architecturez.net/system/files/pdf/acadia06\\_489.content.pdf](http://cumincad.architecturez.net/system/files/pdf/acadia06_489.content.pdf) (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>47</sup> Oesterle, Silvan, Axel Vansteenkiste, und Ammar Mirjan. „Zero Waste Free-Form Formwork.“ In *International Conference on Flexible Formwork (ICFF*. Bath 27.–29. Juni 2012), 258–267. Bath, 2012; <http://people.bath.ac.uk/jjo20/icff/ICFF2012/Proceedings.html> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>48</sup> Im Handbuch für Bauingenieure werden in dem Kapitel *Automatisierung und Robotik im Bauwesen* folgende Vorteile für eine automatisierte und roboterbasierte Mauerwerksfertigung angegeben: witterungsunabhängiges und kontinuierliches Arbeiten; konstante Arbeitsbedingungen; angenehme Arbeitsplätze; höhere Produktivität; variable Produktion; maschinelle Maßkontrolle; konstante Qualität, höhere Termin-, Kosten- und Planungssicherheit; Einsparung von Nacharbeiten. Zilch, Konrad, Claus Jürgen Diederichs, und Rolf Katzenbach, Hg. *Handbuch für Bauingenieure: Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit – Fachwissen in einer Hand*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 2001, S. 2-231.

<sup>49</sup> Als Beispiel ist hier die österreichische Firma Redbloc anzumerken. Sie bietet eine automatisierte Produktion von Ziegelwand-Modulen an. Zur Erreichung der Sollmaßplanung wird ein speziell für das System hergestellter Ziegel verwendet. Fenster- und Türöffnungen werden nachträglich, nach dem Assemblieren und Verkleben der Steine, mit einer Wasserstrahlschneidemaschine herausgeschnitten. Vgl. redbloc Ziegelfertigteilsysteme Gesellschaft m.b.H., <http://www.redbloc.at/> (abgerufen am 11.08.2014).



nach einem bestimmten Algorithmus zu verlegen. Dies ermöglicht einen erhöhten Freiheitsgrad in der Ausformulierung der Bauteile, sodass die digitalen Informationen nahtlos mit spezifischen Entwurfs- oder Konstruktionsparametern einhergehen können<sup>50</sup> (Abbildung 10).

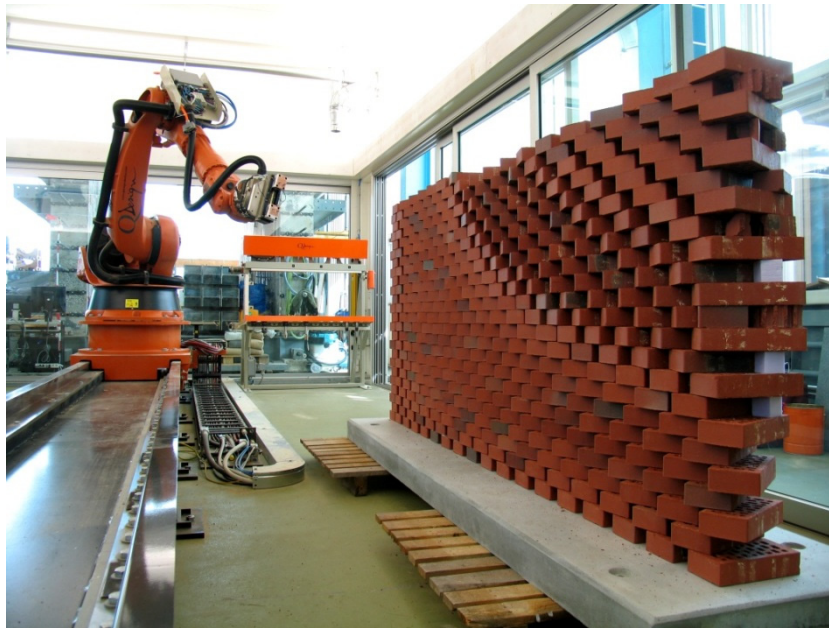


Abbildung 10: Roboterbasierte Vorproduktion von Mauerwerkswänden an der ETH Zürich

Der Begriff der *Digitalen Materialität*<sup>51</sup> wurde in diesem Zusammenhang geprägt.

Das in dieser Arbeit unter den *Experimenten I – Vorstudien zur In-situ-Fabrikation* angeführte Forschungsprojekt *Flexbrick*, durchgeführt im Rahmen der Schweizer Kommission für Technologie und Innovation (KTI), setzt sich mit der industriellen Vorfertigung von freigestaltbaren Mauerwerkswänden unter Berücksichtigung von Materialtoleranzen auseinander. Das Projekt ist daher für den aktuellen Forschungsstand relevant. Der von der KTI vorausgesetzte enge

---

<sup>50</sup> Bonwetsch, Tobias, Fabio Gramazio, und Matthias Kohler. „Digitally Fabricating Non-Standardised Brick Walls.“ In *Manu Build: Proceedings of the 1st International Conference* (Rotterdam 25.–26. April 2007), 191–196. London: CIRIA, 2007.

<sup>51</sup> Auf die *Digitale Materialität*, die Verflechtung von digitalen Vorgängen mit realen Baumaterialien, wird in Kapitel 2.3 *Algorithmen und Material* eingegangen.

## In-situ-Fabrikation

Zusammenschluss der Universität mit einem Industriepartner soll die Marktfähigkeit der aus der Forschung hervorgegangenen Ergebnisse fördern.<sup>52</sup> Resultierend ist ein Folgeprojekt für eine Gestaltungssoftware<sup>53</sup> zu nennen, auf deren Grundlage erste Bauprojekte in Planung sind.

In der maschinellen Vorfertigung im Fertighaussektor<sup>54</sup> wird gerne die Möglichkeit einer automatisierten Vorfabrikation von vorinstallierten Holzpaneelen genutzt.<sup>55</sup> Spezielle Maschinen oder Anlagen, die eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesse verarbeiten können, sind dafür notwendig. Beispielsweise werden CNC-gesteuerte Multifunktions-tische (Abbildung 11) für die Produktion von Wand-, Dach- und Deckenelementen eingesetzt. Es lassen sich zahlreiche Prozesse, unter anderem Auflegen, Klammern, Schrauben, Sägen, Fräsen, Bohren, Markieren, Beschriften oder Leimen, mit ihnen umsetzen.<sup>56</sup>

---

<sup>52</sup> Der Industriepartner für das Forschungsprojekt *Flexbrick* ist die Firma Keller AG Ziegeleien mit Hauptsitz in Pfungen (Schweiz). Vgl. ROBmade by Keller AG Ziegeleien, <http://www.robmade.com/de/home/> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>53</sup> *BrickDesign* ist eine Gestaltungssoftware für den Umgang mit einer hohen Anzahl diskreter Elemente. Nähere Informationen zu dem Projekt finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis* und in der Veröffentlichung: Bonwetsch, Tobias, Ralph Bärtschi, und Matthias Helmreich. „BrickDesign: A software for planning robotically controlled non-standard brick assemblies.“ In *RobArch: Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design*, herausgegeben von Sigrid Brell-Cokcan und Johannes Braumann, 102–109. Wien: Springer, 2013.

<sup>54</sup> Der Wunsch nach der industriellen Fertigung ganzer Häuser hat eine lange Tradition und kann bis ins 19. Jahrhundert zurückverfolgt werden. Herbert, Gilbert. *The Dream of the Factory-Made House: Walter Gropius and Konrad Wachsmann*. Cambridge, Mass./London: MIT Press, 1984. Da für diese Arbeit der Einsatz von Robotertechnologie im Bauwesen von besonderem Interesse ist, werden die notwendigen Untersuchungen zum Stand der Forschung eingegrenzt und setzen in den 1980er-Jahren, in denen roboterbasierte Anlagen erstmals auf einer Baustelle eingesetzt wurden, an.

<sup>55</sup> Bock, Thomas, et al. „Automatisierung und Robotik im Bauen.“ *Arch+198/199*, Vol. 43 Haus der Zukunft (2010): 34–39.

<sup>56</sup> Die Produktdaten verschiedener Systeme können im Internet abgerufen werden; Weinmann Holzbausystemtechnik GmbH; <http://www.weinmann-partner.com/DE-DE/Seiten/home.aspx> (abgerufen am 11.08.2014).



Abbildung 11: Automatisches Beplanken eines Wandelementes mit einer digital ansteuerbaren Multifunktionsbrücke (WMS 150) der Firma Weinmann

Verschiedene japanische Firmen nutzen CAD/CAM-Prozesse zur seriellen Vorfertigung ganzer Wohnzellen. Bei dem Sekisui House System werden beispielsweise Stahlprofile vollautomatisiert von Robotern zu Stahlrahmen verschweißt.<sup>57</sup>

#### 1.4.2 Baustellenfabrik und Feldfabrikation

In diesem Kapitel wird zwischen der automatisierten Baustellenfabrik und der Feldfabrikation unterschieden. Unter der Baustellenfabrik (der Baustelle als Fabrik) wird in dieser Arbeit verstanden, dass Bauteile an einem Ort automatisiert zusammengebracht, positioniert und gefügt werden.<sup>58</sup> Werden Bauteile vor Ort an der Baustelle seriell vorfabriziert, wird diese Produktionsstätte in der Bauindustrie als Feldfabrik bezeichnet.<sup>59</sup>

---

<sup>57</sup> Bock, Thomas, et al. „Automatisierung und Robotik im Bauen.“ *Arch+* 198/199, Vol. 43 Haus der Zukunft (2010): 34–39.

<sup>58</sup> Bock, Thomas, und Thomas Linner. „Automatisierte Hochbaustellen.“ *Informationen Bau-Rationalisierung (IBR)*, Nr. 41 (März 2012): 21–26.

<sup>59</sup> Ein Beispiel einer seriell produzierenden Feldfabrik aus den 1960er-Jahren lässt sich in folgender Quelle wiederfinden: Langenberg, Silke, Hg. *Das Marburger Bausystem: Offenheit als Prinzip*. Sulgen: Niggli, 2013, S. 23.



## In-situ-Fabrikation

Beispiele für Baustellenfabriken lassen sich vor allem im Hochhausbau finden: Seit den 1990er-Jahren werden in Japan die ersten automatisierten Hochhausbaustellen in die Praxis eingebunden. Firmen wie beispielsweise Obayashi, Shimizu oder Kajima haben bereits Hochhäuser in einem automatisierten Prozess errichtet.<sup>60</sup> Dabei lassen sich unterschiedliche Bauabläufe feststellen: Die Baustellenfabriken bewegen sich Geschoss für Geschoss in vertikaler Richtung mit dem Neubau mit oder drücken diesen über hydraulische Vorrichtungen etagenweise nach oben.<sup>61</sup> Die folgenden Beispiele sollen überschlägig die unterschiedlichen Konzepte für Baustellenfabriken in der Errichtung von Hochhäusern aufzeigen.

Das SMART-System (Shimizu Manufacturing System by Advanced Robotic Technology) ist eine Baustellenfabrik für Hochhäuser, die eine Reihe von Bearbeitungsverfahren, wie beispielsweise den Aufbau und das Verschweißen von Stahlrahmen, das Verlegen von Betonschalungen für Decken und den Aufbau von Innen- und Außenwandpaneelen, automatisiert.<sup>62</sup> Die Fabrik befindet sich in Gestalt einer Plattform immer im obersten Stockwerk des Gebäudes und wird sequenziell etagenweise hochgedrückt. Während der gesamten Bauzeit ist die Baustellenfabrik geschützt und ermöglicht eine Produktion bei jeder Wetterlage.<sup>63</sup> 1993 wurde das erste Bürohochhaus mit dem SMART-System in Nagoya, Japan, fertiggestellt.<sup>64</sup>

Die von der Obayashi Corporation entwickelte Baustellenfabrik Big Canopy bewegt sich ebenfalls mit dem Bau der Geschosse aufwärts. Der wesentliche Unterschied zum SMART-System besteht darin, dass

---

<sup>60</sup> Bock, Thomas, und Thomas Linner. „Automatisierte Hochbaustellen.“ Informationen Bau-Rationalisierung (IBR), Nr. 41 (März 2012): 21–26.

<sup>61</sup> Ebd.

<sup>62</sup> Maeda, J. „Development and Application of the SMART System.“ In *Proceedings of the 11th international symposium on automation and robotics in construction (ISARC. Brighton 24.–26. Mai 1994)*, herausgegeben von Denis A. Chamberlain, 457–464. Amsterdam/London/New York/Tokyo: Elsevier, 1994.

<sup>63</sup> Yamazaki, Yusuke, und Junichiro Maeda. „The SMART system: an integrated application of automation and information technology in production process.“ *Computers in Industry*, Nr. 35 (1998): 87–99.

<sup>64</sup> Bei dem Hochhaus handelt es sich um die Juroko Bank in Nagoya. Das Gebäude ist 81 m hoch und zählt 20 Stockwerke. Vgl. Emporis GmbH, <http://www.emporis.com/building/the-juroku-bank-ltd-head-office-nagoya-japan> (abgerufen am 11.08.2014).

die Arbeitsplattform nicht auf dem Gebäude sitzt, sondern – getrennt von diesem – von vier mächtigen Stahlfachwerkstützen getragen wird<sup>65</sup> (Abbildung 12). Durch diese Ablösung ist das System nicht von einer in das Gebäude integrierten Stahlstruktur abhängig und kann für verschiedene Gebäudetypen eingesetzt werden.<sup>66</sup> Auch die Big-Canopy-Baustellenfabrik wurde in die Baupraxis eingebunden.<sup>67</sup>

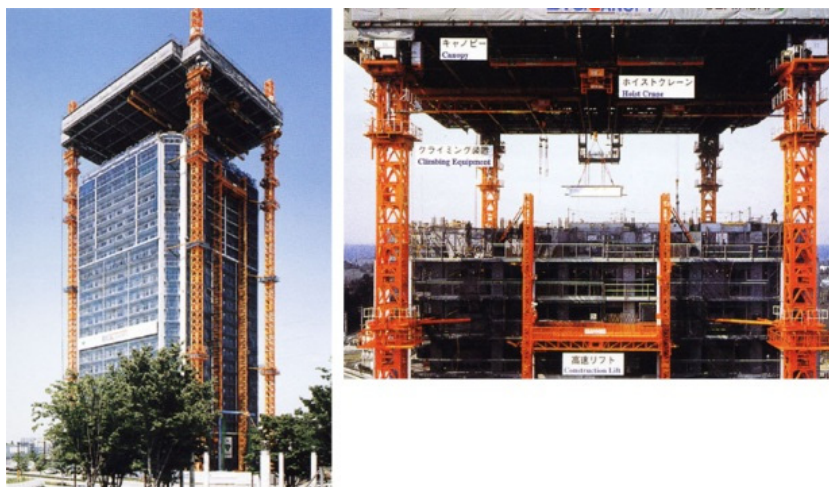


Abbildung 12a und b: Das von der Firma Obayashi entwickelte Big-Canopy-System: Die Baustellenfabrik wandert mit den Geschossen mit

Umgekehrt zu den vorher beschriebenen Systemen ist die Vorgehensweise der Firma Kajima Corporation mit AMURAD (Automatic Up-Rising Construction by Advanced Technique). Bei dem AMURAD-System befindet sich eine stationäre Produktionsstätte im Erdgeschoss und drückt nach Erstellung eines Geschosses das Gebäude nach oben.<sup>68</sup> Die AMURAD-Apparatur wurde für den Bau zweier Hochhäuser (Nagoya und Tokio) in Japan verwendet.<sup>69</sup> Von der

---

<sup>65</sup> Bock, Thomas. „Das Dach wird zuerst gebaut – und das Erdgeschoss zuerst rückgebaut.“ *Bauingenieur*, Sonderdruck aus Heft 2 (2009): 47–55.

<sup>66</sup> Ebd.

<sup>67</sup> 1999 wurde das Hochhaus PricewaterhouseCoopers mit dem Big-Canopy-System in Singapur mit einer Höhe von 126 m und 28 Geschossen errichtet. Vgl. Emporis GmbH, <http://www.emporis.com/building/pwcbuilding-singapore-singapore> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>68</sup> Howe, A. Scott. „Designing for Automated Construction.“ *Automation in Construction*, Nr. 9 (2000): 259–276.

<sup>69</sup> Ebd.

## In-situ-Fabrikation

vollautomatisierten Anwendung solcher Systeme wurde aufgrund der hohen technologischen Anforderungen abgesehen.<sup>70</sup>

Auch die Vorteile der seriellen Vorfabrikation von Bauteilen an einer Baustelle durch Feldfabriken sollen hier betrachtet werden. Ein unter Umständen aufwendiger Transport fertiger Elemente entfällt, sodass diese bei bestimmten Voraussetzungen günstiger angeboten werden können. Weitere Vorteile liegen in der Organisation der Einzelteile. Sie müssen nicht in Produktionshallen zwischengelagert werden und können direkt vor Ort manuell oder maschinell assembliert werden (Just-in-time-Produktion<sup>71</sup>). Bei einer nicht automatisierten Feldfabrik rechnet sich diese Vorgehensweise nur, wenn sehr viele gleiche Bauteile hergestellt werden. Werden die Herstellungsprozesse vor Ort durch computergesteuerte Maschinen erweitert und automatisiert, können zusätzlich ungleiche Teile und damit ein erweitertes architektonisches Entwurfsspektrum wirtschaftlich realisiert werden.<sup>72</sup>

Hierbei sind im Rahmen der In-situ-Fabrikation die noch nicht weitverbreiteten mobilen roboterbasierten Feldfabriken von besonderem Interesse. Darunter sind transportable Einheiten, die für die digitale Vorproduktion an einer Baustelle eingesetzt werden, zu verstehen. Diesbezüglich fortgeschritten ist die in einem Standardfrachtcontainer untergebrachte mobile Fabrikationsanlage *R-O-B*

---

<sup>70</sup> Taylor, Mark, Sam Wamuziri, und Ian Smith. „Automated Construction in Japan.“ *Proceedings of the Institution of Civil Engineers (ICE)*, Vol. 156 (2003): 34–41.

<sup>71</sup> Das Gabler Wirtschaftslexikon (online) definiert die Just-in-time-Produktion folgendermaßen: „Organisationsprinzip, das die bedarfsgenaue Implementierung unternehmensinterner und -übergreifender Gütertauschprozesse zum Ziel hat. Die Just-in-time-Produktion und -Zulieferung strebt über die Schaffung durchgängiger Material- und Informationsflüsse entlang der gesamten Wertschöpfungskette (Fluss statt Funktionsoptimierung) eine hohe Markt- und Kundenorientierung an, die sich in einem nachfragegerechten Lieferservice für qualitativ hochwertige Leistungen konkretisiert. Als konstitutive Bausteine des Just-in-time-Konzeptes wird i. d. R. eine integrierte Informationsverarbeitung (Einführung des Holprinzips, elektronische Kommunikation in Produktion und Beschaffung, Kombination mehrerer Planungs- und Steuerungsmethoden), die Fertigungssegmentierung (Schaffung produkt- und technologieorientierter Produktionseinheiten, Gruppenorganisation, Flussoptimierung) und die produktionssynchrone Beschaffung angesehen. Die Realisation von Just-in-time-Konzepten führt zur Reduzierung des Umlaufvermögens und verändert somit die vertikale und horizontale Bilanzstruktur.“ Springer Gabler Verlag, Hg. *Gabler Wirtschaftslexikon*, Stichwort: Just in Time (JIT); <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/57306/just-in-time-jit-v7.html> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>72</sup> Hierzu lässt sich die in der Einleitung beschriebene *Mass Customization* anführen.

*Unit*<sup>73</sup>. Sie wurde im Jahre 2008 mit einem Industriepartner im Rahmen einer Forschungsarbeit an der ETH Zürich entwickelt und bei verschiedenen Projekten, beispielsweise der Installation *Structural Oscillations*<sup>74</sup> auf der 11. Architekturbiennale 2008 in Venedig, eingesetzt (Abbildung 13).



Abbildung 13: Die mobile Fabrikationseinheit R-O-B als Feldfabrik auf der Architekturbiennale in Venedig

Die Fabrikationseinheit *R-O-B* ist nicht nur ortsunabhängig, sondern verfügt auch über die Vorteile eines Industrieroboters und der digitalen Fabrikation. Sie ist damit nicht nur auf einen Produktionsprozess oder ein Gestaltungsprinzip festgelegt. Komplexe und schwer transportierbare Bauteile lassen sich in verschiedensten Variationen direkt vor Ort erstellen und nach der Produktion ohne lange Transportwege assemblieren (Abbildung 14).

---

<sup>73</sup> Die mobile Fabrikationsanlage *R-O-B Unit* wird in Kapitel 4.3.1 *Experimentaufbau* beschrieben.

<sup>74</sup> Vgl. Gramazio & Kohler, *Architektur und Digitale Fabrikation*, ETH Zürich, <http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/142.html> (abgerufen am 11.08.2014).

## In-situ-Fabrikation



*Abbildung 14: Raumbildender Mauerwerksverband der Installation Structural Oscillations, der vor Ort durch die mobile Fabrikationseinheit R-O-B aus Einzelementen assembliert wurde*

### 1.4.3 In-situ-Fabrikation

Die In-situ-Fabrikation unter Einbezug eines digitalen reaktiven Systems ist ein fast unbehandeltes Forschungsfeld und daher auch zentrales Thema und Titel dieser Dissertation. Bei Betrachtung der stationären Baurobotik und der roboterbasierten Feldfabriken stellt die In-situ-Fabrikation eine logische Weiterentwicklung bestehender Verfahren dar. Teilgebiete dieser Forschung wurden schon im universitären Umfeld untersucht und im industriellen Kontext in die Praxis eingebunden.

Beispiele hierfür sind mobile Roboter für den direkten Einsatz auf der Baustelle. Es gibt unterschiedlichste Ansätze in der Entwicklung mobiler Bauroboter, die auf einer Baustelle eingesetzt werden können. Sie wurden konzipiert, um einzelne Prozesse voll- oder teilautonom beziehungsweise ferngesteuert durchzuführen.<sup>75</sup> Maßgebliche Produkte, wie beispielsweise der mobile Betonfinish-Roboter *SurfRobo*

---

<sup>75</sup> Bock, Thomas, und Thomas Linner. „Automatisierte Hochbaustellen.“ Informationen Bau-Rationalisierung (IBR), Nr. 41 (März 2012): 21–26.



(Abbildung 15) der Firma Takenaka, kommen aus Japan.<sup>76</sup> Die fortschrittlichsten Forschungsarbeiten innerhalb der mobilen Robotik auf der Baustelle, die der vorliegenden Arbeit hinsichtlich Dimensionierung und Ausformulierung am nächsten kommen, sind zwei Projekte zur Entwicklung von Mauerwerksrobotern aus den 1990er-Jahren. Diese Mauerwerksroboter, *ROCCO*<sup>77</sup> (Abbildung 16) und *BRONCO*<sup>78</sup>, wurden größtenteils zum Zweck der wirtschaftlichen Optimierung entwickelt.<sup>79</sup>



Abbildung 15: SurfRobo – mobiler Roboter für das Betonfinishing;  
Abbildung 16: Rocco – direkter Einsatz eines Bauroboters auf einer Baustelle

---

<sup>76</sup> Balaguer, Carlos, und Mohamed Abderrahim. „Trends in Robotics and Automation in Construction.“ In *Robotics and Automation in Construction*, herausgegeben von Carlos Balaguer und Mohamed Abderrahim, 1–20. InTech, 2008; <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/5555.pdf> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>77</sup> Andres, Jürgen, Thomas Bock, Friedrich Gebhart, und Werner Steck. „First Results of the Development of the Masonry Robot System ROCCO: a Fault Tolerant Assembly Tool.“ In *Proceedings of the 11th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC. Brighton 24.–26. Mai 1994)*, herausgegeben von Denis A. Chamberlain, 87–93. Amsterdam/London/New York/Tokyo: Elsevier, 1994.

<sup>78</sup> Pritschow, G., et al. „Robotic On-Site Construction Of Masonry.“ In *Proceedings of the 15th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC. München 31. März – 1. April 1998)*, 55–64. Magdeburg: Univ., Baumaschinentechnik, ISARC, 1998. – Zusatzinformation: BRONCO steht für: BRicklaying ROBot for use ON the Construction site. Vgl. EUREKA PROJECT 1083 BRONCO, <http://www.eurekanetwork.org/project/-/id/1083> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>79</sup> Bonwetsch, Tobias, Fabio Gramazio, und Matthias Kohler. „Digitally Fabricating Non-Standardised Brick Walls.“ In *Manu Build: Proceedings of the 1st International Conference (Rotterdam 25.–26. April 2007)*, 191–196. London: CIRIA, 2007.

## In-situ-Fabrikation

Gestalterische oder feedbackbasierte Ansätze standen bei diesen Versuchen allerdings nicht im Vordergrund.

Die meisten dieser Systeme konnten sich nicht durchsetzen. Die Gründe hierfür liegen unter anderem darin, dass im Gegensatz zu einer Laborumgebung auf einer Baustelle viele unvorhersehbare Situationen beispielsweise durch toleranzbehaftete Baustoffe, unerwartete Objekte oder Personenaufkommen auftreten. Die zu erwartende Komplexität überstieg die damaligen technischen Möglichkeiten, autonome Maschinen zu entwickeln, die sich in undefinierten Arbeitsbereichen tatsächlich zurechtfinden konnten. Meist waren die Apparaturen daher letztendlich vom Menschen gesteuert.

Zusammenfassend lässt sich hinsichtlich des Forschungsstandes feststellen, dass die computergesteuerte In-situ-Fabrikation eine logische Schlussfolgerung beziehungsweise Weiterentwicklung der stationären Baurobotik, der Feld- und Baustellenfabrikation und bereits angedachter Fertigungsprozesse auf der Baustelle darstellt. Noch fehlt es aber an wichtiger Grundlagenforschung, vor allem in Bezug auf komplexe Objekterkennungs- und Lokalisierungsverfahren.

### **1.5 Abgrenzung und Ziel der Arbeit**

Die aufgestellte These, ob roboterbasierte Fertigungsmaschinen in einer nicht definierten und sich ständig ändernden Umgebung operativ eingesetzt werden können, ist nachzuweisen. Da es sich in der vorliegenden Arbeit um Grundlagenforschung auf dem Gebiet der In-situ-Fabrikation handelt, ist es notwendig, die Bandbreite und das Ziel der Dissertation abzugrenzen.

Diese Forschungsarbeit untersucht den Verbund von kognitiven Eigenschaften mit der digitalen Fabrikation für eine kompakte und mobile Robotereinheit, die auf der Baustelle eingesetzt werden kann. Das System steht, durch die Implementierung von Sensorik, im Austausch mit der Umgebung und kann reaktiv auf sie eingehen. Dies betrifft zum einen die gebaute Umwelt, wie beispielsweise bestehende Gebäudestrukturen, oder Toleranzen, die durch unpräzise Baumaterialien entstehen. Zum anderen findet aber auch eine notwendige Interaktion infolge menschlicher Anweisungen statt. Hinsichtlich Mobilität und Repositionierung der Anlage wurde ein lokales

Referenzierungssystem entwickelt und auf Wiederholgenauigkeit getestet.

Die zu leistenden Aufgaben und die architektonischen Einsatzmöglichkeiten stehen in dieser Arbeit angesichts der grundlegenden Forschungsfrage nicht zentral im Vordergrund. Jedoch werden im Rahmen der Experimente verschiedenartige Konzepte vorgeschlagen, die zudem außerhalb der Laborumgebung im Maßstab 1:1 prototypisch umgesetzt werden konnten. Der Einsatzbereich der Maschine wird aber als offenes System betrachtet und ist daher nicht auf einen bestimmten Prozess beschränkt.

Aufgrund der substanziellen Auseinandersetzung mit der Einsetzbarkeit mobiler Roboter auf einer Baustelle repräsentieren die Forschungsergebnisse keine abgeschlossenen, „marktreifen“ Produkte. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bieten vielmehr die grundlegende Basis für weitere Forschung auf dem Gebiet der In-situ-Fabrikation.

Durch die empirische Arbeitsmethodik sollen die Umsetzbarkeit und der Mehrwert dieser interdisziplinären Forschung gegenüber bestehenden Prozessen aufgezeigt werden.



## 2. Algorithmen und Automaten

„Zur Geschichte der Architektur gehört das Zusammenführen verschiedener technologischer Entwicklungen. Gebaute Architektur ist einerseits abhängig von der Produktion materialer Objekte wie Bausteine, Nägel, Stahlträger etc. Deshalb ist die Geschichte der modernen Architektur an die traditionelle Chronologie der industriellen Revolution gebunden. Andererseits ist das Entwerfen ein Prozess des Informationsaustauschs, der durch eine bestimmte Wahl von kulturellen und medialen Technologien bestimmt ist.“<sup>80</sup>

Der von Mario Carpo beschriebene Informationsaustausch in der zeitgenössischen Architektur hat sich, neben sehr vielen anderen Bereichen des täglichen Lebens, dem digitalen Zeitalter angepasst. Die Kopplung verschiedener Technologien, wie beispielsweise computerbasierter Entwurfsmethoden mit automatisierten Produktionsabläufen, scheint einen massiven Wandel in der Praxis wie auch in der Architekturforschung auszulösen. Dieser schon seit geraumer Zeit viel diskutierte Vorgang hat dazu geführt, dass inzwischen von einem Paradigmenwechsel oder gar von einer neuen Stilrichtung in der Architektur die Rede ist.<sup>81</sup> Tatsächlich sind sowohl in der Planung als auch in der maschinellen Umsetzung am gebauten Werk Veränderungen zu beobachten: Neben einer Vielzahl von formalen Versuchen wurden in jüngster Zeit anspruchsvolle Projekte, die auf parametrischen Prozessen und digital gesteuerten Fertigungsmaschinen basieren, in einem architektonischen Maßstab umgesetzt, um solchen Veränderungen physisch nachzugehen.<sup>82</sup>

Auslöser für diesen Umbruch in der Architektur ist die Rückbesinnung auf die eigentliche Verwendung und grundsätzliche Logik des Computers als rechnende Maschine. Verlässt ein Softwarenutzer die Ebene einer restriktiven Anwendung, wird er automatisch zum Entwickler, der sich mit Algorithmen als automatisierten Erzeugungs- und Entscheidungsverfahren auseinandersetzt. Sobald sich Architekten mit Spezialwissen auf diese interdisziplinäre Schnittstelle zur

---

<sup>80</sup> Carpo, Mario. *Alphabet und Algorithmus*. Herausgegeben von Jörg H. Gleiter. Übersetzung: Jan Bovelet und Jörg H. Gleiter. Bielefeld: transcript, 2012, S. 27. Originalausgabe: Carpo, Mario. *The Alphabet and the Algorithm*. Cambridge: MIT Press, 2011.

<sup>81</sup> Schumacher, Patrik. „Parametrismus – Der neue International Style.“ *Arch+195 Istanbul wird grün* (2009): 106–113.

<sup>82</sup> Menges, Achim, Hg. „Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design.“ *Architectural Design (AD)*, Vol. 82, Nr. 2 (2012) [Themenheft].

Informatik einlassen, sind sie in der Lage, komplexe Anweisungen selbstständig zu erstellen und nach eigenen Vorstellungen zu gestalten. Zusammenhänge in den Bereichen Geometrieerzeugung, Struktur oder bauliche Organisation können anhand computerbasierter Methoden über eindeutige Kriterien regelbasiert, also algorithmisch, bestimmt und mittels digitaler Fertigungsanlagen in die gebaute Umwelt überführt werden.

Dieses zweite Kapitel widmet sich den Algorithmen und den Automaten – jedoch nicht aus einer modischen Notwendigkeit heraus, weil der Algorithmus-Begriff immer öfter im Zusammenhang mit neuartigen digitalen architektonischen Verfahren angeführt wird, sondern weil die rechnenden Herangehensweisen elementare Voraussetzung aller computerbasiert beschreibenden Entwurfs- und Fertigungsmethoden sind und die Grundlage für die Steuerung und Regelung programmierbarer Automaten<sup>83</sup> – und somit auch der In-situ-Fabrikation – bilden. Hierzu erscheint es notwendig, zunächst die maschinelle Übersetzung von Denkprozessen in Handlungsprozesse im Kontext der Architektur zu betrachten. Dieser Vorgang findet einerseits durch die Codierung von Algorithmen statt.<sup>84</sup> Andererseits ermöglicht der Verbund von Algorithmen mit (Bau-)Materialien, real existierende Werkstoffe mit digital gesteuerten Informationen zu belegen und zu beeinflussen. Dieser Verbund von Daten und Materialität lässt sich mithilfe einer computergesteuerten Fabrikation in die gebaute Umwelt

---

<sup>83</sup> Laut Brockhaus stammt der Begriff „Automat“ von dem griechischen Wort *automatos* ab und wird mit „sich selbst bewegend“ und „aus eigenem Antrieb“ übersetzt. *Brockhaus. Die Enzyklopädie in 24 Bänden*. 20., überarb. und aktualisierte Aufl., Bd. 2 AQ–BEC. Leipzig/Mannheim: Brockhaus, 1996, S. 427. Eine Definition des Begriffes „Automat“ ist unter anderem in der DIN IEC 60050-351:2009-06 wiederzufinden: „selbständig arbeitendes künstliches System, dessen Verhalten entweder schrittweise durch vorgegebene Entscheidungsregeln oder zeitkontinuierlich durch festgelegte Beziehungen bestimmt wird und dessen Ausgangsgrößen aus seinen Eingangs- und Zustandsgrößen gebildet werden.“ *DIN IEC 60050-351. Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik (IEC 60050-351:2006)*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Juni 2009. S. 19.

<sup>84</sup> Der Duden online definiert Code im Bereich der Informationstechnik wie folgt: „System von Regeln und Übereinkünften, das die Zuordnung von Zeichen, auch Zeichenfolgen zweier verschiedener Zeichenvorräte erlaubt; Schlüssel, mit dessen Hilfe ein chiffrierter Text in Klartext übertragen werden kann.“ Duden online, Stichwort: Code, <http://www.duden.de/node/662937/revisions/1116751/view> (abgerufen am 11.08.2014). Der Begriff des „Codierens“ wird auch für die Umsetzung von Algorithmen durch eine Programmierung verwendet und daher in dieser Arbeit benutzt.

## In-situ-Fabrikation

überführen. Veranschaulichen lässt sich diese digitale Prozesskette anhand von computergestützten Fabrikationsbeispielen zur individualisierten Massenproduktion und zur Verwendung parametrischer Werkzeuge in Großbauprojekten. Im Hinblick auf die Forschungsschwerpunkte der In-situ-Fabrikation, der Ausarbeitung eines reaktiven und mobilen Systems, sind die Untersuchungen des Verbundes von Algorithmen mit Automaten maßgeblich, da im weiteren Verlauf der Dissertation neben der Arbeit an der mechanischen Maschine auch zwischen *algorithmischen* Strukturen, der Einbindung kognitiver Eigenschaften durch technische Verfahren, und *nicht algorithmischen* Strukturen, der Einbeziehung menschlicher Anweisungen im Entscheidungsfall, differenziert wird.<sup>85</sup>

### 2.1 Vom Anwender zum Entwickler

In der Regel bedient sich der moderne Architekt einer vektorbasierten Konstruktionssoftware. Zeichenvorgänge können in einem vorgegebenen Rahmen auf einer vorgefertigten Benutzeroberfläche digital umgesetzt werden. Computerspezialisten und Softwareentwicklern ist es zu verdanken, dass Anwendungen, wie zum Beispiel CAD- oder

---

<sup>85</sup> Unterscheidung in algorithmische und nicht algorithmische Strukturen:

a) Algorithmische Strukturen: Die mobile Produktionseinheit steht im ständigen reaktiven Austausch mit der gebauten Umwelt, was bedeutet, dass die digitale Fabrikation mittels digitaler Scantechnologie mit kognitiven Eigenschaften gekoppelt wird. Reaktionsentscheidungen und Problemlösungen können aufgrund der Natur dieser digitalen Peripheriegeräte nur über eindeutige Handlungsanweisungen, die Algorithmen, erfolgen.

b) Nicht algorithmische Strukturen: Die in dieser Arbeit vertretene These, komplexe Prozesse seien durch menschliche Anweisungen (Mensch-Maschine-Schnittstelle) zu vereinfachen, setzt die menschliche Wahrnehmung und als Entscheidungsträger das Gehirn voraus. Karlheinz Meier, Professor für Experimentalphysik an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg, beschreibt, warum das Gehirn nicht algorithmisch funktioniert: „Trotz aller Ähnlichkeiten bestehen zwischen einem Computer und einem Menschen, der Informationen verarbeitet, grundsätzliche Unterschiede. Das Gehirn enthält keinen fertigen Satz bereits vordefinierter Software-Algorithmen – es muss sich in einem Prozess der Selbstorganisation an die jeweiligen Lebenssituationen anpassen und kann durch Lernprozesse zu mehr oder weniger bemerkenswerten Leistungen befähigt werden. Unser Hirn versetzt uns in die Lage, mit völlig neuen und unerwarteten Situationen fertig zu werden – eine Aufgabe, an der konventionelle Computer regelmäßig scheitern.“ Meier, Karlheinz. „Computer nach dem Vorbild des Gehirns?“ *Ruperto Carola* 1/2007 (Universität Heidelberg); <http://www.uni-heidelberg.de/presse/ruca/ruca07-1/vorbild.html> (abgerufen am 11.08.2014).

Bildbearbeitungsprogramme, einem breiten Publikum zugänglich sind, da sie das eigentliche Codieren der Applikationen übernehmen. Dadurch werden den Entwicklern aber auch eine unsichtbare Macht und ein nicht zu vernachlässigender Einfluss auf den Bearbeitungsprozess zuteil: Sie geben die Eigenschaften und Restriktionen einer Software vor, während sich der Nutzer lediglich auf die Ausführung der Funktionen beschränkt.

„Der durchschnittliche Computerbenutzer bewegt sich nun nicht mehr auf der Ebene des Codes – weder des Maschinen- noch Programmcodes – sondern auf der Oberfläche der Programme, um bereits vorcodierte Anwendungen auszuführen.“<sup>86</sup>

Das ursprüngliche Potenzial des Computers als rechnende Maschine wird daher nur unter Auflagen ausgenutzt. „Solange man sich nur auf der Oberfläche der Anwendung tummelt, wird man die Möglichkeiten dieser Maschine nicht begreifen können.“<sup>87</sup> Was ist aber zu tun, wenn sich Architekten nicht mehr nur an der Oberfläche einer Anwendung bewegen möchten, wenn die vorgegebenen Funktionen einer Software den modernen komplexen Bauanforderungen nicht mehr genügen, ein unzureichendes Ergebnis erzielen oder andersartige Entwurfsprinzipien nicht realisiert werden können? Das Verlassen der Ebene der reinen Anwendung führt zu den Algorithmen, deren Ausführung in der Regel mittels computerbasierter Programmierung erfolgt. Die grundlegende Logik des Computers, exakte Handlungsanweisungen innerhalb eines Programms schnell und automatisiert zu verarbeiten, ist wieder wirksam und löst die restriktive Softwareebene als ursprüngliche Arbeitsumgebung ab. Durch diesen beschriebenen Wechsel der Benutzerebene wird der Anwender zum Entwickler respektive Programmierer.

Das wirft die Frage auf, was dem Architekten abverlangt wird, wenn er zum Entwickler solcher generativen Prozesse werden möchte. Programmieren bedeutet in erster Linie nicht das Beherrschen einer adäquaten Sprache oder den virtuosen Umgang mit einem technischen Gerät: „Zuallererst bedeutet Programmieren, Maschinen zu

---

<sup>86</sup> Gramelsberger, Gabriele. „Story Telling with Code.“ In *Code: Zwischen Operation und Narration*, herausgegeben von Andrea Gleininger und Georg Vrachliotis, 29–40. Basel: Birkhäuser, 2010, S. 34.

<sup>87</sup> Ebd.

## In-situ-Fabrikation

konstruieren.“<sup>88</sup> Und dass dafür noch nicht einmal ein Computer notwendig ist, verdeutlichte der britische Mathematiker Alan M. Turing<sup>89</sup> bereits 1936 auf der Basis eines theoretischen Modells der sogenannten Papiermaschine:

„Es ist möglich, den Effekt einer Rechenmaschine zu erreichen, indem man eine Liste von Handlungsanweisungen niederschreibt und einen Menschen bittet, sie auszuführen. Eine derartige Kombination eines Menschen mit geschriebenen Instruktionen wird ‚Papiermaschine‘ genannt. Ein Mensch, ausgestattet mit Papier, Bleistift und Radiergummi sowie strikter Disziplin unterworfen, ist in der Tat eine Universalmaschine.“<sup>90</sup>

Im übertragenen Sinne bedeutet dies, dass ein Algorithmus vor allem durch die geistige Tätigkeit des Programmierers entwickelt wird. Das Medium für die Umsetzung ist zweitrangig und kann sowohl durch einen Computer als auch mithilfe einfachen Papiers geschehen. Bei dem Versuch, dieses Beispiel in den Kontext der Architektur zu stellen, ließe sich folgende Schlussfolgerung ziehen: Die Qualität eines architektonischen Entwurfes wird im Wesentlichen nicht von der Art des Zeichengerätes beeinflusst. Dies gilt auch für den digitalen Entwurf. Die ausgewählte Programmiersprache ist nicht maßgeblich an der Entstehung und dem Ergebnis eines Algorithmus beteiligt. Die eigentliche Leistung des programmierenden Entwerfers ist hierbei eine andere: „Im Zuge der Programmierung findet ein Übersetzungsprozess statt, Denkprozesse werden in maschinelle Handlungsprozesse überführt.“<sup>91</sup>

Aufgrund der hohen individuellen Anforderungen, die an eine maschinelle Baustellenfabrikation von digital beschriebenen Bauteilen gestellt werden, reicht die reine Anwendungsebene einer Software nicht mehr aus, und der Wechsel auf die Entwicklungsebene ist notwendig.

---

<sup>88</sup> Trogemann, Georg, und Jochen Viehoff. *Code@Art: Eine elementare Einführung in die Programmierung als künstlerische Praktik*. Wien/New York: Springer, 2005, S. 9.

<sup>89</sup> Alan M. Turing war im Zweiten Weltkrieg Entschlüsselungsspezialist für das britische Außenministerium. Eine ausführliche Biografie über Alan M. Turing lässt sich in folgender Quelle wiederfinden: Hodges, Andrew. *Alan Turing: The Enigma*. London: Vintage, 2012.

<sup>90</sup> Alan Turing, zit. von Dotzler, Bernhard, und Friedrich Kittler, Hg. *Alan Turing: Intelligence Service*. Berlin: Brinkmann & Bose, 1987, S. 91.

<sup>91</sup> Trogemann, Georg, Hg. *Code und Material: Exkursionen ins Undingliche*. Wien/New York: Springer, 2010, S. 19.

## 2.2 Algorithmen in der Architektur

Algorithmen sind in jeder erdenklichen Lebenssituation anzutreffen und lassen sich als präzise Handlungsanweisungen definieren.<sup>92</sup> Sie sortieren Informationen und treffen Entscheidungen für den Anwender. In dieser Arbeit geht es jedoch nicht um das manuelle Verfassen und die physische Umsetzung solcher Anweisungen. Weitaus weitreichender und undurchsichtiger wird es, wenn diese Vorgehensweisen in digitale Bereiche eingebettet werden. Versteckte Algorithmen, die beispielsweise die Grundlage der sogenannten sozialen Netzwerke bilden, nutzen eine dynamische und automatisierte Auswertung persönlicher Daten, um personalisierte Werbung gezielt einsetzen zu können. Exemplarisch für eine Vielzahl weiterer Anwendungsbereiche von Algorithmen seien die Finanzmärkte genannt. Auch hier finden Algorithmen zur Gewinnsteigerung einen effizienten Einsatzbereich: In Bruchteilen von Sekunden wickeln Computerprogramme nach einer vorgegebenen codierten Strategie Börsengeschäfte ab und bestimmen in Millisekunden ein gezieltes Kaufen oder Verkaufen bestimmter Wertpapiere.

Wie die vorliegende Arbeit zeigen wird, reicht das Potenzial, algorithmische Verfahrensweisen für die Architektur zu nutzen, über die automatisierte Wiederholbarkeit und das schnelle Verarbeiten immaterieller Informationen weit hinaus. Jedoch lässt sich die Gesamtheit des Entwerfens und Bauens nicht auf einen universellen Code, der auf Knopfdruck alle Entscheidungen trifft, herunterbrechen. Die großen kreativen und operativen Möglichkeiten, die die digitalen Werkzeuge bieten, sind breit gefächert und eröffnen unterschiedlichste Einsatzmöglichkeiten. Im Hinblick auf eine generative Planung wie etwa in der Entwicklung der mobilen Roboteranlage, die als flexibles offenes System für verschiedenste Anwendungsbereiche ausgelegt wird, bedarf es einer näheren Betrachtung der Bedeutung von Algorithmen in der Architektur.

Eine der grundlegendsten Errungenschaften des Computers ist die immer größer werdende Rechenleistung.<sup>93</sup> Leistungsstarke Rechner verarbeiten sich wiederholende, klar definierte Aufgaben um ein

---

<sup>92</sup> Ebd., S. 159.

<sup>93</sup> Hehl, Walter. Trends in der Informationstechnologie: Von der Nanotechnologie zu virtuellen Welten. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2008, S. 9.

## In-situ-Fabrikation

Vielfaches schneller als das menschliche Gehirn – ohne Konzentrationsschwächen oder Ermüdungserscheinungen und in gleichbleibender Qualität. Diese Eigenschaft kann beispielsweise für eindeutig bestimmte und repetitive Vorgänge in der computerbasierten Planung und der Architekturdarstellung genutzt werden.

In Verbindung mit leistungsstarken Rechnern sind Algorithmen in der Lage, komplexe und datenintensive Formenvielfalt zu generieren. Als passendes Beispiel dienen hierfür die über Subdivision-Algorithmen generierten *Platonic Solids*<sup>94</sup> (Abbildung 17). Sie zeigen das Besondere solcher Systeme auf: Trotz des hohen Komplexitätsgrades basieren alle Generationen auf demselben generativen Erzeugungsprozess. Das manuelle Erstellen solcher Strukturen mit 200 000 bis 16 Millionen Flächen wäre nicht möglich.

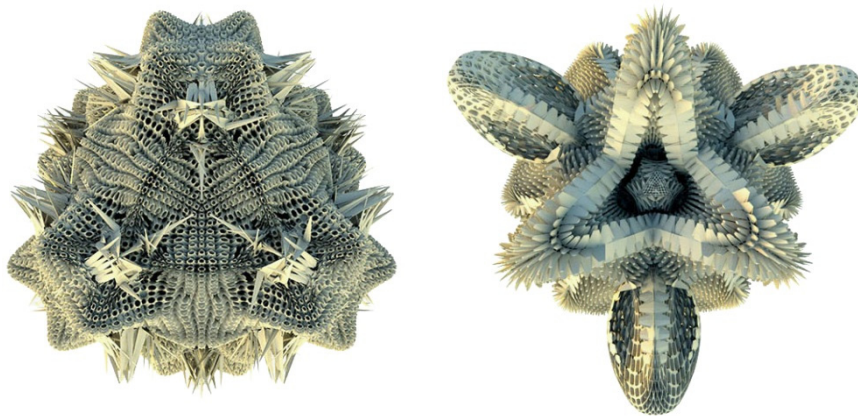


Abbildung 17: *Platonic Solids*

Neben der reinen Ausnutzung der Rechengeschwindigkeit zur Arbeitserleichterung oder zur Steigerung der Komplexität finden Algorithmen in der digitalen Architekturplanung häufig Anwendung in den Bereichen Analyse und Optimierung. Hierbei besteht die

---

<sup>94</sup> Die hier herangezogenen Projekte von Michael Hansmeyer basieren auf folgenden Grundlagen: „Subdivision algorithms in this project are based on the work of Daniel Doo & Malcolm Sabin, Edwin Catmull & Jim Clark, Jörg Peters & Ulrich Reif, and Charles Loop. Forms are generated in processing and exported as dxf files. Each form consists of 200,000 to 16 million faces. Images shown have an original resolution of 8000 x 8000 pixels.“ Vgl. Michael Hansmeyer. *Computational Architecture*; <http://www.michael-hansmeyer.com/html/solids/p22.html> (abgerufen am 11.08.2014).

Möglichkeit, einzelne Disziplinen, beispielsweise Verschattung, Abstandsflächen, Massenkalkulation oder Konstruktion, rechnerbasiert miteinander zu koppeln. Schon in einer frühen Entwurfsphase können die Auswirkungen der aufeinander wirkenden Faktoren gesamthaft verglichen und bewertet werden. Diese Methode ermöglicht schnelle und zuverlässige quantitative Aussagen über die Auswirkung verschiedener parametrischer Einstellungen. Nach einer Analyse, dem zusätzlichen Definieren von Zielen und der Vorgabe gewisser Randbedingungen kann auch der Schritt einer manuellen Optimierung durch ein algorithmisches Verfahren ersetzt werden.

Ein weiterer Gebrauch von Algorithmen liegt im Bereich des parametrisierten Entwerfens. Momentan entstehen viele, meist in einem akademischen Kontext verhaftete formalistische Studien, deren Umsetzung oftmals in einem Rendering oder einem 3-D-gedruckten Modell erfolgt. Wird jedoch eine Realisierung des digital generierten Entwurfes im Maßstab 1:1 angestrebt, sind geometrische, baukonstruktive und materialabhängige Faktoren zu berücksichtigen und in die Codes einzuweben. Entwurfsalgorithmen können daher unterschiedliche Komplexitätsstufen aufweisen: von einer einfachen, nicht bestimmten Formgenerierung bis hin zu einem ausgeklügelten parametrisierten Modell, das alle Bauteile produktionsfertig generiert. Innerhalb eines Algorithmus sind Bestimmung und Kontrolle des Entwurfs anhand verschiedener Methoden durchführbar. Zum einen können dem Entwurf mathematisch beschriebene Formen zugrunde liegen, deren Variablen numerisch eingestellt werden. Zum anderen besteht die Möglichkeit, dass kontextbezogene Informationen aus einer vorliegenden Situation dynamisch ausgewertet werden und auf Geometrie und Ausformulierung einwirken. Beispiele hierfür sind Umwelteinflüsse, Personen- oder Verkehrsaufkommen, Sichtbezüge oder die Gestaltung benachbarter Gebäude. Aber auch grafische Methoden bieten die Möglichkeit, die Einstellungsparameter der Algorithmen für den Entwurf zu steuern.<sup>95</sup>

---

<sup>95</sup> Ein Beispiel für die Designgenerierung anhand einer grafischen Methode findet sich in Kapitel 3.3.2 *Datengenerierung*. Über ein Graustufenbild wird der Öffnungsgrad einzelner Fassadenelemente gesteuert.



### 2.3 Algorithmen und Material

Es gibt verschiedene Ebenen der Anwendung von Algorithmen in der Architektur. Die eigentliche Stärke der digitalen Handlungsanweisungen liegt weder in der Automatisierung wiederholbarer Zeichenvorgänge zur Arbeitserleichterung des Konstrukteurs noch in einer von Material und Kontext losgelösten Formgenerierung. Vielmehr wird den Algorithmen dann eine einschneidende Rolle zugesprochen, wenn sie mit materiellen Prozessen des Entwurfs und dessen Umsetzung interagieren.<sup>96</sup> Erst aufgrund der Synthese von digitalen Prozessen und Material besteht die Möglichkeit, die Algorithmen in die physische Welt zu überführen und direkt in die digitale Produktion einfließen zu lassen. In diesem Zusammenhang ist auch von einem „Informieren“ des Materials die Rede.<sup>97</sup> Solche Materialinformationen können beispielsweise in einem Code verpackte Eigenschaften wie Konstruktion, Erscheinungsform und Funktion sein, die nicht mehr als einzelne Bereiche, sondern als gesamthaftes System behandelt werden. Die praktische Umsetzung der digital informierten Bauteile in einem architektonischen Maßstab ermöglicht die additive digitale Fabrikation. Diskrete Baustoffe, wie etwa Ziegelsteine oder Holzplatten, aber auch schaumartige Materialien, lassen sich mithilfe dieses Verfahrens zielgerichtet zu komplexen Strukturen aufbauen.

In dem Lehr- und Forschungsprojekt *Die programmierte Säule* (Abbildung 18), ebenfalls an der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation der ETH Zürich durchgeführt, wurde der Verbund von Algorithmen und realem Material über prototypische Säulen in die

---

<sup>96</sup> Kohler, Matthias, Fabio Gramazio, und Jan Willmann. „Die Operationalität von Daten und Material im digitalen Zeitalter.“ In *Positionen zur Zukunft des Bauens: Methoden, Ziele, Ausblicke*, herausgegeben von DETAIL – Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 6–19. München: DETAIL, 2011.

<sup>97</sup> Gramazio & Kohler beschreiben das Informieren des Materials wie folgt: „Die digitale Fabrikation erlaubt es dem Architekten heute, Entwurfsdaten direkt in den Aufbauprozess von Material einzuweben. Material wird dabei mit Informationen angereichert, es wird ‚informiert‘.“ Gramazio, Fabio, und Matthias Kohler. *Digital Materiality in Architecture*. Baden: Lars Müller Publishers, 2008, S. 7. Deutsche Übersetzung aus: Gramazio, Fabio, und Matthias Kohler. „Biegen statt Brechen: Digitaler Holzbau.“ *Baunetzwoche #162* (19. Februar 2010): 13–17; [http://www.baunetz.de/dl/727165/baunetzwoche\\_162\\_2010.pdf](http://www.baunetz.de/dl/727165/baunetzwoche_162_2010.pdf) (abgerufen am 11.08.2014).

Praxis umgesetzt.<sup>98</sup> Das Materialsystem – in dieser Arbeit Ziegelsteine – wurde in einem durchgängigen parametrischen System mit Funktion, strukturellen Anforderungen und gestalterischen Elementen informiert.

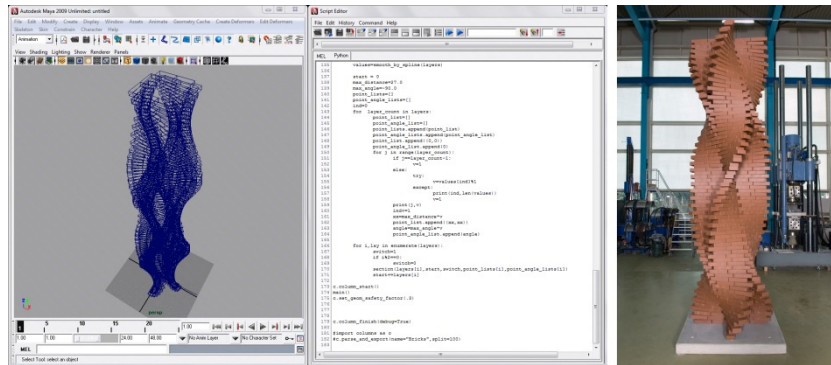


Abbildung 18: Die programmierte Säule, Wahlfacharbeit der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich, 2010

Für die Assemblierung solcher Strukturen und die Kontrolle jedes einzelnen Elementes eignen sich im Besonderen Industrieroboter: programmierbare Bewegungsapparate, deren Anwendungsbereich offen ist und die komplexe Aufgaben anhand digitaler Daten abarbeiten können. Hierbei lassen sich sogar Ähnlichkeiten zwischen einer Programmierung von Algorithmen und der materiellen Ausführung durch die Fabrikation erkennen. Ebenso wie die präzise Beschreibung der Handlungsanweisungen durch ein Computerprogramm und deren logische Abfolge verlaufen auch die einzelnen Schritte der materiellen Realisierung durch Roboter nach einer exakt bestimmten Aufbau-logik.<sup>99</sup> Indes ist zusätzlich noch ein wichtiger Zwischenschritt zu beachten: Während die Informationsverarbeitung in die Materialverarbeitung übergeht, findet eine Übersetzung statt, die wiederum algorithmisch gelöst wird. Es handelt sich um ein Vermittlungsprogramm, das die virtuell beschriebenen Strukturen in ausführende Bewegungen der Maschine umwandelt. Im Bereich der

<sup>98</sup> Weitere Informationen zu dem Projekt *Die programmierte Säule* finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*.

<sup>99</sup> Kohler, Matthias, Fabio Gramazio, und Jan Willmann. „Die Operationalität von Daten und Material im digitalen Zeitalter.“ In *Positionen zur Zukunft des Bauens: Methoden, Ziele, Ausblicke*, herausgegeben von DETAIL – Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 6–19. München: DETAIL, 2011.

CNC-Technologie werden derartige Vermittlungsprogramme Postprozessoren genannt. Sie wandeln beispielsweise eine aus dem CAD entstandene Bauteilzeichnung in einen für Fräsmaschinen lesbaren Code um. Im Bereich der Robotik, insbesondere für die additive Erstellung nicht standardisierter räumlicher Elemente, sind die Vermittlungsprogramme komplexer. Hier müssen bei der Erstellung der Bewegungspfade der Maschine, anders als bei vordefinierten Prozessen wie dem Fräsen oder dem 3-D-Drucken, unterschiedlichste Werkzeuge, Materialien und Fügeverfahren mit berücksichtigt werden. Eine allgemeine Software für den Übergang von generativ erstellten Modellen zur roboterbasierten Produktion gibt es nicht, sie muss meist für den jeweiligen Prozess angepasst oder neu entwickelt werden.

### 2.4 Programmierbare Produktionsmaschinen

Die reine Betrachtung von Algorithmen und Programmierung in einer Arbeit, deren Ziel es ist, in situ fabrizierte Bauteile in einem architektonischen Maßstab herzustellen, würde keine greifbaren Ergebnisse hervorbringen. In der vorliegenden Untersuchung geht es daher neben der Betrachtung immaterieller, *abstrakter* Maschinen auch um die Entwicklung einer Maschine im materiellen Sinne.<sup>100</sup> Unter programmierbaren Automaten, wie jenen, die in den Experimenten dieser Arbeit behandelt werden, sind *konkrete* Maschinen zu verstehen, die mithilfe variierender Programme digital angesteuert und kontrolliert werden können. Im Kontext der In-situ-Fabrikation sind damit in erster Linie Industrieroboter gemeint.

Für das Verständnis der In-situ-Fabrikation erscheint eine kurze Beschreibung der Entwicklungsstufen programmgesteuerter Produktionsmaschinen notwendig. Die im Forschungsmittelpunkt stehende mobile Fabrikationseinheit baut auf dieser historischen Betrachtung auf und stellt eine Erweiterung bestehender Systeme dar. Darüber hinaus

---

<sup>100</sup> „Das Programm macht den Computer zur funktionierenden Maschine. Auch ein Roboter ist erst durch ein Programm in Bewegung zu setzen. Die Computerfachleute sprechen daher beim Programm von einer abstrakten Maschine und beim materiell vorhandenen Gerät von einer konkreten Maschine“. Bammé, Arno, et al. *Maschinen-Menschen, Mensch-Maschinen: Grundrisse einer sozialen Beziehung*. Reinbek: Rowohlt, 1983, S. 16.

werden anhand einiger Beispiele verschiedene Programmiermöglichkeiten von *konkreten* Maschinen aufgezeigt.<sup>101</sup>

### *Maschinelle Umsetzung und Speicherung von Daten*

Sowohl bei abstrakten als auch bei gebauten Maschinen liegt eine Programmierbarkeit vor, sofern das Verhalten der Maschine geändert werden kann, ohne dass in die innere Struktur der Maschine eingegriffen wird.<sup>102</sup> Hierbei spielt es keine Rolle, ob eine mechanische oder eine elektronische Umsetzung des Programms vorliegt. Die maßgebliche Technologie für die Entwicklung programmierbarer Produktionsmaschinen, die Algorithmen in reale mechanische Prozesse umwandeln, entstand durch Erfindung der Lochkarte als Datenträger und Steuerungsprogramm. Während die als „Programme“ wirkenden Zahnräder und Walzen der mechanischen Rechenmaschinen von Wilhelm Schickard (1592–1635), Blaise Pascal (1623–1662) und Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646–1716) noch fest mit dem Gerät verbunden, also nicht programmierbar waren, fand in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts die erste Trennung der Software von der Hardware durch externe Datenträger statt.<sup>103</sup> Der französische Mechaniker Jean Baptiste Falcon konstruierte bereits 1728 einen Webstuhl, der dank eines mechanisch abgetasteten Lochbrettes automatisiert Muster umsetzen konnte. Joseph-Marie Jacquard (1752–1834) stellte im Jahr 1805 den ersten automatischen Webstuhl vor, der über ein vollständiges Lochstreifenprogramm, eine Aneinanderreihung von unterschiedlich durchgestanzten Pappkarten, gesteuert werden konnte.

Die Entwicklung der Lochkarte wird als Voraussetzung für die moderne Datenverarbeitung angesehen, wie der deutsche Komponist,

---

<sup>101</sup> Diese Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf eine lückenlose geschichtliche Darstellung. Die folgende Unterteilung in maschinelle Umsetzung und Speicherung von Daten, Anfänge der digitalen Fabrikation und roboterbasierte Produktionsmaschinen wird zum besseren Verständnis und zwecks Klassifizierung programmgesteuerter Produktionsmaschinen vorgenommen.

<sup>102</sup> Trogemann, Georg, und Jochen Viehoff. *Code@Art: Eine elementare Einführung in die Programmierung als künstlerische Praktik*. Wien/New York: Springer, 2005, S. 73.

<sup>103</sup> Helms, Hans G. „Von der Lochkarte in den Cyberspace: Zu den gesellschaftlichen Auswirkungen der Computerentwicklung.“ *Thesis. Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar*, Nr. 1 (1997): 78–85.

## In-situ-Fabrikation

Schriftsteller, Sozial- und Wirtschaftshistoriker Hans G. Helms 1997 in seinem Artikel *Von der Lochkarte in den Cyberspace* ausführte:

„Mit der Lochkarte führte Jacquard das bis heute die Grundarchitektur aller datenverarbeitenden Maschinen und Computer bestimmende binäre System in den Maschinenbau ein: wo die Nadel, die die Lochkarte abtastet, auf ein Loch, eine Eins, trifft, da findet Veränderung statt; wo sie jedoch auf Pappe, gleich einer Null, stößt, bleibt der Zustand unverändert.“<sup>104</sup>

Die Idee der codierten Informationen als Datenspeicher wurde von dem amerikanischen Ingenieur Herman Hollerith (1860–1929), dem Gründer der Tabulating Machine Company<sup>105</sup> (BMT), auf der Basis eines Lochkartensystems zur Auswertung der Volkszählung 1890 in den USA erneut genutzt. Die als Informationsträger verwendeten Karten wurden durch Abtastfedern entsprechend der Lochung automatisch sortiert.

Auf die Erläuterung weiterer bahnbrechender Entwicklungen in dieser Technologie, beispielsweise der ersten programmgesteuerten Rechenmaschine des britischen Mathematikers Charles Babbage (1792–1871), soll hier verzichtet werden, da dies zu weit von der Thematik der produzierenden Maschinen wegführen würde. Stattdessen wird an dieser Stelle ein zielgerichteter Zeitsprung zu den numerisch gesteuerten<sup>106</sup> (NC) und den computergestützten numerisch gesteuerten Maschinen<sup>107</sup> (CNC) vollzogen.

### *Anfänge der digitalen Fabrikation*

Damit ist festzuhalten, dass der automatisierte mechanische Webstuhl von Jacquard als der Vorläufer der digitalen Fabrikation gelten kann. Das Prinzip der Lochstreifen als Datenträger wurde nach und nach verfeinert, bis Konrad Zuse<sup>108</sup> (1910–1995) 1945 den ersten Rechen-

---

<sup>104</sup> Ebd., S. 79.

<sup>105</sup> Die 1896 in New York gegründete Tabulating Machine Co. wurde später in International Business Machines (IBM) umbenannt.

<sup>106</sup> Die aus dem Englischen stammende Abkürzung NC steht für Numerical Control.

<sup>107</sup> Die aus dem Englischen stammende Abkürzung CNC steht für Computerized Numerical Control.

<sup>108</sup> „Zuse, Konrad Ernst Otto, Ingenieur und Unternehmer, \*Berlin 22.06.1910, †Hünfeld 18.12.1995; entwickelte 1934–38 die erste programmgesteuerte Rechenanlage auf mechan. Basis (Z1), die bereits mit dem binären Zahlensystem arbeitete [...]“ *Brockhaus. Die Enzyklopädie in 24 Bänden*. 20., überarb. und aktualisierte Aufl., Bd. 24 Weli–ZZ. Leipzig/Mannheim: Brockhaus, 1999, S. 665.

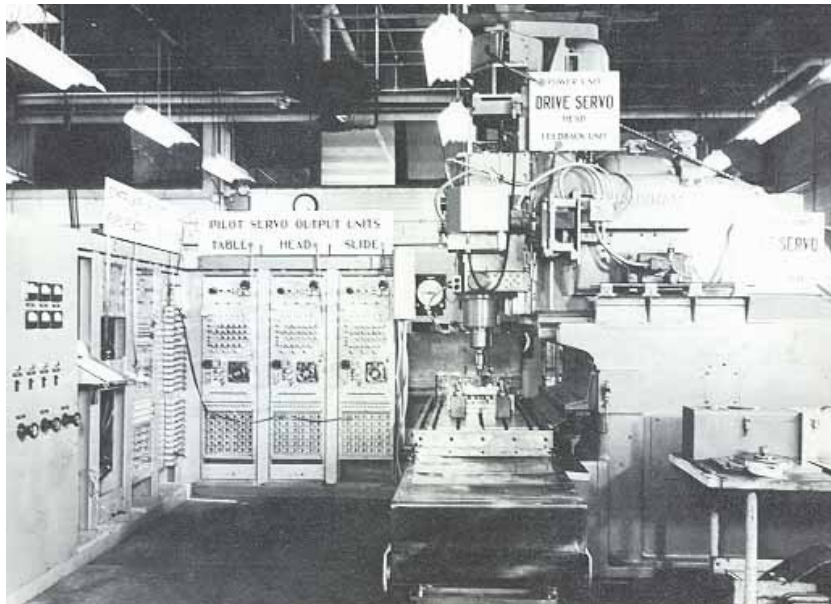
automaten, der einen internen Programmspeicher besaß, entwickelte. Der nächste bedeutende Schritt in Richtung programmierbare Fabrikationsanlagen war die Entwicklung der numerischen Steuerung. Von 1949 bis 1952 entwickelte John T. Parsons (1913–2007) am Massachusetts Institute of Technology (MIT) die erste numerisch angesteuerte Werkzeugmaschine (Abbildung 19). Der Datenaustausch erfolgte auch hier – wie bei dem Webstuhl – über einen Lochstreifen, der auf einer binären Codierung basierte. Es fehlte allerdings die Möglichkeit, Programme in der Maschine zu halten, weil diese nicht mit einem internen Programmspeicher ausgestattet war. Gleichwohl gab es einen großen Unterschied gegenüber den vorhergehenden Entwicklungen: Die auf der Lochkarte gespeicherten Daten wurden zur Ansteuerung der motorbetriebenen Achsen in elektronische Impulse umgewandelt. Diese Vorgehensweise ermöglichte eine präzise automatisierte Fertigung und die exakte Wiederholbarkeit von Werkstücken.

Mit der Erfindung der NC-Technologie kam die Frage auf, auf welche Weise der Entwerfer dem Computer übermitteln könnte, wie diese Werkstücke auszusehen hätten. Es wurde Ende der 1950er-Jahre die Programmiersprache *Automatically Programmed Tools* (APT) entwickelt. Sie war die erste Computersprache, die eine Werkzeugmaschine steuern konnte und somit die automatische Fertigung von umfassenden Bauteilen ermöglichte. Die Verbindung der NC-Maschinen mit der Programmiersprache APT kann als Vorläufer der heutigen CAD/CAM-Technologie, des Zusammenschlusses von computergestütztem Entwerfen (Computer Aided Design) und Fertigen (Computer Aided Manufacturing), betrachtet werden.

Der letzte und entscheidende Schritt zu der digitalen Fabrikation, wie sie heute existiert, war die Implementierung eines internen Programmspeichers, wie er zuvor von Konrad Zuse erfunden worden war. Die NC-gesteuerten Maschinen wurden um eine computergestützte numerische Ansteuerung erweitert, woraus Mitte der 1970er-Jahre die sogenannten CNC-Maschinen hervorgingen. CNC-Maschinen werden über integrierte Prozessoren gesteuert, anhand derer sich die Programme einlesen und speichern lassen. Dadurch können große Datenmengen zwischengespeichert und schrittweise abgearbeitet werden, ohne dass ein manuelles Nachführen von externen

## In-situ-Fabrikation

Datenträgern notwendig wäre. Auch können Modifikationen und Visualisierungen der Abläufe direkt an der Maschine oder über einen angeschlossenen Rechner erfolgen. Die Produktionszeiten für die automatisierte Einzel- oder Serienfertigung konnten mithilfe der CNC-gesteuerten Maschinen erheblich optimiert werden, und durch den Einsatz von CAD/CAM, den direkten digitalen Austausch der Planung mit der Maschine, entfiel die aufwendige Erstellung des Lochstreifens gänzlich.



*Abbildung 19: Cincinnati Hydrotel mit vertikaler Spindel: die erste NC-gesteuerte Werkzeugmaschine*

Für die Produktion vieler unterschiedlicher Bauteile, die aus einer generativen architektonischen Planung entstehen, ist diese Technologie schon seit einigen Jahren Grundlage, da sich die Maschinen sehr gut für eine Umsetzung im Maßstab 1 : 1 eignen. Für die im vorherigen Unterkapitel beschriebene additive Fabrikation und deren Möglichkeit der direkten Verknüpfung von Daten und Material sind andere Maschinen zu untersuchen. Für die digitale Fabrikation additiver Bauteile in einem architektonischen Maßstab eignen sich, aufgrund der Größe und der Erreichbarkeit von Punkten im dreidimensionalen Raum, im besonderen Maße Industrieroboter.

### *Roboter*

Der Begriff Roboter, geprägt von Josef Čapek (1887–1945), wurde von dem tschechischen Schriftsteller Karel Čapek (1890–1938) in seinem Theaterstück *Rossum's Universal Robots* verwendet.<sup>109</sup> Er leitet sich von dem Wort *robota* ab, das so viel wie „Fronddienst leisten“ bedeutet.<sup>110</sup> Eine allgemeingültige Definition des Begriffs Roboter lässt sich jedoch nicht ohne Weiteres finden, zumal auch schon die Übergänge zu herkömmlichen Automaten fließend und nicht immer leicht abzugrenzen sind. Der Grund liegt in dem kulturell bedingten, höchst unterschiedlichen Gebrauch von Robotern und in deren zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten. So können sie ebenso für Rettungs- und Bergungsarbeiten wie auf dem Dienstleistungssektor und zur Arbeitserleichterung oder zur Steigerung der Produktivität durch Automation eingesetzt werden. Auffallend aber ist, dass in den meisten Definitionen die Programmierbarkeit und die universelle Einsetzbarkeit vorausgesetzt werden – beides unterscheidet einen Roboter klar von den gewöhnlichen CNC-Maschinen, die meist nur eine einzige festgelegte Tätigkeit durchführen können. Aus soziologischer Sicht wird der Roboter zwingend als ein reaktives System angesehen: „Ein Roboter muss flexibel auf seine Umwelt reagieren können. Dazu braucht er Wahrnehmungsorgane, die ihn die Außenwelt und ihre Veränderungen registrieren lassen.“<sup>111</sup> Es könnten noch viele weitere Definitionen unterschiedlichster Quellen für den Begriff Roboter angeführt werden. Diese Beispiele verdeutlichen jedoch bereits, dass eine klare Abgrenzung nicht ganz einfach ist.

### *Industrieroboter*

Die In-situ-Fabrikation basiert auf dem Einsatz von Industrierobotern. Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) definiert Industrieroboter in der Richtlinie VDI 2860 folgendermaßen:

---

<sup>109</sup> Horáková, Jana. „Looking Backward at the Robot.“ In *Research and Education in Robotics – EUROBOT 2011: Proceedings – International Conference*, (Prag 15.–17. Juni 2011), herausgegeben von David Obdržálek und Achim Gottscheber, 1–9. Berlin/Heidelberg: Springer, 2011.

<sup>110</sup> Duden online, Stichwort: robota, <http://www.duden.de/suchen/dudenonline/robota> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>111</sup> Bammé, Arno, et al. *Maschinen-Menschen, Mensch-Maschinen: Grundrisse einer sozialen Beziehung*. Reinbek: Rowohlt, 1983, S. 48.



## In-situ-Fabrikation

„Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen 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/oder Fertigungsaufgaben ausführen.“<sup>112</sup>

Historisch gesehen entwickelten George Devol und Joseph Engelberger 1959 den ersten Industrieroboter mit der von ihnen 1956 gegründeten Firma UNIMATION, deren Name von *universal animation* abgeleitet ist.<sup>113</sup> 1961 folgte der erste kommerzielle Einsatz des Roboters *Unimate* (Abbildung 20) bei General Motors.<sup>114</sup>

---

<sup>112</sup> Verein Deutscher Ingenieure, Hg. VDI 2860. Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Düsseldorf: VDI, Mai 1990, S. 15.

<sup>113</sup> Engelberger, Joseph F. „Historical Perspective and Role in Automation.“ In *Handbook of Industrial Robotics*. 2. Aufl., herausgegeben von Shimon Y. Nof, 3–10. New York/Chichester/Weinheim/Brisbane/Singapore/Toronto: John Wiley & Sons, 1999.

<sup>114</sup> IFR. International Federation of Robotics, Hg. „History of Industrial Robots: From the first installation until today.“ *Milestones of Technology and Commercialization*, 2012; [http://www.ifr.org/uploads/media/History\\_of\\_Industrial\\_Robots\\_online\\_brochure\\_by\\_IFR\\_2012.pdf](http://www.ifr.org/uploads/media/History_of_Industrial_Robots_online_brochure_by_IFR_2012.pdf) (abgerufen am 11.08.2014).



Abbildung 20: Erster Industrieroboter Unimate, 1961, im Einsatz bei General Motors

Ab diesem Zeitpunkt wurde die Robotik stetig weiterentwickelt, heute ist ihre Anwendung in der Industrie nicht mehr wegzudenken.

## 2.5 Die Steuerung und Regelung maschineller Bauprozesse

Die beschriebenen Verknüpfungen von Algorithmen und Material sowie die Ansteuerung programmierbarer Roboter reichen für einen direkten Einsatz in einer undefinierten Umgebung nicht aus. Wie bereits in der Einleitung dargestellt, handelt es sich bei einem herkömmlichen Industrieroboter um einen reinen Bewegungsapparat, der weder mit Sensoren noch mit zusätzlichen Aktoren<sup>115</sup> ausgerüstet ist, also gewissermaßen um eine „blinde“ Maschine, die ohne direkten Kontakt zu ihrer Umwelt agiert. Durch den Einsatz zusätzlicher technischer Erweiterungen kann die Performanz roboterbasierter

---

<sup>115</sup> Der Begriff „Aktor“ lässt sich aus dem Englischen *actuator* (Antrieb) ableiten. Isermann, Rolf. *Mechatronische Systeme*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 2008, S. 441.

## In-situ-Fabrikation

Baumaschinen allerdings wesentlich beeinflusst werden. Das bedeutet, dass neben der reinen Betrachtung von Algorithmen und Maschine wichtige Verbindungen herzustellen sind: zum einen zwischen den Programmstrukturen und Sensoren beziehungsweise Aktoren, zum anderen zwischen den Aktoren und der Materialverarbeitung.

Sensoren spielen besonders bei mobilen Robotern, die sich in einer undefinierten Umgebung frei bewegen sollen, eine große Rolle. Hesse und Schnell bezeichnen Sensoren in dem Buch *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation* treffend als „Sinnesorgane“ der Technik und definieren folgendermaßen: „Der Sensor ist ein technisches Bauteil, das aus einem Prozess zeitvariable physikalische oder auch elektrochemische Größen erfasst und in ein eindeutiges elektrisches Signal umsetzt.“<sup>116</sup> Ohne Ausrüstung mit derartigen technischen Sinnesorganen wäre eine mobile Anlage nichts weiter als eine von der Umgebung abgetrennte Maschine und damit für eine direkte Produktion auf der Baustelle nur bedingt einsetzbar. Insbesondere für die angestrebten reaktiven Prozesse im Rahmen der In-situ-Fabrikation müssen Informationen aus der Umgebung echtzeitnah aufgenommen und weiterverarbeitet werden.

Wird der Analogie zum menschlichen Körper und dem Vergleich der Sensoren mit Sinnesorganen weiter gefolgt, könnten die Aktoren mit der Muskulatur des Menschen gleichgestellt werden.<sup>117</sup> Bezogen auf ein technisches System lassen sich Aktoren wie folgt definieren:

„Die Aktoren dienen in einem abstrakten Sinn als Elemente, mit denen die Energieflüsse im System beeinflusst werden können, wobei die Besonderheit darin besteht, dass die durch Aktoren erzeugten Energieflüsse durch Stellsignale geringer Leistung, d. h. durch Informationsflüsse, angesteuert werden können.“<sup>118</sup>

---

<sup>116</sup> Hesse, Stefan, und Gerhard Schnell. *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion – Ausführung – Anwendung*. 5. Aufl., Wiesbaden: Vieweg + Teubner/Springer, 2011, S. 2.

<sup>117</sup> Wallaschek, Jörg. „Sensoren und Aktoren.“ In *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*, herausgegeben von Waldemar Steinhilper und Bernd Sauer, 665–706. Berlin/Heidelberg: Springer, 2008.

<sup>118</sup> Ebd., S. 667.

Ein Aktor als Hardwareelement wandelt demnach Steuerungssignale, direkt durch Code oder indirekt durch Sensoren ausgelöst, in mechanische Arbeit um. Erweitert lässt sich sogar festhalten:

„Der Begriff Aktor geht [...] über den Begriff Antrieb (engl. actuator) hinaus und umfasst alle Arten von Ausgabeelementen für Bewegungen, Kräfte und Momente, die sowohl analog als auch binär wirken können.“<sup>119</sup>

Bei genauer Betrachtung der programmgesteuerten Sensoren und Aktoren lässt sich das klassische Prinzip von Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe erkennen (E-V-A-Prinzip). Als Eingabe dienen die Sensoren, die Ausgabe erfolgt über die Aktoren. Die über die Algorithmen verlaufende Verarbeitung ist die formale Beschreibung von maschinellen Handlungsprozessen.

Bei der roboterbasierten In-situ-Fabrikation beziehen sich die tatsächlichen Operationen aber zumeist auf die Abläufe der konkreten Maschine und nicht auf die reine Informationsverarbeitung. Welche Handlungen möglich sind, ist demnach wesentlich an die Sensoren und Aktoren gekoppelt. Im Kontext der Architektur ist daher zu definieren, welche Sensoren und Aktoren benötigt werden, welche ohne zusätzliche Modifikationen erhältlich sind und welche wünschenswert wären. Auf dieser Grundlage sind in einem ersten Schritt die wesentlichen Werkzeuge und die Anforderungen auf einer realen Baustelle zu bestimmen.

### *Die Integration von Sensoren und Aktoren*

Im Bereich der Sensorik lassen sich Ähnlichkeiten zum menschlichen Verhalten aufzeigen. Wie bei den Wahrnehmungsprozessen von Lebewesen werden bei der maschinellen Orientierung in einem undefinierten Wirkungsbereich kognitive Eigenschaften benötigt wie beispielsweise Sehfähigkeit, Tastsinn und die propriozeptive Wahrnehmung (Lage-, Kraft- und Bewegungssinn). Diesbezüglich gibt es eine Vielzahl verschiedenartigster Sensoren auf dem Markt, mit deren Hilfe unterschiedlichste Größen erfasst werden können. Hesse und Schnell klassifizieren sie beispielsweise nach Aufgaben und

---

<sup>119</sup> Roddeck, Werner. *Einführung in die Mechatronik*. Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH, 2006, S. 198.

## In-situ-Fabrikation

Nutzen. Da eine automatisierte Baustellenproduktion nur möglich ist, wenn die Apparatur auf unterschiedliche Umwelteinflüsse reagieren kann, sind die für die vorliegende Arbeit wichtigsten Aufgaben gemäß dieser Einteilung: Erfassung mechanischer Größen; Feststellen der Anwesenheit von Objekten; Feststellung der Identität von Objekten; Erfassung von Position und/oder Orientierung von Objekten; Erfassen der Formeigenschaften von Objekten.<sup>120</sup> Angesichts der zu untersuchenden Mensch-Maschine-Interaktion ist außerdem die Einbeziehung menschlicher Anweisungen unabdingbar. Die Funktionsweisen der Sensortypen sind entsprechend den unterschiedlichen Messgrößen naturgemäß verschieden. Nach einer grundsätzlichen Differenzierung in digitale und analoge Datenerfassung<sup>121</sup> werden sie den Hauptprinzipien taktil, elektrisch, optisch/visuell und akustisch zugeordnet.<sup>122</sup>

Um ein Reagieren auf die Umgebung zu ermöglichen, sind daher folgende wichtige sensorische Anforderungen an eine Maschine zu stellen: Objekt- und Hinderniserkennung (taktil, optisch/visuell), Abstandsmessung (optisch/visuell), Erkennung von Umgebungs- und Materialtoleranzen (optisch/visuell), die eigene Positionsbestimmung (elektronisch, optisch/visuell) und das Erfassen menschlicher Anweisungen (optisch/visuell). Eine genaue Aufführung der eingesetzten Sensorik, die für die Experimente notwendig war, findet sich in Kapitel 4.4 *Experimente II – In-situ-Fabrikation* wieder.

Ist die Sensorik in der Lage, grundlegende Umgebungs- und Materialparameter zu erfassen, können die Werte nach einer entsprechenden Datenverarbeitung als analoge oder digitale Signale an die Effektoren<sup>123</sup> übergeben werden. Typischerweise handelt es sich in der Robotik bei den Effektoren um Greif-, Bearbeitungs- oder Fügwerkzeuge, die für viele industrielle Anwendungen als

---

<sup>120</sup> Hesse, Stefan, und Gerhard Schnell. *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion – Ausführung – Anwendung*. 5. Aufl., Wiesbaden: Vieweg + Teubner/Springer, 2011, S. 13–15.

<sup>121</sup> Vereinfacht kann die digitale Datenerfassung als Zustandserfassung (an/aus oder aktiv/inaktiv) bezeichnet werden. Bei der analogen Datenerfassung handelt es sich um eine Messwerterfassung, die in unendliche Zwischenschritte unterteilt werden kann.

<sup>122</sup> Hesse, Stefan, und Gerhard Schnell. *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion – Ausführung – Anwendung*. 5. Aufl., Wiesbaden: Vieweg + Teubner/Springer, 2011, S. 15.

<sup>123</sup> Oftmals wird in der Robotik der Begriff „Effektor“ gleichbedeutend mit dem Begriff „Aktor“ verwendet.

Standardprodukte erhältlich sind. Die Komplexität dieser Werkzeuge variiert aber aufgrund unterschiedlich hoher, auf den Prozess zugeschnittener Anforderungen sehr stark.<sup>124</sup> Dennoch ist eine sensorische Anbindung nicht immer erforderlich. Einfache und gleichbleibende Bauteilgeometrien, die in sich wiederholenden Vorgängen platziert werden, können beispielsweise unkompliziert mit einem 2-Backen-Parallelgreifer ohne Rückkopplung gehandhabt werden.<sup>125</sup> Auch materialverarbeitende Vorgänge, wie das roboterbasierte Fräsen, können zumindest auf der Werkzeugseite ohne zusätzliche Rückkopplung umgesetzt werden, da die Fräspfade vonseiten der Programmierung vorherbestimmt sind.

Weitaus aufwendiger wird es, wenn das zu greifende beziehungsweise zu bearbeitende Bauteil in seiner Form, Größe, Lage oder Materialität nicht eindeutig bestimmt ist beziehungsweise sich während der roboterbasierten Materialisierung weitere Veränderungen und Anpassungen ergeben.<sup>126</sup> Neben der erforderlichen Anbindung an die Sensorik wird dadurch auch der Aufbau der Aktoren oftmals vielschichtiger. Zusätzlich sind, je nach Prozess, mit nur einem Werkzeug mehrere Arbeitsschritte, wie das Fixieren, die Bearbeitung und die Assemblierung, zu leisten. Für das form- und kraftschlüssige Greifen ungleicher Objekte sind bereits jetzt schon mehrgliedrige, der menschlichen Anatomie nachempfundene Greifhände mit taktilen Eigenschaften erhältlich.<sup>127</sup>

---

<sup>124</sup> Effektoren, in Form von Vakuum-Sauggreifern, die für das Verpacken und Sortieren von Lebensmitteln oder pharmazeutischen Produkten verwendet werden, sind in ihrem Aufbau vergleichsweise einfach. Im Gegensatz dazu sind beispielsweise Punktschweißwerkzeuge, die für das Fügen von Stahlblechen eingesetzt werden, sowohl in der Größe als auch dem Aufbau weitaus komplexer ausgeführt.

<sup>125</sup> Vgl. Zimmer GmbH, vormals Sommer-automatic GmbH, <http://www.sommer-automatic.com/produkte-komponenten-systeme/komponenten/greifer/pneumatisch/2-backen-parallelgreifer.html> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>126</sup> Ein Hinweis auf die sich permanent ändernde Lage eines Werkstückes ist der Griff auf das laufende Band: „[...] das gezielte automatische Greifen eines sich bewegenden ungeordneten Werkstückes vom Förderband.“ Hesse, Stefan, und Gerhard Schnell. *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion – Ausführung – Anwendung*. 5. Aufl., Wiesbaden: Vieweg + Teubner/Springer, 2011, S. 329. Für das situative Eingreifen des Roboters ist hierbei die Integration von Kamerasystemen notwendig.

<sup>127</sup> Vgl. Schunk GmbH & Co. KG, <http://mobile.schunk-microsite.com/de/produkte/produkte/servoelektrische-5-finger-greifhand-svh.html> (abgerufen am 11.08.2014).

## In-situ-Fabrikation

Auch in der roboterbasierten digitalen Fabrikation kommen häufig standardisierte Aktoren zum Einsatz. Aber anders als bei herkömmlichen industriellen Verfahren zeichnen sich computer-gesteuerte Herstellungsverfahren dadurch aus, dass einzelne Arbeitsschritte nicht immer gleichbleibend ausgeführt werden müssen. Im Gegensatz zur Automobilproduktion ist die Produktion differenziert beschriebener Bauteile keine stetige Abfolge von sich wiederholenden Prozeduren (siehe Kapitel 2.2 *Algorithmen in der Architektur*). Gefordert sind daher variierende Strategien für den Bewegungsablauf des Roboters und die Implementierung individueller Werkzeuge. Der Effektor ist stark an den jeweiligen Prozess gebunden und hat so wiederum großen Einfluss auf die maschinellen Fertigungsabläufe. Im Kontext der Architektur spielen deshalb neben den herkömmlichen Greif- und Platziervorgängen weitere entwurfs- und materialspezifische Anforderungen eine wichtige Rolle. Die auf dem Markt erhältlichen standardmäßigen Werkzeuge lassen sich aber meist nicht auf diese – erweiterten – Anforderungen anwenden. Hierfür müssen sie modifiziert, umgebaut oder vollkommen neu entworfen werden.<sup>128</sup> Unter anderem ermöglichen sie roboterbasierte Herstellungskonzepte wie das räumliche Extrudieren schnell härtender Materialien<sup>129</sup>, das räumliche Drahtschneiden von Schaumstoffen und Steinmaterialien<sup>130</sup> und das Erstellen von Bauteilen aus faserbasiertem Verbundmaterial.<sup>131</sup>

In Anbetracht der Tatsache, dass oftmals sehr einfache, aber auch verschiedenartige und toleranzbehaftete Baumaterialien verwendet werden, ist es unausweichlich, ein besonderes Augenmerk auf das

---

<sup>128</sup> In dem Buch *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture* werden einige solcher speziellen Aktoren, die bereits in Projekt- und Forschungsarbeiten eingesetzt wurden, vorgestellt. Gramazio, Fabio, Matthias Kohler, und Jan Willmann. *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture*. Zürich: Park Books, 2014, S. 478–481.

<sup>129</sup> Laarman, Joris, et al. „Anti-Gravity Additive Manufacturing.“ In *Fabricate: Negotiating Design & Making*, herausgegeben von Fabio Gramazio, Matthias Kohler und Silke Langenberg, 192–197. Zürich: gta, 2014.

<sup>130</sup> Feringa, Jelle, und Asbjørn Søndergaard. „Fabricating Architectural Volume: Stereotomic Investigations in Robotic Craft.“ In *Fabricate: Negotiating Design & Making*, herausgegeben von Fabio Gramazio, Matthias Kohler und Silke Langenberg, 76–83. Zürich: gta, 2014.

<sup>131</sup> Prado, Marshall, et al. „Core-Less Filament Winding: Robotically Fabricated Fiber Composite Building Components.“ In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014*, herausgegeben von Wes McGee und Monica Ponce de Leon, 275–289. Cham/Schweiz: Springer International Publishing, 2014.

Erkennen und Verarbeiten von undefinierten oder sich während des Bauens verändernden Geometrien zu werfen. Erste Ansätze wurden bereits in Forschungsprojekten wie *Rubble Aggregations*<sup>132</sup> verfolgt. Bei diesem Vorhaben stand die Entwicklung prototypischer Prozesse und Werkzeuge im Vordergrund, die das maschinelle Assemblieren bruchsteinartiger Materialien ermöglichen (Abbildung 21). Hierzu musste die Geometrie jedes einzelnen Abbruchstücks durch eine 3-D-Scantechnologie erfasst und verarbeitet werden. Mit vereinfachten Datenmodellen wurden anschließend adaptive Aufbaustrategien entwickelt. Bei diesen Versuchen stand nicht nur die Berechnung des zu verbauenden Materials im Vordergrund, sondern auch die Rückkopplung bereits verbauter Elemente durch Sensorik (Abbildung 22). Durch diese stetige Rückführung der Umgebungsparameter besteht noch während des Aufbauprozesses die Möglichkeit, auf Veränderungen einzugehen, die beispielsweise durch Setzungen und Bewegungen innerhalb des Systems auftreten können. Für die Platzierung des Materials wurde im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie ein Mechanismus entwickelt, der unterschiedlichste Steinformen greifen und positionieren kann (Abbildung 23).

---

<sup>132</sup> Nähere Informationen zu dem Projekt *Rubble Aggregations* finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*.

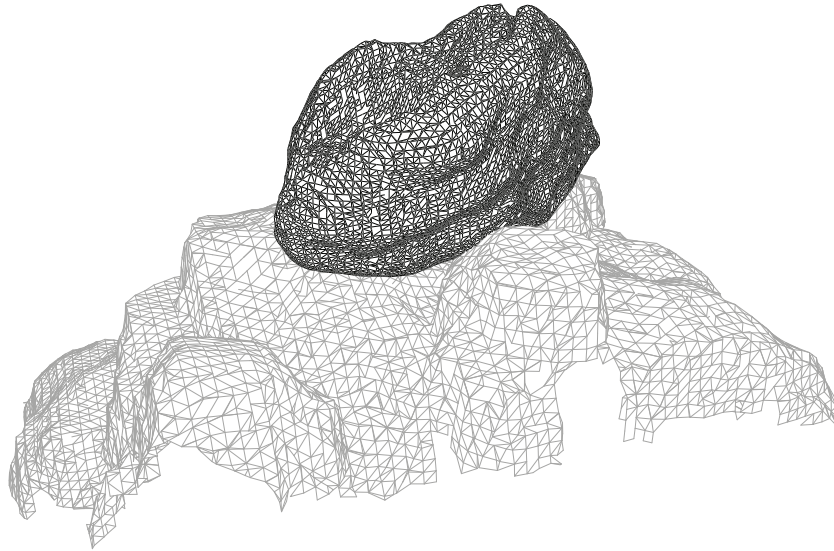


## In-situ-Fabrikation

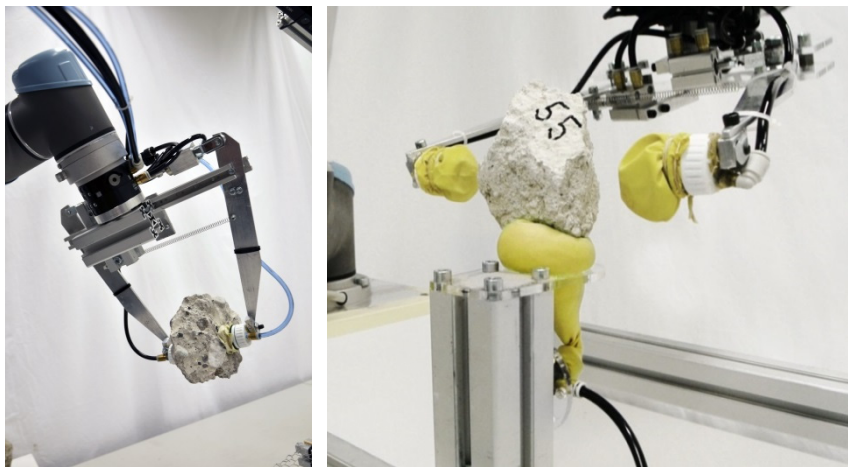


*Abbildung 21: In einer Machbarkeitsstudie des Projektes Rubble Aggregations wurden erste Strategien zur Assemblierung von Abbruchmaterialien aufgezeigt*

## Volker Helm



*Abbildung 22: Rückkopplung bereits verbauter Abbruchmaterialien durch Sensorik*



*Abbildung 23a und b: Aufbauvarianten eines Greifers für Abbruchmaterial*

An diesen Beispielen lässt sich einerseits klar verdeutlichen, wie eng das maschinelle Handeln an den Effektor und die Sensorik und dadurch auch an das Verarbeitungsmaterial gekoppelt ist. Der Entwurf und die Präzision der jeweiligen Werkzeuge beeinflussen mithin wesentlich die Realisierung und Leistungsfähigkeit der digitalen Fabrikation. Eine Weiterentwicklung der Aktoren in diesem Bereich ist die Kreation kompakter Multifunktionswerkzeuge, die neben der Positionierung auch die Bearbeitung von Material übernehmen können (siehe Kapitel

4.4.5 *Reaktive Prozesse*). Andererseits wird ebenso evident, dass vor allem die Integration von Sensoren für Toleranzerkennung und Rückkopplungsprozesse in die Entwicklung der Werkzeuge mit einbezogen werden muss. Durch das Zusammenspiel von Aktoren und Sensoren können gänzlich neue Materialprozesse entstehen, deren Potenziale in der maschinellen Herstellung generativer und adaptiver architektonischer Bauteile liegen. Auch besteht durch diesen Zusammenschluss die Möglichkeit, sich ändernde Baubedingungen situativ zu erkennen und diese neu gewonnenen Informationen echtzeitnah, noch während des Bauprozesses, zu verarbeiten.

### *Steuern, Regeln und Rückkopplungsprozesse*

Wie deutlich wurde, erlaubt erst das Zusammenspiel von Sensoren und Aktoren einer digital angesteuerten Baumaschine, unterschiedliche Steuerungs- und Regelungsprozesse<sup>133</sup> einzubinden und physisch zu reagieren. Insbesondere für die Fertigung auf einer Baustelle mit sich ändernden Aufgabenstellungen und variierenden Bautoleranzen spielt die Regelung eine große Rolle. Durch die Rückführung von Informationen kann die vorhandene Istsituation mit der Sollsituation verglichen werden. Dem System ist es daraufhin möglich, bei aufkommenden Abweichungen selbstregelnd zu intervenieren.<sup>134</sup> Als

---

<sup>133</sup> Unter Steuerung wird ein offener Wirkungsablauf verstanden, bei dem Informationen nur in eine Richtung fließen. Eingabesignale beeinflussen zwar die Ausgabesignale, aber auf Veränderungen innerhalb des Systems erfolgt keine Reaktion. Im Gegensatz dazu findet bei einer Regelung die ständige Erfassung der Ausgabe statt, die Information fließt in einem Kreislauf zum Eingang zurück. Erläuterung angelehnt an die Definitionen aus: Beier, Thomas, und Petra Wurl. *Regelungstechnik: Basiswissen, Grundlagen, Anwendungsbeispiele*. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., 2013, S. 13.

<sup>134</sup> An dieser Stelle ist der amerikanische Mathematiker Norbert Wiener (1894–1964) zu nennen, der 1948 den Begriff „Kybernetik“ ins Leben gerufen hat. Er lässt sich von dem griechischen Wort *kybernētikē* (= Steuermannskunst) ableiten. Norbert Wiener beschreibt Kybernetik als Wissenschaft der Kontrolle und Informationsübertragung in Lebewesen und Maschinen. Ein wesentlicher Bestandteil der Kybernetik ist die selbsttätige Regelung eines Systems mittels Rückkopplung von Informationen (Feedback). Wiener, Norbert. *Cybernetics: Or the Control and Communication in the Animal and the Machine*. 2. Aufl., Cambridge, Mass.: MIT Press, 1961. Als typische Veranschaulichung für ein selbstregelndes System wird oftmals ein Thermostat angeführt, wie es beispielsweise in einem Backofen vorhanden ist. Das Thermostat überprüft ständig den Unterschied zwischen der voreingestellten gewünschten Temperatur und der vorhandenen Isttemperatur. Solange die Solltemperatur nicht erreicht ist, berichtet sich das System ständig selbst

Beispiel für ein reaktionsfähiges System lässt sich die Installation *Seek* anführen, die 1970 in der New Yorker Ausstellung *Software* gezeigt wurde. Zusammen mit ihrem Gründer Nicholas Negroponte demonstrierte die MIT Architecture Machine Group<sup>135</sup> ein System, das Anpassungen zwischen Simulation und der realen Welt vornehmen konnte. Eine Umgebung aus fünfhundert kleinen Metallwürfeln bildete hierbei den Lebensraum für Wüstenrennmäuse. Die auftretenden Veränderungen in dieser Umgebung, ausgelöst durch das Verschieben der Würfel durch die Mäuse, ließen sich anhand von Sensorik erkennen. Auf das unvorhersehbare Verhalten der Tiere sollte das System mit einer computergesteuerten maschinellen Neupositionierung der Blöcke reagieren und eine ständig wandelbare und anpassungsfähige Architektur, ausgelöst durch das Verhalten von Lebewesen, schaffen.<sup>136</sup>

Durch Rückkopplungsprozesse im Bereich der Baurobotik erschließen sich völlig neue Entwurfsmethoden. So konnte beispielsweise in dem Wahlfach *Prozedurale Landschaften*<sup>137</sup> die roboterbasierte Verarbeitung des geometrisch undefinierten Materials Sand als ergebnisoffener Gestaltungsprozess aufgezeigt werden. Die Aufgabe der Studierenden bestand darin, prozedurale Entwurfs- und Fabrikationsprozesse zur experimentellen Landschaftsgestaltung in einem Modelbaumaßstab zu untersuchen. Im Vordergrund stand hierbei nicht die Umsetzung eines im CAD vorgeplanten Entwurfes, sondern der Umgang mit schwer vorhersehbaren Faktoren wie dem Materialverhalten von Sand. Durch die Implementierung eines Messsystems wurde fortlaufend die Istsituation (Höhenmessung) einer einzelnen Sandschüttung überprüft. Die Rückführung der ausgewerteten Messdaten beeinflusste wiederum die Dosierung der Sandmenge für die darauffolgende Schüttung.

---

und erhöht die Wärmeentwicklung. Im Bereich der Architektur bisher stets als system- und entwurfstheoretisches Modell verstanden, erhält der Begriff „Kybernetik“ in der digitalen Fertigung – insbesondere durch die hier diskutierten Regelungsprozesse – erneut eine zentrale Bedeutung, allerdings auf der physisch-materiellen Seite.

<sup>135</sup> Die Abkürzung MIT steht für das Massachusetts Institute of Technology. Aus der MIT Architecture Machine Group entwickelte sich 1980 das heutige MIT Media Lab; vgl. <http://www.media.mit.edu/about/background> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>136</sup> Negroponte, Nicholas. *Soft Architecture Machines*. Cambridge, Mass./London: MIT Press, 1975, S. 46-47.

<sup>137</sup> Nähere Informationen zu dem Projekt *Prozedurale Landschaften* finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*.

## In-situ-Fabrikation

Bezogen auf das ganze System steht das Ergebnis der Sandlandschaft in direkter Abhängigkeit zu jeder einzelnen Materialplatzierung und erlaubt nicht, oder nur mit aufwendigen Simulationsmethoden, vorzuplanen (Abbildung 24).

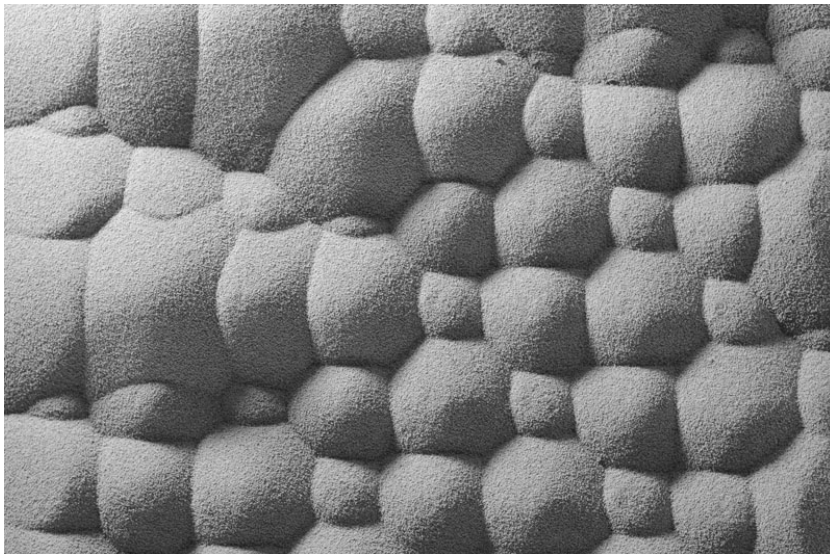


Abbildung 24: Durch Rückkopplung beeinflusste Sandschüttungen des Projektes *Prozedurale Landschaften*

### *Mensch und Maschine im soziotechnischen Bauprozess*

Für das selbstständige maschinelle Agieren in komplexeren Umgebungen reichen einfache Regelungsprozesse mit minimierter Sensorik nicht aus; hier setzt der Bereich der kognitiven Robotik an.<sup>138</sup> Jedoch kommt auf vielen unterschiedlichen Gebieten eine sehr anspruchsvolle Mechanik sowie Sensortechnik zum Einsatz. Trotz

---

<sup>138</sup> Das Fraunhofer-Institut beschreibt kognitive Robotik wie folgt: „Kognitive Roboter können auch in komplexen Umgebungen mit unvorhergesehenen Situationen umgehen. Dazu sind sie mit reichhaltigen Sensoren ausgestattet, deren Interpretation es ihnen erlaubt, ihre Umgebung wahrzunehmen. Sie agieren zielorientiert auf der Grundlage von Plänen, können aktiv ihre Umgebung explorieren und Handlungsoptionen identifizieren. So ist es ihnen möglich, Robustheit in dynamischen Umgebungen zu erreichen. Kognitive Roboter arbeiten nicht in Isolation, sondern in enger Interaktion mit anderen technischen Systemen und Menschen. Sie sind in der Lage, ihr Verhalten durch Lernen zu verbessern.“ Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme (IAIS), [http://www.iais.fraunhofer.de/cognitive\\_robotics.html](http://www.iais.fraunhofer.de/cognitive_robotics.html) (abgerufen am 11.08.2014).

solcher Hightechprodukte wäre diesen Robotersystemen weder menschenähnliche Intelligenz noch Bewusstsein zuzuschreiben.<sup>139</sup> Für den Umgang mit unerwarteten Situationen, die mit Standardroutinen nicht mehr abgearbeitet werden können, wird dem System aber eine gewisse Art von Intelligenz abverlangt.<sup>140</sup>

Die Reaktionsfähigkeit von Algorithmen allein beschränkt sich jedoch nur auf Situationen, die explizit vorgedacht wurden. Was nicht schon in der Programmierung als mögliches zukünftiges Ereignis vorausgesehen wurde, kann in einer realen Begebenheit (z. B. auf einer Baustelle) nicht geeignet behandelt werden und muss zwangsläufig zu Fehlern führen. Daher stellen eingebettete Systeme<sup>141</sup>, im Gegensatz zu klassischen Rechenmaschinen, viel höhere Anforderungen an die Software für Echtzeitanwendungen.<sup>142</sup>

Auch für mobile Baurobotereinheiten, wie sie anhand einer konkreten Entwicklung in dieser Arbeit vorgestellt werden, werden in das System eingebettete Programmstrukturen untersucht. Hierbei stellt sich jedoch die Frage, ob es im Kontext einer komplexen Baustellenfabrikation algorithmisch überhaupt möglich ist, tatsächlich auf alle aufkommenden Szenarien völlig autonom zu reagieren. Aufgrund unzähliger Kombinationen von Aufgaben, Objekterkennungen oder Kollisions- und Positionsüberwachungen wäre der Programmieraufwand nahezu unüberschaubar und sehr fehleranfällig. Als Lösungsansatz für unvorhersehbare Situationen, die sich derzeit nicht automatisieren

---

<sup>139</sup> Knoll, Alois, und Thomas Christaller. *Robotik*. Frankfurt am Main: Fischer Taschenbuch, 2003, S. 29–30.

<sup>140</sup> Ebd., S. 30.

<sup>141</sup> „Eingebettete Systeme sind informationsverarbeitende Systeme, die in ein größeres Produkt integriert sind, und die normalerweise nicht direkt vom Benutzer wahrgenommen werden. Beispiele für eingebettete Systeme sind informationsverarbeitende Systeme in Telekommunikationsgeräten, in Transportsystemen wie Autos, Zügen, Flugzeugen, in Fabriksteuerungen und in Unterhaltungsgeräten.“ Definition aus Marwedel, Peter. *Eingebettete Systeme*. Übersetzung von Lars Wehmeyer. Berlin/Heidelberg: Springer, 2008, S. 1–2.

<sup>142</sup> Beispielsweise können Sicherheitsfragen nicht erst nachträglich betrachtet werden, sondern müssen von Anfang an in die Überlegungen und die Entwicklung mit einbezogen werden. Eingebettete Systeme, deren Software nur kleinste Fehler aufwies, haben in der Vergangenheit zu verheerenden Unfällen oder Systemversagen geführt. Einige Beispiele hierfür lassen sich im Bereich der Luft- und Raumfahrt, in der Medizintechnik, der Finanzwirtschaft und in der Katastrophenhilfe finden. Beispiele für Fehlverhalten unter Softwarebeteiligung: Liggesmeyer, Peter. *Software-Qualität: Testen, Analysieren und Verifizieren von Software*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2009, S. 30–32.

## In-situ-Fabrikation

lassen, wird daher ein Zusammenspiel mit dem Arbeiter vor Ort vorgeschlagen. Der Mensch soll sowohl als Entscheidungsträger wie auch zur Ausführung maschinell nicht umsetzbarer Aufgaben hinzugezogen werden. Damit wäre das technische Handeln, basierend auf Algorithmen und der Apparatur, mit dem zielgerichteten menschlichen Verhalten verknüpft.<sup>143</sup> Der Mehrwert dieses sogenannten „soziotechnischen Systems“<sup>144</sup> liegt in der direkten Interaktion:

„In vielen Bereichen der neueren Technologieentwicklung zeichnet sich ein Trend ab, nicht mehr nur die Automatik des Produzierens, Prozessierens und Navigierens technischer Abläufe einseitig zu perfektionieren, sondern die Interaktivität zwischen menschlichen Aktionsteilen und technischen Operationssystemen in ihrer wechselseitigen Abstimmung als hybride soziotechnische Konstellation zu optimieren.“<sup>145</sup>

Weiterhin stellt sich sogar die Frage, ob sich durch eine solche Interaktion eine Art verteilter Intelligenz zwischen menschlichem Handeln und Computerprogrammen gewinnen ließe.<sup>146</sup> Als Beispiel für ein soziotechnisches System im Bereich der digitalen Fabrikation sind die Experimente des Kapitels 4.4.3 *Mensch-Maschine-Interaktion* anzuführen. In diesen Versuchen geht es um die Vereinfachung komplexer Aufgaben, die von einem Roboter durchgeführt werden sollen, durch Übermittlung menschlicher Handlungsanweisungen.

Beide Seiten eines soziotechnischen Systems haben ihre Stärken und Schwächen. Das menschliche Verhalten eignet sich besonders für den spontanen Umgang mit unerwarteten, komplexen Situationen. Intuitiv

---

<sup>143</sup> Die Begriffe „Verhalten“ und „Handeln“ sind zu differenzieren. In der Soziologie ist Verhalten gegenüber Handeln der allgemeinere, umfassendere Begriff. Handeln wird als eine Spezialform des Verhaltens, als zweckhaftes und zielgerichtetes Verhalten angesehen. Verhalten dagegen kann auf biologische Faktoren, wie beispielsweise das Schwitzen, zurückgeführt werden. Vgl. hierzu: Vester, Heinz-Günter. *Kompendium der Soziologie I: Grundbegriffe*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009, S. 46.

<sup>144</sup> Ein soziotechnisches System entsteht aus der Verknüpfung von menschlichem Handlungssystem und technischem Sachsystem. Definition aus: Ropohl, Günter. *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*. Karlsruhe: Universitätsverlag, 2009, S. 47.

<sup>145</sup> Rammert, Werner, und Ingo Schulz-Schaeffer. „Technik und Handeln. Wenn soziales Handeln sich auf menschliches Verhalten und technische Abläufe verteilt.“ In *Können Maschinen handeln? Soziologische Beiträge zum Verhältnis von Mensch und Technik*, herausgegeben von Werner Rammert und Ingo Schulz-Schaeffer, 11–64. Frankfurt/Main: Campus, 2002, S. 17.

<sup>146</sup> Ebd., S. 18.

kann der Mensch auf Ereignisse reagieren, die aus dem Kontext gerissen wurden. So werden beispielsweise umgefallene Baumaterialien problemlos erkannt und wieder aufgehoben. Für die mit Sensorik ausgestattete Maschine stellt hingegen die Hinderniserkennung eine große Herausforderung dar, insbesondere wenn das plötzlich auftauchende Objekt hinsichtlich Materialität und Geometrie unbekannt ist. Maschinenseitig liegt der Mehrwert jedoch klar bei der Präzision, der Programmierbarkeit und der Beständigkeit in der Produktion.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Verbindung von Algorithmen und Automaten in einem architektonischen Kontext herzustellen. Um die neuartigen Vorteile und Handlungsmöglichkeiten der roboterbasierten Architekturproduktion und die grundlegenden Zusammenhänge von Algorithmen und Automaten genauer verstehen zu können, bedarf es vorab einer Auseinandersetzung mit der herkömmlichen digitalen Prozesskette und ihrer Anwendung in der Praxis.



### 3. Die digitale Kette im Bauprozess

In den folgenden Kapiteln soll anhand von Beispielen aus der Vorfabrikation die Verkettung von digitalen Prozessen grundsätzlich erläutert und veranschaulicht werden. Für die In-situ-Fabrikation ist die Betrachtung der *konventionellen digitalen Prozesskette* in Kapitel 3.1 als wichtige Ausgangslage anzusehen, da die Abläufe einer *computer-basierenden* Bauteilfertigung auf der Baustelle auf den gleichen Grundprinzipien beruhen.

Aus diesem Grund werden zur Verdeutlichung zwei unterschiedliche Anwendungsszenarien in verschiedenen Maßstäben aufgezeigt. Zum einen lässt sich anhand des Projekts *Automatic Freeform Production* in Kapitel 3.2 *Individuelle Massenproduktion* der Einsatz solcher Verfahren für die Herstellung individuell gestalteter, über Parameter gesteuerter Produkte, die in Serie gefertigt werden, grundsätzlich darlegen. Hierbei werden die Entwurfseinstellungen über einen Internetkonfigurator vorgenommen und über einen automatisierten Vorgang zu einer digitalen Produktionsmaschine gesendet. Der Käufer hat via Webcam die Möglichkeit, die Fertigung seiner Bestellung in Echtzeit zu beobachten.

Am Beispiel des Neubaus der Messe Basel in Kapitel 3.3 steht die Verwendung parametrischer Werkzeuge in Großbauprojekten im Fokus. Neben Vorschlägen für die Bearbeitung komplexer geometrischer Anforderungen zeigt das Fallbeispiel, wie maßgeschneiderte computerbasierte Entwurfs- und Fertigungsmethoden in einen komplexen Planungsprozess eingebunden werden können.

#### 3.1 Die konventionelle digitale Prozesskette

Wird am Rechner eine CAD-Zeichnung erstellt, werden die Daten oftmals nur für den Ausdruck einer zweidimensionalen Darstellung oder zur Visualisierung eines dreidimensionalen digitalen Modells genutzt. Bei komplexeren Planungen können zusätzliche konstruktive oder entwurfsbedingte Änderungen einen erhöhten nachträglichen Planungsaufwand bedeuten. Soll anschließend der am Computer erstellte Entwurf real gebaut werden, wird in den meisten Fällen ein Papierplan der digitalen Daten ausgedruckt, nach dem das Objekt dann

gefertigt wird. Dieser Prozess lässt sich vereinfachen: Werden CNC-gesteuerte Fabrikationsmaschinen direkt mit den Informationen einer über Parameter gesteuerten Planung versorgt und gekoppelt, können diese Zwischenschritte vermieden werden. Ein solcher durchgängig automatisierter Ablauf verhindert durch Zeichnungengenauigkeiten oder Missverständnisse verursachte Konvertierungsfehler und ist folglich verlustfrei. Dieses Verfahren wird als digitale Prozesskette bezeichnet.<sup>147</sup> Deren Anwendung ist insbesondere dann sinnvoll, wenn entwurfsbedingt viele geometrisch unterschiedliche Bauteile entstehen.<sup>148</sup> Die Kosten können dadurch erheblich gesenkt werden, da ungleiche Bauteile nicht mehr als Einzelteile kalkuliert werden müssen, sondern im Rahmen einer Serienfertigung gleichgestellt sind.<sup>149</sup>

---

<sup>147</sup> Schindler, Christoph, und Fabian Scheurer. „Neue Formen und neue Wertschöpfung: Digitale Produktionsketten für den Holzbau.“ In *Internationale Konferenz zur Automation in der Holzwirtschaft* (Biel 12.–13. Oktober 2006). Biel: Berner Fachhochsch., Architektur, Holz und Bau, 2006; [http://www.hsb.bfh.ch/NR/rdonlyres/F9D91C9E-66F4-460B-A207-3E4EF9A752EE/9522/Digitale\\_Ketten\\_Scheurer.pdf](http://www.hsb.bfh.ch/NR/rdonlyres/F9D91C9E-66F4-460B-A207-3E4EF9A752EE/9522/Digitale_Ketten_Scheurer.pdf) (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>148</sup> Als Beispiel für eine digitale Prozesskette kann der im Rahmen des Nachdiplomstudiums CAAD (ETH Zürich – Professur Ludger Hovestadt) entstandene ESG-Pavillon angeführt werden. Die folgende Projektbeschreibung ist dem Jahrbuch 2004 der ETH entnommen: „Der ESG-Pavillon (Endless Space Generated by Sections) ist die Materialisierung eines Ausschnittes einer unbestimmt langen Aneinanderreihung von verschiedenen Schnittebenen auf einer linearen Achse. In einer internetbasierten Applikation können einzelne Schnittlinien bestimmt werden, welche dann aneinandergereiht eine räumliche Struktur ergeben. Zugleich moduliert die Software zwischen den einzelnen Schnitten durch das Einfügen verbindender, interpolierter ‚Schnitte‘. Diese computergenerierten Schnitte sind an ihren schiefwinkligen Geometrien erkennbar und werden von der Software aufgrund vorgegebener Regeln gestaltet. Die Entwurfsdaten werden in einer Datenbank verwaltet, welche anschliessend eine Datei, z. B. in XML-Hierarchisierung, ausgibt oder als Datei für den 3-D-Modelldrucker. Eine zweite Software generiert daraus komplette Werkpläne. Samt Schraublöchern und Schwalbenschwanzverbindungen wurde die Zeichnung an die computergesteuerte 3-Achs-Fräse des CAAD weitergeleitet – als digitale Datei, ohne jemals auf Papier gewesen zu sein. Einzig der Prozess des Zusammensteckens der aus Furnierschichtholz gefrästen Bauteile erfolgte von Hand. Abschliessend wurde die Konstruktion beidseitig mit faserverstärkten Kunststoffplatten des Schweizer Herstellers Scobalit beplankt.“ Departement Architektur der ETH Zürich, Hg. *Jahrbuch/Yearbook 2004: Lehre und Forschung/Teaching and Research*. Zürich: gta, 2004, S. 147. Nähere Informationen zu dem Projekt *ESG-Pavillon* finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*.

<sup>149</sup> Fritz, Oliver. „Bauen mit Computern: Digitale Technologien in der Vorfabrikation.“ *Archithese*, Nr. 2 (2003): 46–51.

## In-situ-Fabrikation

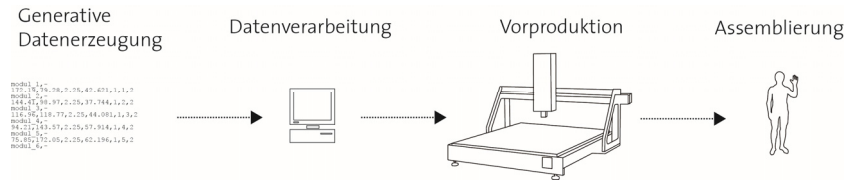


Abbildung 25: Beispiel einer digitalen Prozesskette

Abbildung 25 zeigt das Schema einer durchgängigen digitalen Prozesskette mit folgenden Stationen:

### *Generative Datenerzeugung*

Am Anfang der digitalen Prozesskette steht eine generative Datenerzeugung. Der regelbasierte Entwurf wird über vorher festgelegte Parameter gesteuert und lässt sich mit geringem Zeitaufwand in verschiedenen Varianten generieren, ohne dass ein manuelles Zeichnen erforderlich wäre.<sup>150</sup> Auch die dazugehörigen Produktionsdaten lassen sich in derselben assoziativen Weise erstellen. Bei jeder neuen Einstellung des Designs passen sich – allerdings nur, wenn dies im Rahmen der Programmierung vorgesehen ist – die Details dem neuen Erscheinungsbild und der zu bauenden Konstruktion automatisiert an. Für eine weitere Verarbeitung der Daten, beispielsweise für die zweidimensionale digitale Fabrikation, ist es erforderlich, dass sie maschinengerecht für eine Produktion auf einer Konstruktionsebene verteilt werden. Sind die Daten erzeugt und aufbereitet, ist der nächste wichtige Schritt der Informationsaustausch mit einer produzierenden konkreten Maschine.

### *Datenverarbeitung*

Die vektorbasierten zweidimensionalen Zeichnungen aus der generativen Datenerzeugung lassen sich nicht ohne Weiteres auf eine Maschine übertragen und fertigen. Zum einen müssen die Daten in ein maschinenlesbares Format, eine spezielle Programmiersprache, umgewandelt werden. Zum anderen spielen neben der reinen Konvertierung digitaler Informationen auch materielle Prozesse eine

<sup>150</sup> Fritz, Oliver. „Programmieren statt zeichnen? Vom Einfluss digitaler Technologie auf den architektonischen Entwurf.“ *Archithese*, Nr. 4 (2002): 14–19.

große Rolle. So müssen beispielsweise – abhängig von dem zu bearbeitenden Werkstoff – die Art des Werkzeuges, die Vorschubgeschwindigkeit der Achsen oder die Sicherheitspositionen – resultierend aus dem Aufbau der Anlage – in die Erstellung des Maschinencodes eingearbeitet werden. Für die Einbettung der Datenverarbeitung in die digitale Prozesskette gibt es mehrere Lösungswege.

#### Lösungsweg 1:

Die Ausführung und die Funktionsweise der Produktionsmaschine sind hinreichend bekannt. Somit könnten alle nötigen Informationen, die zur Ansteuerung der Maschine und Produktion des Bauteiles notwendig sind, schon im ersten Schritt, in der generativen Datenerzeugung, eingearbeitet werden; sie lassen sich ohne Umwege direkt aus einer CAD-Anwendung als Programmcode für die Fertigung exportieren. Jedoch ist dies eine rechtliche Grauzone, denn es stellt sich die Frage nach der Verantwortlichkeit für die Ausführungsplanung. Es besteht kaum die Möglichkeit der Kontrolle von sehr vielen unterschiedlich ausgeführten Elementen, die ohne einen Papierplan direkt digital fabriziert werden. Bei einer fehlerhaften Produktion oder einer Beschädigung der Maschine ist eine klare Abgrenzung der Haftung schwer möglich.

#### Lösungsweg 2:

Die automatisierte Durchgängigkeit der digitalen Prozesskette wird unterbrochen. Der Schritt zwischen Datengenerierung und Produktion erfolgt anhand einer manuellen Datenübergabe. Bei einer großen Anzahl ungleicher Bauteile hat dies einen erhöhten Zeitaufwand zur Folge, da jedes generierte Element als zweidimensionale CAD-Zeichnung einzeln eingelesen und für das jeweilige CAD/CAM-System neu aufbereitet werden muss. Der Vorteil liegt aber in der klaren Trennung von Produktionsdatengenerierung und Fertigung. Die Verantwortlichkeit einzelner Tätigkeitsbereiche lässt sich eindeutiger zuweisen, und die digitalen Daten einer automatisch generierten Planung werden explizit sichtbar gemacht.

## In-situ-Fabrikation

### Lösungsweg 3:

Der dritte Lösungsvorschlag zielt auf eine Mischung aus den beiden erstgenannten. Die zweidimensional generierten CAD-Ausführungspläne werden hinsichtlich der CAD/CAM-Software der Maschine genau angepasst und lassen sich folglich als optimiertes Format ohne Konvertierung in das jeweilige System einlesen. Die manuelle Übergabe der Daten ist aufgrund der rechtlichen Frage notwendig, die Nacharbeit einzelner Pläne wird dadurch aber nicht mehr erforderlich. Der Prozess des Einlesens selbst kann von der ausführenden Firma automatisiert werden. Diese Vorgehensweise entspricht einer Teilautomatisierung, bei der die Verantwortungsbereiche voneinander getrennt werden.

### *Vorproduktion*

Sind die zum Programmcode umgewandelten Ausführungsdaten auf der Steuerung der Maschine abgelegt, ist der dritte Schritt der digitalen Prozesskette erreicht. Gemeint ist die Produktion der parametergesteuerten Planung. Im Fall der herkömmlichen digitalen Prozesskette ist von stationären vorfabrizierenden Fabrikationsmaschinen auszugehen, die nicht im Austausch mit ihrer Umwelt stehen. In der Regel sind dies CNC-gesteuerte Maschinen.<sup>151</sup> Aber auch Industrieroboter, die unterschiedliche Fertigungsmethoden abdecken können, kommen mehr und mehr zum Einsatz.<sup>152</sup>

### *Assemblierung*

Im Fall einer konventionellen digitalen Prozesskette werden der Transport und das manuelle Assemblieren der produzierten Objekte notwendig. Hier kommen wiederum die Vorteile der In-situ-Fabrikation zum Tragen. Mehrkosten durch Logistik, ein aufwendiger Zusammenbau komplexer Einzelteile und Maßabweichungen aufgrund perfekt vorproduzierter Bauteile, die in einer toleranzbehafteten

---

<sup>151</sup> Kolarevic, Branko. „Digital Production.“ In *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, herausgegeben von Branko Kolarevic, 30–55. New York: Spon Press, 2003.

<sup>152</sup> Dunn, Nick. *Digital Fabrication in Architecture*. London: Laurence King Publishing Limited, 2012, S. 111.

Umgebung eingesetzt werden, können durch den Direkteinsatz der Maschinen auf der Baustelle verhindert werden.

In den folgenden zwei Beispielen werden verschiedene Anwendungsszenarien der konventionellen digitalen Prozesskette in unterschiedlichen Maßstäben aufgezeigt.

### 3.2 Individuelle Massenproduktion

Zur Veranschaulichung der Möglichkeiten einer Anwendung der digitalen Prozesskette bietet sich an erster Stelle ein Beispiel im Bereich der *Mass Customization*<sup>153</sup>, der individuellen Massenproduktion, an. Definiert wird die individuelle Massenproduktion wie folgt:

„Mass Customization bezeichnet die Produktion von Gütern und Leistungen, welche die unterschiedlichen Bedürfnisse jedes einzelnen Nachfragers dieser Produkte treffen, mit der Effizienz einer vergleichbaren Massen- bzw. Serienproduktion. Grundlage des Wertschöpfungsprozesses ist dabei ein Co-Design-Prozess zur Definition der individuellen Leistung in Interaktion zwischen Anbieter und Nutzer.“<sup>154</sup>

Viele Bereiche des täglichen Lebens, unter anderem die Bekleidungsindustrie, haben sich die individuelle Massenproduktion erfolgreich zunutze gemacht. Die Sportartikelhersteller Adidas und Nike bieten beispielsweise Internetkonfiguratoren an, mit deren Hilfe der Nutzer sich sein „individuelles“ Schuhmodell konfigurieren kann.<sup>155</sup> Dem Kunden sind aber klar vordefinierte Grenzen gesetzt, innerhalb derer er seine Einstellungen vornehmen kann. Im Fall der Turnschuhe liegt die Variation meist nur in der Farbauswahl einzelner Elemente wie Schuhsohle, Innenfutter, Schnürsenkel etc. Das eigentliche Design des Schuhs kann nicht beeinflusst werden. Deshalb ist in diesem Zusammenhang auch von einer „Scheinindividualität“ die Rede.

---

<sup>153</sup> „Der Ausdruck *Mass Customization* ist ein *Oxymoron*, das die an sich gegensätzlichen Begriffe ‚Mass Production‘ und ‚Customization‘ verbindet.“ Piller, Frank Thomas. *Mass Customization: Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2006. S. 154. Vgl. Kapitel 1. *Einleitung*.

<sup>154</sup> Ebd., S. 161.

<sup>155</sup> Adidas AG, <http://www.adidas.com/us/content/miadidas/> (abgerufen am 11.08.2014). Nike Inc., [http://www.nike.com/de/de\\_de/c/nikeid](http://www.nike.com/de/de_de/c/nikeid) (abgerufen am 11.08.2014).

## In-situ-Fabrikation

Das hier beispielhaft vorgestellte Projekt *Automatic Freeform Production*<sup>156</sup> entstand im Rahmen eines Nachdiplomstudiums an der ETH Zürich.<sup>157</sup> Ziel des Projektes war es, anhand eines selbst entworfenen und programmierten Internetkonfigurators (Abbildung 26) nachzuweisen, dass ein auf lediglich acht Parameter reduziertes Regalelement individuell gestaltet und fabriziert werden kann.

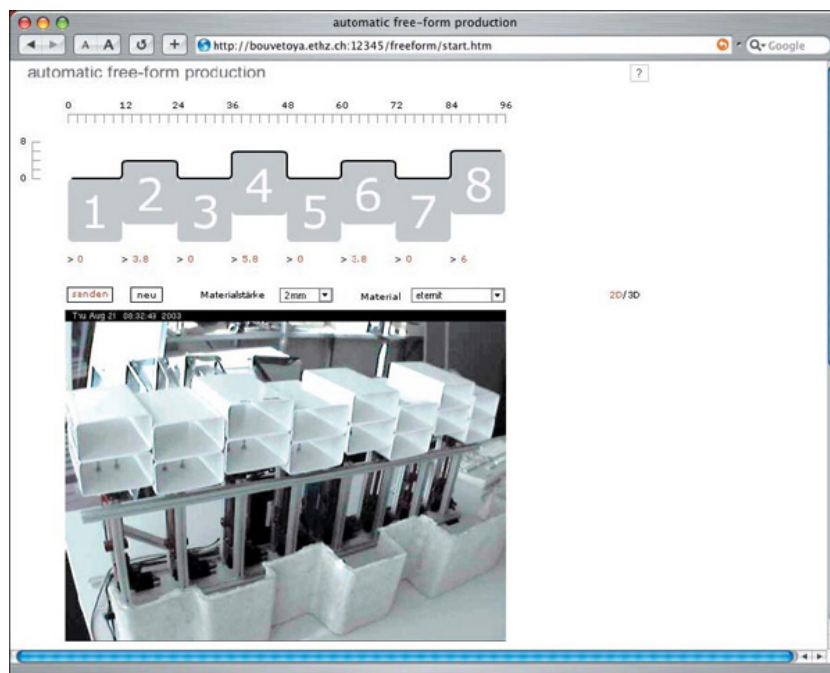


Abbildung 26: Internetkonfigurator mit angebundener Webcam

Die Anwendung dieser Plattform ist ortsunabhängig und eine Produktion zu jeder Tageszeit möglich. Acht formgebende Stößel, die von Schrittmotoren angetrieben werden, repräsentieren die vom Nutzer eingestellten Parameter und setzen diese in exakte Höhenpositionen um. In einer Vorschau ist eine computergenerierte zwei- oder wahlweise dreidimensionale Ansicht von den vorgenommenen Einstellungen zu sehen. Gefällt das konfigurierte Design, wird der Ansteuerungscode nach entsprechender Verifizierung ohne Umwege

<sup>156</sup> Nähere Informationen zu dem Projekt Automatic Freeform Production finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*.

<sup>157</sup> Professur für CAAD (Computer Aided Architectural Design) unter der Leitung von Professor Ludger Hovestadt; <http://www.caad.arch.ethz.ch/blog/> (abgerufen am 11.08.2014).

direkt zur produzierenden Maschine gesendet. Von diesem Zeitpunkt an hat der Nutzer die Möglichkeit, die Herstellung seines Produktes via Webcam in Echtzeit am Monitor zu verfolgen. Die auf den Stößeln aufgesetzten Kunststoffelemente bilden im Verbund die Schalung (Schalungstisch) für das Regalsystem. Vorgesehen ist, das Objekt aus dem Faserzement-Werkstoff Eternit, der sich im nicht ausgehärteten Zustand unkompliziert über den Schalungstisch auslegen lässt, auszuführen (Abbildung 27). Die oberen Kunststoffelemente des eingestellten Tisches können ausgewechselt werden, sodass die finale Form aushärten kann, ohne die Laufzeit der Maschine zu unterbrechen. Nach der vollständigen Aushärtung kann dem Kunden sein individuelles Produkt ausgeliefert werden.



*Abbildung 27a und b: Kundenspezifisches Regalelement aus Eternit im Trocknungszustand auf einem auswechselbaren Produktionstisch mit unterschiedlicher Parametereinstellung*

Aufgrund dieser Vorgehensweise ist der Kunde durchgängig in den Entstehungsprozess seiner Ware involviert – vom Entwurf bis zur Fertigung. Es ist diesem Beispiel allerdings anzumerken, dass es zwar die Funktionsweise einer automatisierten digitalen Prozesskette verdeutlicht, aber wegen der streng limitierten Auswahlparameter einer minderkomplexen Gestaltung das eigentliche generative Potenzial nicht ausschöpft. Für Massengüter, wie beispielsweise Schuhe oder – in Ausnahmefällen – Regalsysteme, lässt sich die *Mass Customization* jedoch erfolgreich anwenden, da die Unterschiede der einzelnen Ausführungen sich auf wenige strukturunabhängige Parameter beschränken und eindeutig vorhersehbar sind.

In einer großmaßstäblichen architektonischen Anwendung der digitalen Kette sind die Zusammenhänge weitaus komplexer. Nicht nur der



Maßstabssprung ist hierbei entscheidend: Gestalterische, kontext-bezogene oder baukonstruktive Faktoren spielen bei der Entstehung von Gebäuden eine große Rolle und machen diese zu Unikaten. Wird die digitale Kette mit in die Bauplanung einbezogen, besteht die Möglichkeit, Bauteile mit diesbezüglich vielschichtigen digitalen Informationen zu versehen und demgemäß umzusetzen. Das nächste Beispiel zeigt die Einbindung solcher Werkzeuge am großmaßstäblich gebauten Werk.

### **3.3 Verwendung parametrischer Werkzeuge in Großprojekten**

Die steigenden geometrischen und technischen Anforderungen heutiger Bauvorhaben erfordern innovative Herangehensweisen. Assoziative Datenmodelle und algorithmisch beschriebene Formen ermöglichen zwar die Darstellung und Konstruktion komplexer Entwürfe, eröffnen aber auch neue Fragen bezüglich des Umgangs mit parametrischen Werkzeugen und deren Abgleich mit der realen Bauwelt.

Der wesentliche Vorteil des computergestützten Arbeitens liegt in den nahezu unendlichen Möglichkeiten, verschiedene Bereiche – wie Funktionen, Materialverhalten und Konstruktionslogik – direkt miteinander zu vernetzen. Die daraus resultierenden digitalen Datenmodelle mit ihren mehrschichtigen Informationen können aber weitaus mehr leisten, als das reine zwei- oder dreidimensionale Abbild einer statischen Planungssituation zu produzieren. Besonders bei Bauaufgaben, aus denen sehr viele unterschiedliche Elemente hervorgehen, spielen neuartige generative Lösungsansätze eine große Rolle, da sich ab einem bestimmten Komplexitätsgrad manuell erstellte Zeichnungen nur schwer realisieren, analysieren und optimieren lassen. Die neuen digitalen Werkzeuge produzieren aufgrund der automatisierten Entwurfs- und Planerstellung aber auch nie dagewesene, teilweise undefinierte Schnittstellen. Wichtig ist deshalb, dass das gesamte Planungs- und Entwurfsteam in Bezug auf den Umgang mit dieser neuartigen Herangehensweise bei der Datengenerierung einbezogen wird.

Bei der Fassade des von dem Basler Architekturbüro Herzog & de Meuron entworfenen Neubaus der Messe Basel (Abbildung 28) wurden die genannten Methoden anhand einer digitalen Prozesskette in einem

großmaßstäblichen Bauprojekt eingesetzt.<sup>158</sup> In Anbetracht der besonderen geometrischen Ausformulierung des Baukörpers und der daraus resultierenden hohen Anzahl unterschiedlicher Bauelemente war ein frühzeitiges individuelles Parametrisieren der Fassadenelemente unerlässlich. Alle Verkleidungselemente einschließlich ihrer Unterkonstruktionen sind zu einem durchlaufenden verdrehten Wellenband verbunden und in Form und Detaillierung einzigartig.<sup>159</sup>



*Abbildung 28: Neubau der Messe Basel, Herzog & de Meuron Architekten Basel Ltd.*

---

<sup>158</sup> Das Projekt „Messe Basel – Neubau“, entworfen von Herzog & de Meuron Architekten Basel Ltd., wurde 2013 in Basel unter der Leitung von Jacques Herzog, Pierre de Meuron, Stefan Marbach und Wolfgang Hardt fertiggestellt. Die Parametrisierung der Fassade und die Erstellung der digitalen Werkzeuge, wie sie in diesem Kapitel vorgestellt werden, erfolgten im Rahmen der bürointernen Digital Technology Group von Volker Helm und Steffen Riegas. Das vollständige Projektteam kann unter folgender Internetadresse abgerufen werden: <http://www.herzogdemeuron.com/index/projects/complete-works/201-225/213-messe-basel-new-hall.html> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>159</sup> Für die Fassadenverkleidung wurden wellenförmige Module aus eloxiertem Aluminium entwickelt, die sowohl die verwundenen Außenfassaden als auch die zylindrische Haut des Lichthofes bekleiden.

### 3.3.1 Digitale Werkzeuge

Der Planungsprozess von Bauwerken unterliegt einer ständigen Revision von Entwurfs- und Konstruktionsparametern. Aufgabe bei dem Projekt der Messe war es, Werkzeuge zu entwickeln, die dem Planungsteam das eigenständige Produzieren von Varianten ermöglichten. Im Vorfeld musste daher sehr genau abgestimmt werden, welche Parameter über den gesamten Planungszeitraum wichtig wären und wie weit die Architekten in die Parametrisierung würden eingreifen können und dürfen. Mögliche Einstellparameter für die Messe Basel, die dem Design dynamisch angepasst werden konnten, waren unter anderem Wellenform sowie Öffnungsgrad und Dimensionierung. Neben dem Designprozess sollten diese Werkzeuge innerhalb einer Prozesskette aber auch weitere wichtige Funktionen erfüllen können. Daher wurden gesamthaft Werkzeuge für das Generative Entwerfen, für die Geometrie- und Toleranzoptimierung, die Analyse der Geometrie, das Erstellen von Produktionsdaten und die Qualitätskontrolle der produzierten Daten erstellt.

### 3.3.2 Datengenerierung

Großmaßstäbliche Projekte mit komplexen Anforderungen bringen oft große Herausforderungen an die Arbeitsmethoden von Architekten mit sich. Nicht selten werden auf der Suche nach kreativen Lösungen spezifische Aufgaben an externe Spezialisten delegiert. Bei der Messe Basel wurden Entwicklung und Anwendung der digitalen Werkzeuge als Teile des kreativen Prozesses gesehen und von Projektbeginn an über ein bürointernes Team eingebunden. Neben der eingehenden Analyse der geometrischen Rahmenbedingungen stellte sich zu Beginn die Frage nach Anzahl, Größe und Ausformulierung der Fassadenelemente. Als Hauptgestaltungsaufgabe erwies sich der Verlauf geöffneter Elemente vor den Fenstern und haustechnischen Anlagen. Dieses architektonisch wichtige Merkmal sollte unmittelbar von den Architekten erstellt und kontrolliert werden. Als erfolgreiches Mittel bewährte sich hierfür ein selbst geschriebenes Computerskript, das den Grad der Öffnung aus einem Graustufenbild auslas. Jedes Pixel entsprach einem Aluminiumelement (Abbildung 29 und Abbildung 30). Da die individuellen Muster digital über Bildbearbeitungsprogramme

„aufgesprüht“ werden konnten, war es dem Entwerfer sehr bald möglich, viele Varianten zu erzeugen. Nachdem mit dieser Designhilfe eine grobe Gestaltung der Fassade gefunden worden war, wurden präzisere numerische Methoden angewendet, um die Verlaufsform horizontal und vertikal exakt kontrollieren zu können.

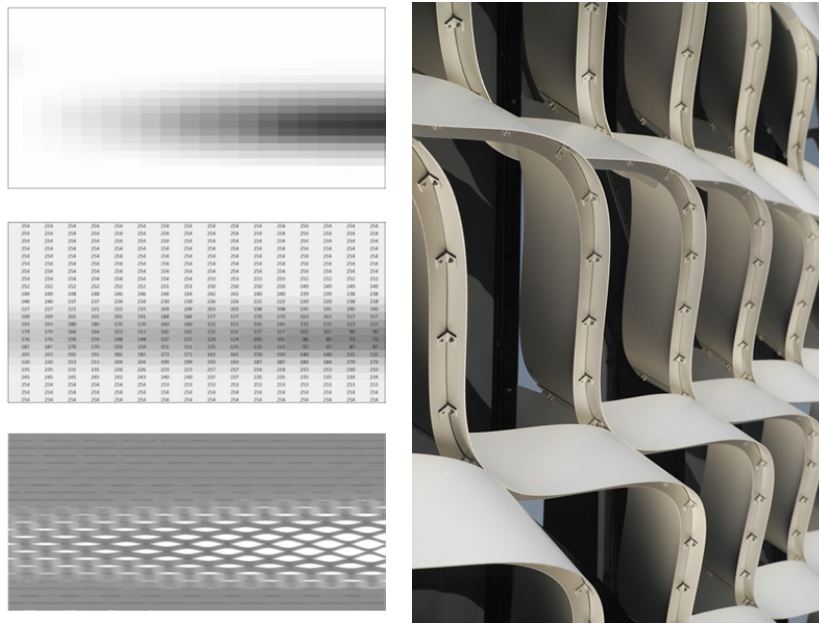


Abbildung 29: Verlaufsgenerierung der Fassadenöffnung durch ein Graustufenbild; Abbildung 30: Detailaufnahme einer Öffnung, die den dunklen Bereichen des Pixelbildes entspricht

Die weiterführende Detaillierung der Baugruppen<sup>160</sup> wurde in Zusammenarbeit mit der ausführenden Firma vorgenommen. Parallel dazu wurden Herzog & de Meuron Architekten beauftragt, die Parametrisierung einzuarbeiten und alle Konstruktionszeichnungen als zweidimensionale digitale Daten zu erzeugen (Abbildung 31). Aufgrund der direkten Zusammenarbeit mit den Produktionsfirmen konnten Materialeigenschaften und Einbautoleranzen, aber auch Fertigungsparameter wie Werkzeugspezifikationen direkt in die Programmierung implementiert werden.

<sup>160</sup> Eine Baugruppe setzt sich aus Haltekonsolen, Wellen und Aussteifungsprofilen zusammen.

## In-situ-Fabrikation

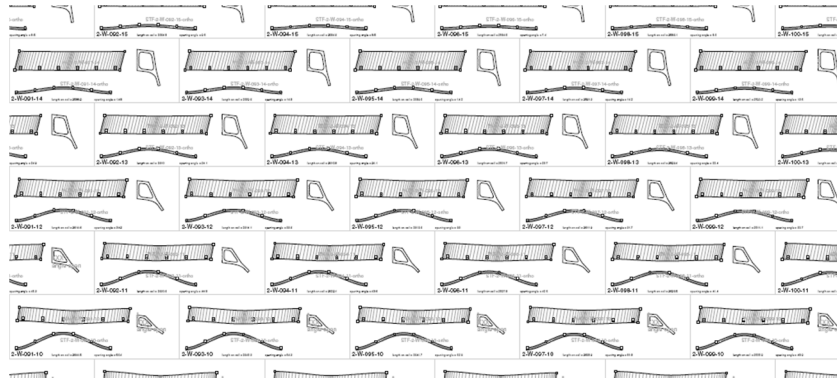
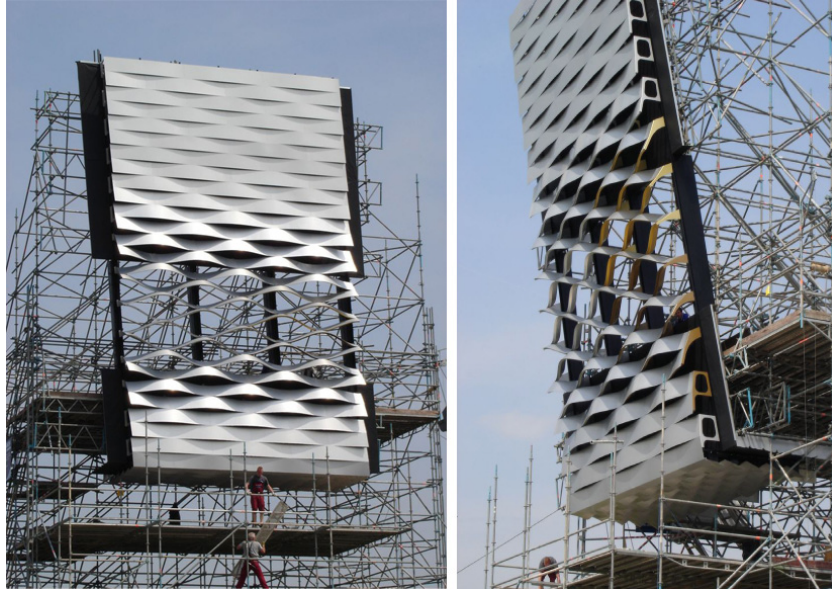


Abbildung 31: Ausschnitt der erzeugten zweidimensionalen Produktionsdaten

### 3.3.3 Umsetzung

Neue Entwicklungen im Bereich der digitalen Fabrikation haben die Grenzen zwischen physischen und digitalen Modellen immer weiter aufgehoben. Dabei dienen Modelle nicht nur zur Veranschaulichung und Kommunikation, sondern auch zur Erprobung von Materialeigenschaften wie Elastizität, Steifigkeit und Fügungen. Vor allem bei innovativen Konstruktionen ist es unerlässlich, schon sehr früh in ausreichend großen Maßstäben zu experimentieren und einen Lernprozess zu starten. Für das Projekt Messeneubau wurden konstruktionsgetreue Fassadenmodelle (Abbildung 32 und; Abbildung 33) sowie Lichthofmodelle im Maßstab 1 : 1 erstellt. An einem gewählten Ausschnitt der Fassade wurden nicht nur die Fertigung und die Montage seitens der ausführenden Firmen durchgespielt, auch konnten bereits die gesamte Funktionsweise der digitalen Prozesskette und die damit erzeugten Daten auf ihre Richtigkeit überprüft werden.



*Abbildung 32: Fassadenmodell im Maßstab 1 : 1 während der Montage auf Originalhöhe; Abbildung 33: Seitenansicht des Fassadenmodells. Die verschiedenartige Ausführung der Konsolen vor dem Fensterbereich wird sichtbar*

Das Projekt Neubau der Messe Basel wurde Anfang 2013 fertiggestellt. Alle benötigten Konstruktionszeichnungen für die verschiedenen Elemente der Fassaden und des Lichthofes wurden generativ erstellt, vorproduziert und anschließend verbaut (Abbildung 34). In allen Phasen der Fassadenplanung konnten die digitalen Werkzeuge den Bauprozess unterstützen. Die Werkzeuge gewannen im Laufe des Projekts an Komplexität und konnten kontinuierlich neu an die jeweiligen Anforderungen und Aufgaben angepasst werden.



## In-situ-Fabrikation



*Abbildung 34: Fassade des Neubaus der Messe Basel mit Blick vom Riehenring, Februar 2013*

Das Bauprojekt der Messe Basel demonstriert die Notwendigkeit maßgeschneiderter generativer Werkzeuge im Fall komplexer Entwürfe. Schnittstellen für Projektarchitekten, Planer und Produktionsfirmen sollten schon in einer frühen Phase konzeptioniert und entwickelt werden. Mit dem Bauvorhaben wird eine zukunftsorientierte Arbeitsweise vorgestellt, die auf die wachsenden Anforderungen in der Bauindustrie eingehen kann und die Lücke zwischen einer vielseitigen individuellen Planung und nicht standardisierten Bauabläufen schließt. Jedoch bringt die konventionelle digitale Kette angesichts vorfabrizierender Methoden auch Einschränkungen mit sich. Als Beispiele sind die aufwendige Logistik oder Maßabweichungen bei exakt hergestellten Bauteilen, die in eine toleranzbehaftete Umgebung assembliert werden, zu nennen. Hier setzt die Forschung dieser Arbeit an: in der roboterbasierten, additiven In-situ-Fertigung, die im nächsten Kapitel behandelt wird.

#### 4. In-situ-Fabrikation

Meist handelt es sich bei Industrierobotern um fest verankerte Systeme mit einem vordefinierten Arbeitsbereich, wodurch zugleich die maximale Größe der Bauteilelemente vorbestimmt ist. Der Roboterarm kann gemäß seiner kinematischen Reichweite hingegen jegliche Position im Raum erreichen.<sup>161</sup> Die grundlegende Forschung der In-situ-Fabrikation, als konsequente Weiterentwicklung bestehender stationärer Systeme, eröffnet hierbei ein völlig neuartiges Forschungsgebiet im Bereich der digitalen Fabrikation: Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht die additive Fertigung nicht standardisierter architektonischer Bauteile, die direkt auf einer Baustelle mittels mobiler Robotereinheiten hergestellt werden. Ziel ist es, zu erreichen, dass der Roboter seine eigene Lage und die Bauumgebung erkennt und die daraus gewonnenen Daten weiterverarbeitet. Dies bedeutet, dass das Robotersystem auf die gebaute Umwelt reagieren und sich selbstständig an verändernde Bedingungen anpassen muss. Entscheidend für die Umsetzung dieses Vorhabens ist die neuartige Kopplung zwischen einer roboterbasierten digitalen Fabrikation und kognitiven Eigenschaften durch die Verwendung präziser Sensorik. Innovative Lösungsansätze in den Bereichen Mensch-Maschine-Interaktion, Lokalisierung und Positionierung, dynamische Rückkopplungssysteme und Umgebungserkennung sind gefordert und werden in diesem Kapitel anhand von Experimenten und Fallbeispielen exemplarisch untersucht.

Diese Anforderungen werden bislang von keinem anderen digitalen Fabrikationssystem in der Architektur erfüllt, und auf der Grundlage dieser Forschung können nicht nur zahlreiche neue Anwendungsbereiche in der Baubranche entstehen,<sup>162</sup> vielmehr werden auch

---

<sup>161</sup> Bonwetsch, Tobias, Fabio Gramazio, und Matthias Kohler. „R-O-B: Towards a Bespoke Building Process.“ In *Manufacturing the Bespoke: Making and Prototyping Architecture (AD Reader)*, herausgegeben von Bob Sheil, 78–87. Chichester: John Wiley & Sons, 2012, S. 82.

<sup>162</sup> Helm, Volker, et al. „In-Situ Robotic Construction: Extending the Digital Fabrication Chain in Architecture.“ In *Synthetic Digital Ecologies: Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*. San Francisco 18.–21. Oktober 2012), 169–176. San Francisco, 2012.



Methoden von grundsätzlicher Bedeutung für dieses Forschungsgebiet in Aussicht gestellt.

### 4.1 Potenziale der In-situ-Fabrikation

Das Potenzial und die Reichweite dieser Untersuchungen unterscheiden sich substanziell von den Möglichkeiten der stationären Vorfabrikation. Die In-situ-Fabrikation ermöglicht dynamische Arbeitsprozesse auf einer Baustelle und die reaktive Herstellung von architektonischen, nicht standardisierten Strukturen gemäß der vorhandenen realen Bausituation, da eine mobile Fabrikationseinheit Bauteile direkt an der benötigten Position produzieren kann. Angenommen werden folgende wesentlichen Vorteile der In-situ-Fabrikation<sup>163</sup> gegenüber bestehenden Systemen:

#### a) Erweiterte Maßstäbe

Da stationäre Maschinen fest verankerte Systeme sind, deren Produktionsmaßstab durch die Größe der Maschine und ihrer Peripherie begrenzt ist, müssen Bauteile, die größer als der eigentliche Baubereich sind, nach der Herstellung manuell gefügt werden. Mobile Anlagen hingegen ermöglichen großmaßstäbliche Objekte, da der Bauprozess kontinuierlich stattfindet, ohne dass eine Segmentierung einzelner Bauelemente notwendig wird. Es ließe sich sagen, dass der Maßstab unendlich skalierbar ist.<sup>164</sup> Wichtig hierbei ist, dass bei jeder Neupositionierung der mobilen Einheit automatisiert Referenzpunkte zur erneuten Einmessung des Systems gefunden werden.

---

<sup>163</sup> Die Validierung der angenommenen Vorteile der In-situ-Fabrikation erfolgt in Kapitel 4.4 *Experimente II – In-situ-Fabrikation*.

<sup>164</sup> Die Idee der Bauteilproduktion in beliebigen Maßstäben ist nicht neu. Ähnlich den automatisierten Hochbaustellen in Japan (siehe Forschungsstand Kapitel 1.4.2 *Baustellenfabrik und Feldfabrikation*) schlug 1943 Ernst Neufert in seinem Buch *Bauordnungslehre* die nicht realisierte Hausbaumaschine zur Standardisierung im Bauwesen vor. Schmidt, Hartwig. „Häuser aus Beton – Der Beginn einer neuen Bauweise.“ In *Häuser aus Beton: Vom Stampfbeton zum Grosstafelbau*, herausgegeben von Uta Hassler und Hartwig Schmidt, 12–26. Tübingen/Berlin: Ernst Wasmuth, 2004, S. 21. Eine auf Schienen rollende Baustellenfabrik hätte eine fünfgeschossige Hauszeile bei jeder Witterung bauen können. Aufgrund dieser mobilen (wandernden) Produktionsstätte besteht die Möglichkeit, Gebäude in beliebiger Länge zu realisieren.

*b) Reaktives System*

Werden mobile Roboteranlagen ergänzend mit präziser Scantechnologie ausgestattet, besteht die Möglichkeit eines ständigen Austausches zwischen der Maschine, der gebauten Umwelt und dem Menschen. Neben der eigenen Positionsbestimmung durch die Maschine können angesichts solcher Rückkopplungsprozesse aber auch vorhandene Bausituationen digital aufgenommen werden. Dadurch ergeben sich erhebliche Mehrwerte: Zusätzlich zu der kontrollierten Assemblierung räumlich komplexer Strukturen einzelner Elemente fließen die aus einer ständig sich ändernden Umgebung neu gewonnenen Informationen direkt in die Logik und die Ausformulierung der Bauteile ein. Diese Datensammlung ermöglicht den Ausgleich von natürlich auftretenden Materialtoleranzen und eine dynamische Anpassung von Entwurfsparametern auf unerwartet veränderte Rahmenbedingungen. Der Verbund von digitalen Daten und Material wird dank eines mobilen reaktiven Systems um den wichtigen Faktor der Echtzeitinformation erweitert. Die herkömmliche Sollmaßplanung einzelner Bauteile ist nicht mehr erforderlich, da die Produktion direkt mit der vorhandenen Bausituation abgeglichen wird. Mögliche Maßdifferenzen wie zwischen aus der Vorproduktion stammenden, exakt hergestellten Bauteilen und einer ungenauen, toleranzbehafteten Umgebung bleiben aus.

Reaktive Systeme haben aber noch einen weiteren entscheidenden Vorteil hinsichtlich der Steuerung komplexer Fertigungsmaschinen. Aufgrund der Sensorik lässt sich nicht nur die Umgebung erfassen. Durch diese Technologie, eingesetzt als Kommunikationsmedium zwischen dem Menschen und der Maschine, werden komplexe maschinelle und datenverarbeitende Vorgänge durch menschliche Hilfestellungen vereinfacht und abgekürzt.<sup>165</sup>

---

<sup>165</sup> So ist es beispielsweise nicht notwendig, dass die mit Scantechnologie ausgestattete Anlage eine undefinierte Bausituation vollständig ohne Anhaltspunkt erkennen und beurteilen muss. Ein solcher Fall wäre sehr rechenaufwendig und würde föhlich viel Zeit in Anspruch nehmen. Mithilfe von Computer Vision oder Spracherkennung lassen sich Situationen durch Gestikulieren, Markieren oder Sprache gezielt eingrenzen und steuern, ohne dass direkt in die Programmierung des Roboters eingegriffen werden muss. Die mobile Robotereinheit wird daher in dieser Arbeit vorerst als halbautomatisiertes System vorgeschlagen.

## In-situ-Fabrikation

### *c) Multiples und offenes System*

Im Gegensatz zu herkömmlichen spezifischen Fertigungsmaschinen (zum Beispiel Fräs- oder Laserschneidmaschinen) besteht mittels der In-situ-Fabrikation die Möglichkeit, mit nur einer Maschine eine Vielzahl von verschiedenen Herstellungsszenarien zu erzeugen, da die Verwendung von Robotern in einem offenen System erfolgt und durch den Einsatz verschiedener Werkzeuge bestimmt wird.<sup>166</sup> Neben der additiven Assemblierung sind auch formative und subtraktive Bearbeitungsschritte möglich. Ebenso können unterschiedliche Aufgaben, beispielsweise die Bearbeitung, die räumliche Positionierung und die Fügung von Material, in ein und demselben Produktionsprozess kombiniert werden. Der Roboter als generische Maschine ermöglicht einen vielseitigen offenen Einsatz.<sup>167</sup> Aus diesem Grund ist die Anlage fähig, auf verschiedenste Anforderungen flexibel einzugehen.

### *d) Minimierung von Assemblierungsfehlern*

Bei einer Just-in-time-Produktion auf der Baustelle lassen sich potenzielle Fehlerquellen vermindern. Besonders bei einer manuellen Assemblierung vieler unterschiedlicher Teile besteht eine erhöhte Verwechslungsgefahr bei einzelnen Bauteilen, was folglich zu fehlerhafter Platzierung führen kann. Werden die Elemente direkt an Ort und Stelle digital produziert, ist das Markieren oder Nummerieren der vorfabrizierten Bauteile nicht mehr nötig. Orientierung, Reihenfolge und Positionsbestimmung werden eindeutig regelbasiert beschrieben und geradewegs an die Hardware zur Verarbeitung übergeben. Dies stellt einen entscheidenden Vorteil zur einfachen Feldfabrik dar.

### *e) Ökologische und wirtschaftliche Faktoren*

Neben konzeptionellen Vorzügen zeichnet sich bei den additiven Fabrikationsmethoden aber auch ein ökologischer und wirtschaftlicher

---

<sup>166</sup> Bonwetsch, Tobias, Fabio Gramazio, und Matthias Kohler. „R-O-B: Towards a Bespoke Building Process.“ In *Manufacturing the Bespoke: Making and Prototyping Architecture (AD Reader)*, herausgegeben von Bob Sheil, 78–87. Chichester: John Wiley & Sons, 2012, S. 78.

<sup>167</sup> Willmann, Jan, Fabio Gramazio, und Matthias Kohler. „Roboterbasiertes Bauen, Architektur und Digitale Fabrikation.“ *Deutsche Bauzeitschrift*, Vol. 60, Nr. 11 Parametrisches Bauen: Eine andere Art zu denken! (2012): 56–59.

Nutzen ab. Eine subtraktive Fertigung geht stets mit der Erzeugung von „Ausschussware“ einher. Hierbei kann es sich um übrig gebliebene Reststücke eines nicht voll ausgenutzten Rohmaterials oder die Überreste eines zerspanenden Vorganges handeln. Durch die additive Assemblierung von Material wird die nahezu vollständige Verwendung des Baustoffes gewährleistet.

Ein weiterer Vorteil ist, dass lange, aufwendige Transporte vorgefertigter Elemente durch die In-situ-Fabrikation vermieden werden. Eine spezielle Absicherung und Sondertransporte filigraner Bauteile entfallen. Die Beförderung des eigentlichen Baumaterials auf die Baustelle ist zwar nach wie vor unumgänglich, jedoch wird der Einsatz lokaler Materialien mit Blick auf den kürzesten Weg gefördert. Die nachfolgende Grafik (Abbildung 35) demonstriert die Hauptargumente, die die Vorteile einer In-situ-Fabrikation belegen. Hierzu werden subtraktive und additive Methoden in der Vorproduktion und die direkte Herstellung unter Verwendung einer mobilen Robotereinheit auf einer Baustelle miteinander verglichen.

## In-situ-Fabrikation

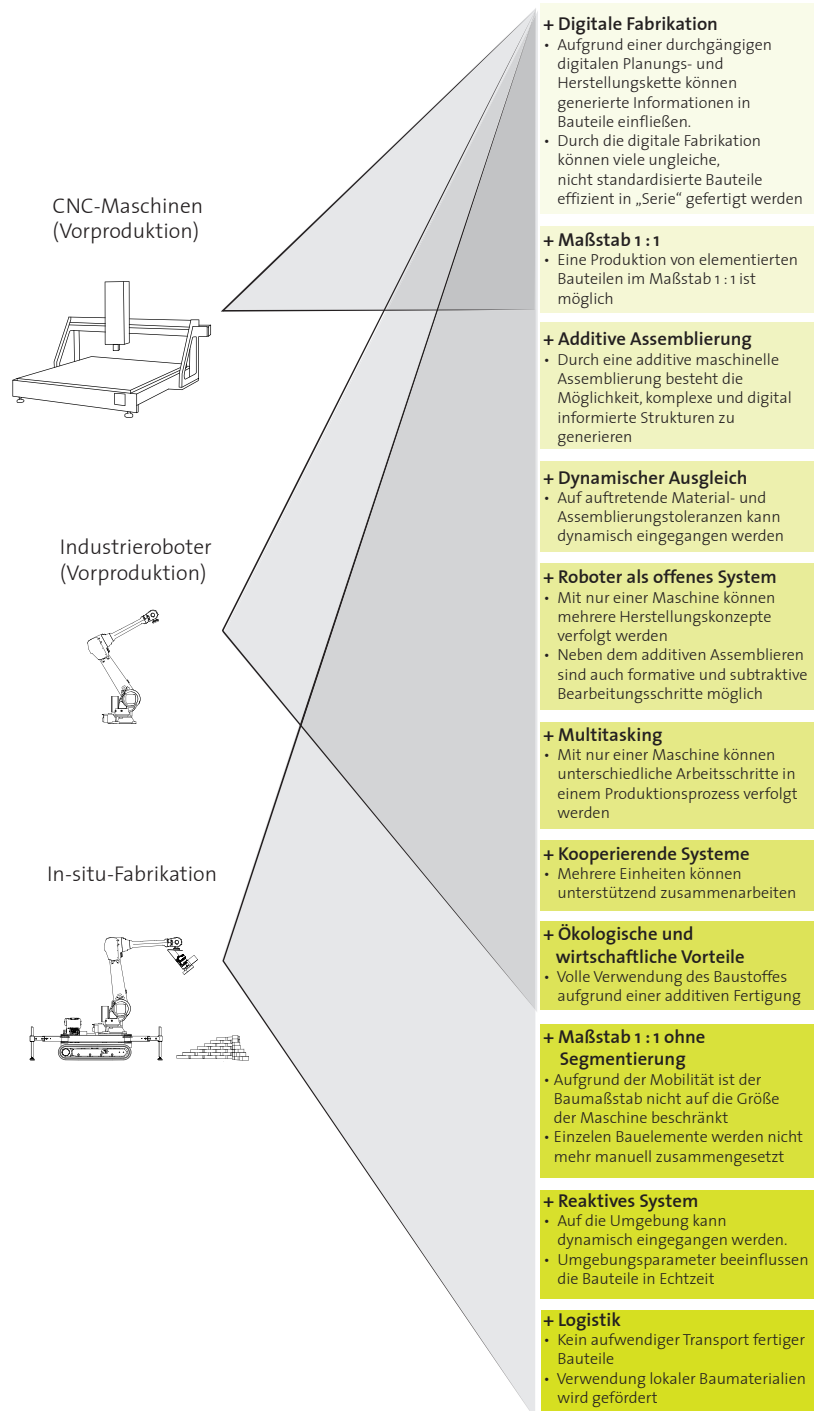


Abbildung 35: Die Vorteile der In-situ-Fabrikation im Vergleich zu bestehenden digitalen Fabrikationsmethoden

## 4.2 Forschungsinhalte

Die interdisziplinäre Forschung<sup>168</sup> auf dem Gebiet der In-situ-Fabrikation basiert maßgeblich auf drei Teilbereichen, die in dieser Arbeit zugleich die Inhalte der Experimente und Fallbeispiele repräsentieren: digitale Fabrikation von nicht standardisierten Konstruktionssystemen, der mobile Bauroboter und durch Sensorik erweiterte Rückkopplungs- und Lokalisierungstechniken. Die besondere Herausforderung bei den Experimenten ist es, diese drei Bereiche im Kontext der architektonischen Produktion von realmaßstäblichen Bauteilen zusammenzufassen.

### *Digitale Fabrikation von nicht standardisierten Konstruktionssystemen*

Grundsätzlich liegt allen Fallbeispielen und Experimenten eine generative algorithmische Beschreibung nicht standardisierter konstruktiver Systeme zugrunde. Das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit richtet sich auf die Tatsache, dass diese speziell entwickelten Systeme im Umfeld einer In-situ-Fabrikation betrachtet werden. Sie unterliegen folglich der direkten Anwendung in einer undefinierten Umgebung (außerhalb des Labors) und werden darüber hinaus in einem großmaßstäblichen Format umgesetzt (Abbildung 36).

Die Gegebenheiten der Umgebung (Ungenauigkeiten, Abweichung von Planungsmaßen) können als erweiterte Rahmenbedingungen betrachtet werden, da sie sich in Echtzeit erfassen lassen und direkt in die Bauteile einfließen.

---

<sup>168</sup> Für eine umfassende Forschung im Bereich der In-situ-Fabrikation ist der Einbezug mehrere Fachrichtungen notwendig, so der Architektur, der Informatik, der Robotik, der Ingenieur- und der Materialwissenschaften. Für die vorliegende Arbeit wurden verschiedenste Experten auf den jeweiligen Gebieten sowohl beratend als auch als Projektpartner hinzugezogen. Siehe Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*.

## In-situ-Fabrikation



*Abbildung 36: In situ fabrizierte Struktur aus 1 000 einzelnen Holzelementen in der Parkgarage der ETH Zürich*

### *Der Bauroboter*

Neben der Untersuchung nicht standardisierter Systeme liegen weitere Schwerpunkte auf der Entwicklung einer mobilen Roboterplattform und ihrer flexiblen Werkzeuge. Für den Gebrauch auf einer Baustelle wurde eine kompakte Einheit entwickelt, die vielseitig für verschiedenste Aufgaben eingesetzt werden kann (Abbildung 37). Die Anlage, konzipiert für eine frei bewegliche Positionierung im Raum, muss in ihren Abmessungen so beschaffen sein, dass sie eine Standardtüröffnung passieren kann. Des Weiteren ist die nahtlose Einbettung des Systems in die digitale Fabrikation eine unabdingbare Voraussetzung. Soft- und Hardwareschnittstellen müssen definiert werden und auf die Verarbeitung großer Datenmengen vorbereitet sein. Bei diesen Arbeiten überschneiden sich die Gewerke fächerübergreifend, was den gleichzeitigen Einbezug von Architekten, CAD-Spezialisten und Roboterintegratoren erforderlich macht.



Abbildung 37a und b: Der Experimentaufbau: ein Industrieroboter (ABB IRB 4600 – 255), montiert auf einem kompakten mobilen Unterbau

### *Rückkopplungs- und Lokalisierungstechniken*

Der dritte zu untersuchende Gegenstand betrifft den Einsatz von Baurobotern in einer undefinierten Umgebung, der einer intensiven Betrachtung unterzogen und weiterentwickelt werden soll. Das System muss dabei einige kognitive Anforderungen erfüllen. Beispielsweise ist es erforderlich, dass es die eigene Position, seine Umgebung, bereits gebaute Strukturen und unvorhersehbare Hindernisse erkennt und auswertet und die ständige Kommunikation zwischen Mensch und Maschine aufrechterhält. Durch die intensive Auseinandersetzung mit Scan- und Lokalisierungssystemen lassen sich aber effektive Methoden entwickeln, mit denen auf solche Situationen eingegangen werden kann.

Aufbauend auf den drei vorgestellten Forschungsschwerpunkten werden praxisnahe Lösungsansätze aufgezeigt. Die Untersuchungen wurden an der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation der ETH Zürich im Rahmen der Forschungsprojekte *Flexbrick*<sup>169</sup> und *ECHORD: dimRob*<sup>170</sup>, an denen der Autor dieser Dissertation maßgeblich beteiligt war, durchgeführt.<sup>171</sup>

---

<sup>169</sup> Weitere Informationen zu dem Projekt *Flexbrick* finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*.

<sup>170</sup> Weitere Informationen zu dem Projekt *ECHORD: dimRob* finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*.

<sup>171</sup> Der Autor war als Projektleiter von *Flexbrick* (ab 2010) und *ECHORD: dimRob* maßgeblich an Entwicklung, Koordination und der Umsetzung der Arbeiten im Rahmen einer wissenschaftlichen Assistenz an der Professur für Architektur und



Die in dem von der Schweizer Kommission für Technologie und Innovation<sup>172</sup> (KTI) geförderten Projekt *Flexbrick* verwendete mobile Feldfabrik diente unter Einbeziehung einer automatisierten Toleranzerkennung vorbereitend für die Produktion auf einer Baustelle. In der Forschungsarbeit *ECHORD: dimRob*, gefördert von der Europäischen Union durch das 7. Forschungsrahmenprogramm<sup>173</sup>, wurde die erste mobile, mit Sensorik ausgestattete kompakte Baurobotereinheit für den direkten Einsatz auf einer Baustelle entwickelt.

### 4.3 Experimente I – Vorstudien zur In-situ-Fabrikation

Die Fallbeispiele und Experimente I bilden die Grundlagen für die Entwicklung der In-situ-Fabrikation. Angesichts der Tatsache, dass eine kompakte, mobile Feldfabrik verwendet und die digitale Fabrikation mit computerbasierten Rückkopplungsprozessen<sup>174</sup> verknüpft wurde, lassen sich diese Untersuchungen sogar als Bindeglieder

---

Digitale Fabrikation in Zürich beteiligt. Das im Rahmen dieser Dissertation verwendete Material wurde sowohl von der Lehrstuhlleitung als auch von den jeweiligen Projektpartnern zur Einarbeitung freigegeben.

<sup>172</sup> Schweizer Kommission für Technologie und Innovation (KTI), <http://www.kti.admin.ch/> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>173</sup> European Commission – Research & Innovation – FP7, [http://ec.europa.eu/research/fp7/index\\_en.cfm](http://ec.europa.eu/research/fp7/index_en.cfm) (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>174</sup> Der Terminus „Rückkopplung“ ist dem häufig verwendeten englischen Ausdruck *Feedback* (oder Feedbackprozess) gleichzusetzen. Es gibt viele unterschiedliche Definitionen von Rückkopplung, da der Begriff in verschiedenen Bereichen wie beispielsweise Technik, Soziologie, Biologie oder Wirtschaft vorkommt. Das VDI-Lexikon *Informatik und Kommunikationstechnik* definiert Rückkopplung folgendermaßen: „Das Prinzip der R. besteht in der Möglichkeit, die Ergebnisse der Verarbeitung von eingegebenen Daten unter einer bestimmten Bewertung in die Eingabe von neuen Daten einzubeziehen. Auf diese Weise können selbstregelnde oder flexible Systeme entwickelt werden. Dieses Prinzip läßt sich in vielen Bereichen der Ingenieur- und Naturwissenschaften anwenden.“ Broy, Manfred, und Otto Spaniol, Hg. *VDI Lexikon: Informatik und Kommunikationstechnik*. 2., erw. und Neubearb. Aufl., Berlin/Heidelberg: Springer, 1999, S. 628. Eine weitere zutreffende Definition findet sich im Gabler *Wirtschaftslexikon*: „Verfahren der Selbststeuerung in bzw. durch den Aufbau von Regelkreisen. Der Zustand des Systems wird überprüft (Istgröße) und bei Abweichungen von einer Sollgröße wird gegengesteuert.“ Springer Gabler Verlag, Hg. *Gabler Wirtschaftslexikon*, Stichwort: Rückkopplung; <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/14123/rueckkopplung-v7.html> (abgerufen am 11.08.2014). Wird der Begriff Rückkopplung respektive Feedback im Zusammenhang mit dem Projekt *Flexbrick* verwendet, ist darunter eine Kombination aus den beiden zitierten Definitionen zu verstehen: ein selbstregelndes System, das das Istmaß eines Zustandes überprüft und bei Abweichungen von einer Sollgröße gegensteuert.

zwischen einer roboterbasierten additiven Vorfertigung und der direkten Produktion auf einer Baustelle bezeichnen.

Die Durchführung des Fallbeispiels *Flexbrick* erfolgte durch die Professur für Architektur und Digitale Fabrikation zusammen mit einem Industriepartner.<sup>175</sup> Der übergeordnete Schwerpunkt dieses Forschungsvorhabens war die Kombination von computerbasierten generativen Gestaltungsmethoden mit der automatisierten Herstellung eines qualitativ hochwertigen, digital informierten und funktionalen Fassadensystems aus Ziegelsteinen. Der Anstoß für das *Flexbrick*-Projekt und seine Begründung war unter anderem, dass Gebäude meist als Unikate entworfen werden und deren Bauteile daher häufig als ungleiche Einzelteile zu betrachten sind.<sup>176</sup> Durch den Einsatz von Computertechnologie und Robotik lässt sich aber flexibel auf individuelle Bauteile und deren Anforderungen reagieren und somit der Vorstellung, Einzelanfertigungen seien kostspielig, entgegenwirken. Über den Verbund der Planungswerkzeuge mit einer feedbackbasierten Fabrikation konnte besonders in diesem Projekt aufgezeigt werden, dass solche Prozesse – unter Einbezug der Materialeigenschaften – die konstruktiven Möglichkeiten extrem erweitern.

In Anbetracht der unterschiedlichen Anforderungen, die im Rahmen des Forschungsprojektes an das *Flexbrick*-System gestellt wurden, erfolgte die Bearbeitung der Bereiche Materialparameter, Datengenerierung, Fabrikationsprozess und Produktumsetzung, um ein systematisches Vorgehen zu ermöglichen. Sowohl die Leistungsfähigkeit als auch die resultierenden Gestaltungsmöglichkeiten, die während einer digitalen Produktion auftreten können, ließen sich anhand mehrerer maßstabsgetreuer Prototypen untersuchen und weiterentwickeln.<sup>177</sup>

---

<sup>175</sup> Keller Systeme AG, <http://www.keller-systeme.ch/> (abgerufen am 11.08.2014); ROBmade by Keller AG Ziegeleien, <http://www.robmade.com/> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>176</sup> Hierin sind wahrscheinlich auch der geringe Automatisierungsgrad und die seltene Anwendung von digital gesteuerten Maschinen im Baugewerbe – im Gegensatz zu anderen Industriezweigen – begründet.

<sup>177</sup> Im Projekt *Flexbrick* wurden insgesamt fünf aufeinander aufbauende Prototypen erarbeitet. Zur Verdeutlichung der Einflüsse von Feedbackprozessen, die die Vorstufen einer In-situ-Fabrikation bilden, werden im Folgenden die maßgeblichen Prototypen zwei bis fünf erläutert.

### 4.3.1 Experimentaufbau

Als Grundlage für die Ausführung der Experimente und Fallbeispiele I im Forschungsprojekt *Flexbrick* diente ein Industrieroboter<sup>178</sup>, der in einem speziell ausgerüsteten Frachtcontainer auf einer zusätzlichen Lineareinheit installiert wurde – bezeichnet als mobile Roboteranlage *R-O-B Unit*<sup>179</sup> (Abbildung 38).



Abbildung 38: Vorfabrikation von Mauerwerkselementen im Projekt *Flexbrick* unter Verwendung eines Industrieroboters, der aus einem modifizierten Frachtcontainer heraus produziert

Durch diese Zusammenführung eröffnete sich die Möglichkeit, eine digitale Produktionsmaschine als transportable Feldfabrik vor Ort zu nutzen.<sup>180</sup> Der Einsatzbereich dieses Prototyps ist nicht auf festgelegte Gebiete beschränkt, da sich die Einheit im zusammengefalteten Zustand weltweit befördern lässt (Abbildung 39). Dies bedeutet, dass

<sup>178</sup> Der Industrieroboter KR 150 L110-2, hergestellt von der Firma Kuka, ist ein sechsachsiger Roboterarm mit einer Traglast von 110 kg und einer Reichweite von 3100 mm.

<sup>179</sup> Die mobile Fabrikationseinheit *R-O-B Unit* wurde von der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit der Keller AG Ziegeleien in Pfungen und der Bachmann Engineering AG Zofingen (Integration) entwickelt. Weitere Informationen zu diesem Projekt finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*.

<sup>180</sup> Vgl. Kapitel 1.4.2 *Baustellenfabrik und Feldfabrikation*.

die Anlage sowohl vorfabrizierend in einer Werkhalle als auch – zur Vermeidung langer Transportwege von Bauelementen – zur Just-in-time-Produktion an einer Baustelle eingesetzt werden kann. Besonders innovativ sind Konzeption und Ausstattung des Innenbereichs des Containers. Alle zusätzlichen Komponenten, wie die Steuerung, eine externe Linearachse, eine Klebeanlage für die Lagerfuge der Steine oder Schienen für die Materialzufuhr, müssen auf engstem Raum untereinander funktionieren und zugleich Spielraum für die komplexen Bewegungen des Roboters zulassen.



Abbildung 39: Die mobile Produktionseinheit R-O-B lässt sich wie ein Standardfrachtcontainer transportieren

Schon vor Beginn der Forschungsarbeit *Flexbrick* wurde der R-O-B-Container erfolgreich als Feldfabrik außerhalb der Schweiz bei den Projekten *Structural Oscillations*<sup>181</sup> (Venedig, 2008) und *Pike Loop*<sup>182</sup> (New York, 2009) eingesetzt. Bei dem *Pike-Loop*-Projekt in New York, einer 22 m langen Installation aus Backstein, konnte ein weiteres Vorteil von mobilen Anlagen verdeutlicht werden: Dadurch, dass der

---

<sup>181</sup> Das Projekt *Structural Oscillations* wurde von der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich, entwickelt. Weitere Informationen zu diesem Projekt finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*.

<sup>182</sup> Das Projekt *Pike Loop* wurde von der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich, entwickelt. Weitere Informationen zu diesem Projekt finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*.

## In-situ-Fabrikation

Container versetzt werden kann, ist ein nahezu unbeschränkter architektonischer Maßstab ohne Segmentierung einzelner Bauteile möglich (Abbildung 40). Diese Voraussetzungen weisen bereits deutlich in die Richtung einer In-situ-Fabrikation, jedoch fehlte bei diesem Projekt die Möglichkeit eines direkten digitalen Informationsaustausches mit der gebauten Struktur und der Umgebung. Dies äußerte sich unter anderem darin, dass ein automatisiertes Einmessen nach einem Versatz der Einheit nicht möglich war. Die eigene Position der Maschine zur Position der gebauten Struktur musste nach jeder Verschiebung erneut manuell erfasst werden. Auch auf die natürlich auftretenden Materialtoleranzen konnte das System nicht dynamisch reagieren.



*Abbildung 40: Pike Loop, Manhattan, New York, 2009, Installation im öffentlichen Raum*

### 4.3.2 Materialparameter

Das grundlegende konstruktive Element in der Herstellung des *Flexbrick*-Fassadensystems ist der Ziegelstein<sup>183</sup>. Er ist ein hochwertiges Naturprodukt, das sich durch eine Vielzahl positiver

---

<sup>183</sup> Unter einem Ziegel- oder Backstein ist ein gebrannter Baustein aus Ton zu verstehen.

Eigenschaften gestalterischer, ökologischer, wirtschaftlicher und bauphysikalischer Art auszeichnet.

Für die in dieser Forschungsarbeit angewandten roboterbasierten additiven Methoden eignen sich Ziegel in besonderer Weise, da das mehrheitlich genormte Material als in sich abgeschlossener Größenparameter in die aufbauenden Prozesse integriert wird. Ohne das Erfordernis einer nachträglichen subtraktiven Veränderung des Ziegels, wie beispielsweise durch Schneiden, wird gewährleistet, dass die dem ursprünglichen Werkstoff entsprechende Produktionsmenge vollständig weiterverarbeitet wird. Des Weiteren erhöht die Verarbeitung von Ziegeln in einem digital gesteuerten Assemblierungsprozess die architektonischen Gestaltungsspielräume. Variierende, exakt bestimmte Verdrehungen und Positionierungen, die manuell nur sehr schwer herbeizuführen wären, können ohne erhöhten Planungsaufwand direkt an die Maschinen übergeben werden.

Die herkömmliche Verbindung zwischen Steinen ist im Regelfall ein Mörtelbett. Für die *Flexbrick*-Fassadenelemente wurde der Mörtel durch einen speziellen Zweikomponentenkleber ausgetauscht. Die Vorteile eines Klebprozesses liegen zum einen in der sauberen Verarbeitung und zum anderen – und das ist der forschungsrelevante Aspekt – in der erhöhten strukturellen Stabilität. Durch die ausgehärtete Klebeverbindung ist eine Wand in der Lage, Zugkräfte aufzunehmen. Eine Mörtelverbindung vermag dies nicht zu leisten, vielmehr stellen die Fugen Sollbruchstellen dar, die im Fall einer Zerstörung besonders anfällig sind. Die durch den Kleber neu erlangten Leistungsmerkmale führen dazu, dass auf die übliche Vorspannung und Transportbewehrung vorfabrizierter Elemente im Mauerwerksbau weitgehend verzichtet werden kann. Auch lassen sich wegen des steifen Steinverbundes freitragende Überhänge ohne Zusatzelemente wie Stürze konstruieren. Für eine maschinelle Fertigung ist dies von großem Nutzen, da eine durchgehende Produktion gewährleistet ist, ohne dass ein Wechsel von Baumaterialien erforderlich wäre. Zentral ist anzumerken, dass der Klebverbund auch Nachteile mit sich bringt: Ziegel sind aufgrund von Materialungenauigkeiten herstellungsbedingt mit Maßabweichungen behaftet. Zudem entfällt die durch den herkömmlichen Mörtelauftrag entstehende ausgleichende Schicht. Im Übrigen können sich bei einem verklebten Verbund die Toleranzen

## In-situ-Fabrikation

aufsummieren, was zu einer erheblichen Abweichung vom Sollmaß führt.

Da das Aufbringen des Klebers in einer sehr dünnen und mittels einer flächenkontaktstützenden Schichtung erfolgt, entfallen die sonst üblichen Stoß- und Lagerfugen im Zementmörtel. Herkömmliche Ziegelsteine sind für den mörtellosen Klebeverbund nicht besonders geeignet, da geometrische Verformungen des Steins wegen der fehlenden füllenden Zwischenschicht leicht zu erkennen sind. Aus diesem Grund wurde der *Flexbrick*-Stein in einer prototypischen Kleinserie entwickelt und hergestellt (Abbildung 41). Die Produktion erfolgte, im Gegensatz zu der normalen Vorgehensweise, in Längsrichtung. Die fehlenden Lagerfugen können dadurch beidseitig mit Schattenfugen, die direkt in die noch feuchte Steinmasse einzuarbeiten sind, versehen werden. Auf diese Weise wird trotz Klebeprozesses eine gleichbleibend hohe optische Qualität gewährleistet (Abbildung 42).

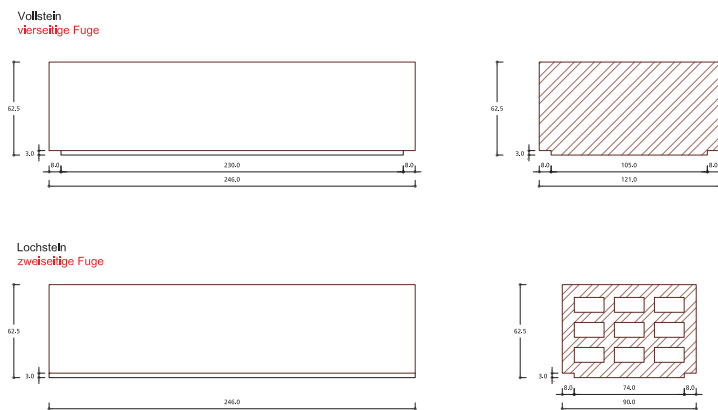
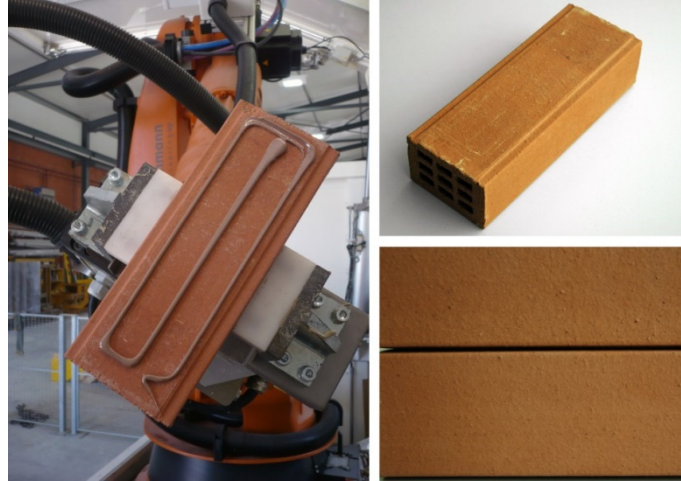


Abbildung 41: Konstruktionszeichnung für zwei Varianten des Flexbrick-Steins; oben: Vollstein und Schattenfugen an beiden Längs- und Kopfseiten; unten: Langlochstein und Schattenfugen nur an den Längsseiten





*Abbildung 42a und b: a) Automatisierter Auftrag des Klebers; b) Flexbrick-Stein mit eingearbeiteter Längsfuge (oben); b) gleichbleibende Schattenfuge nach dem Assemblierungsprozess der Flexbrick-Steine (unten)*

Anhand dieser Sonderproduktion sollte erprobt werden, ob sich der Verarbeitungsprozess und das optische wie geometrische Verhalten durch eine speziell produzierte Steinserie verbessern lassen würden. Für zukünftige Anwendungen wäre jedoch der Einsatz von Standardprodukten für einen offenen und variierenden Prozess wünschenswert. Die folgenden ersten Wandprototypen, die zeitgleich mit der Kleinserienentwicklung des *Flexbrick*-Steins umgesetzt worden sind, wurden daher nur mit auf dem Markt existierenden Standardprodukten produziert.

### **4.3.3 Datengenerierung**

Industrielle roboterbasierte Anwendungen, wie sie in der Automobilindustrie stattfinden, arbeiten meist mit gleichbleibenden Programmparametern. Die Fahrbewegungen, die beispielsweise für das Lackieren einer Tür notwendig sind, werden dem Roboter einmal übermittelt und bleiben dann über einen längeren Zeitraum unverändert. Die Programmierung solcher Prozesse kann sowohl offline als auch online erfolgen.<sup>184</sup> Oftmals werden beide Vorgehens-

---

<sup>184</sup> Bei der Programmierung von Industrierobotern wird zwischen Online-Programmierung (Beispiele: Teach-in-Verfahren, Playback-Verfahren) und Offline-Programmierung (Beispiele: Programmierung anhand von Programmiersprachen, Programmierung über CAD-Anwendungen) unterschieden. Eine allgemeine



## In-situ-Fabrikation

weisen miteinander kombiniert. Die Besonderheit bei dem *Flexbrick*-Projekt ist die Verarbeitung einer hohen Anzahl diskreter Bausteine mit dem Ziel, nicht standardisierte Bauelemente zu produzieren, die in einer CAD-Anwendung über ein Computerskript generiert wurden. Die einmalige Eingabe eines statischen Programmcodes oder das „Teachen“ mehrerer Zwischenpunkte würde hierbei nicht genügen, da die Ausformulierung der assemblierten Bauteile sich ständig ändert und auf verschiedenste Situationen eingehen soll. Für die Herstellung vieler unterschiedlich generierter Bauteile müssen daher sowohl für die Planung als auch zur Ansteuerung der Roboter automatisierte *dynamische* Programmierstrategien gefunden werden. Innerhalb definierter Parameter soll es dem Anwender möglich sein, Einstellungen vorzunehmen, die eine direkte Auswirkung auf das Bauteil und dessen Produktion haben. Neben der parametrischen Gestaltung ist die Schnittstelle zwischen den verschiedenen Anwendungen ein weiterer wichtiger Aspekt. Eine CAD-Software für Architektur bietet in der Regel keine direkte Schnittstelle zu Robotern. Für den schnellen Austausch oft wechselnder Entwurfparameter zwischen Software und Maschine müssen unkomplizierte Kommunikationswege gefunden werden.

Im Verlauf des Projektes wurden zu diesem Zweck verschiedene Testläufe zur Datengenerierung an unterschiedlichen Prototypen durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, robuste durchgängige Lösungen für Designstudien, den Datenaustausch und die Roboteransteuerung zu evaluieren. Für *Flexbrick* wurde daher im ersten

---

Beschreibung gibt das Taschenbuch der Fertigungstechnik: „Programmieren heißt, ein Programm für die Aufgabe des Industrieroboters (Anwenderprogramm) zu erstellen. Das Programm ist die Aufeinanderfolge der benötigten Informationen zur Steuerung des Industrieroboters sowie seiner Peripherie. Es beinhaltet im Allgemeinen: Bewegungsanweisungen, Ablaufanweisungen, Kontroll- und Überwachungsanweisungen, Kommunikationsanweisungen. Die erforderlichen Instruktionen werden in Form von Elementaranweisungen, auch Befehl genannt, vorgegeben und hängen von der Programmiersprache der Industrierobotersteuerung ab. Bei der Programmierung wird nach dem Ort unterschieden: Online-Programmierung (direkte Programmierung), Offline-Programmierung (indirekte Programmierung). Die Online-Programmierung erfolgt direkt am Einsatzort des Industrieroboters. Dies hat den Nachteil, dass die Industrieroboterstation während der Programmierung nicht für die Produktion einsetzbar ist. Die Offline-Programmierung findet getrennt vom Industrieroboter an einem Programmiersystem, häufig auf einem Personal Computer, statt.“ Witt, Gerd, Hg. *Taschenbuch der Fertigungstechnik*. München/Wien: Carl Hanser, 2006, S. 352.

Schritt, angesichts der frühen Forschungsphase, von einer fertig abgeschlossenen Softwarelösung abgesehen, da die digitalen und konstruktiven Prozesse einer ständigen Modifizierung unterworfen waren. Es wurde aber für die 3-D-Modellierungssoftware Rhinoceros (Robert McNeel & Associates)<sup>185</sup> ein flexibles Gestaltungs- und Datengenerierungsmodul programmiert, das es ermöglicht, algorithmisch beschriebene Mauerwerksverbände automatisiert zu erstellen, zu analysieren und für eine Roboterproduktion ohne Nacharbeit zu exportieren. Die für das Design und den Export aus dem CAD-System verwendeten Skripte ließen sich in Visual Basic Script (VBS) für Rhinoceros umsetzen.<sup>186</sup> Über ein Graustufen-Pixelbild, das der Entwerfer über entsprechende Werkzeuge in einem geläufigen Bildverarbeitungsprogramm erstellt, werden die Rotationen der Steine gesteuert und überprüft.<sup>187</sup> Minimal- und Maximalverdrehungen stellt das Programm mit einem Farbindex in der Anwendung dar (Abbildung 43). Das dreidimensional generierte Modell beinhaltet alle nötigen Positionsinformationen, die für einen Datenexport nötig sind.<sup>188</sup> Der Export wird im Format einer Textdatei auf einem Server gespeichert

---

<sup>185</sup> Robert McNeel & Associates – Rhinoceros, <http://www.rhino3d.com/> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>186</sup> Ein Skript wird laut dem *Lexikon der Informatik* folgendermaßen definiert: „1. tendenziell kleines, makroähnliches oder interpretiertes Programm, das in einer betriebssystem- oder applikationsspezifischen Programmiersprache geschrieben wurde und in der Regel nur innerhalb dieser Umgebung läuft; 2. Aufzeichnung von Anweisungssequenzen, z. B. ein SQL-S.“ Fischer, Peter, und Peter Hofer. *Lexikon der Informatik*. 15. überarbeitete Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer, 2011, S. 826.

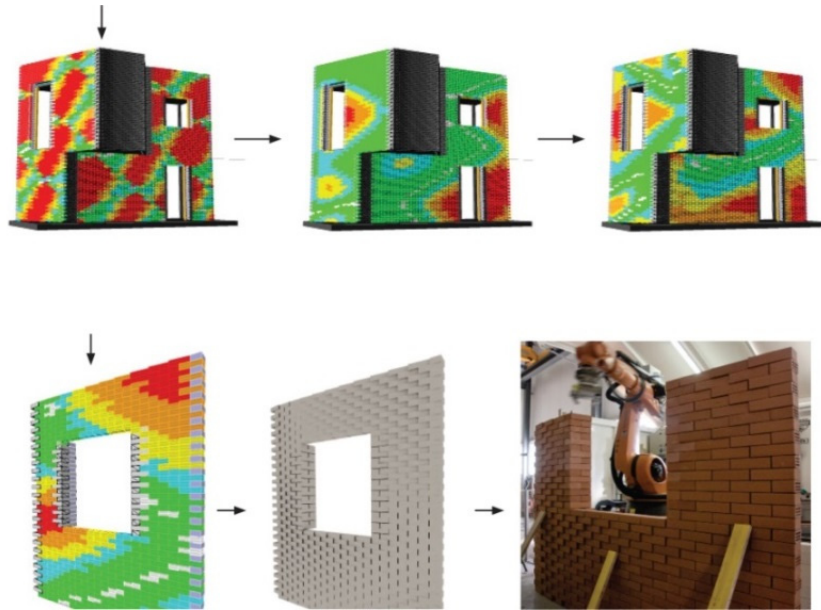
Für die CAD-Software Rhinoceros 3D (Robert McNeel & Associates) werden Skripte (Beispiel: Rhino Script oder Python) für die schnelle Realisierung kleinerer Anwendungen eingesetzt.

<sup>187</sup> Jedes einzelne Pixel in dem digitalen Bild repräsentiert einen Stein. In einem 8-Bit-Graustufenbild ergibt sich dadurch ein Bereich von 256 Abstufungen pro Pixel (0 = Schwarz und 256 = Weiß). Beispiel: Wird der Bereich der Verdrehung auf –30 bis +30 Grad festgelegt, spiegelt ein schwarzes Pixel eine Rotation von –30 Grad und ein weißes Pixel eine Rotation von +30 Grad wider. Mit diesem Verfahren lassen sich Zu- oder Abnahme (Richtung) der Rotation über eine bestimmte Strecke (Anzahl der Bits) beschreiben.

<sup>188</sup> Die aus dem generierten Modell relevanten Produktionsdaten werden als Datensatz in einem eindimensionalen Array (Tupel) geschrieben. Für ein *Flexbrick*-Steinelement wurden folgende Listeninhalte gewählt: 1) = Name und Reihenfolge; 2) = x-Koordinatenwert; 3) = y-Koordinatenwert; 4) = z-Koordinatenwert; 5) = Steinrotation; 6) = Steinformat (Auswahl aus vier Formattypen); 7) = Steinunterseite kleben/nicht kleben (boolesche Variable – 0 = wahr und 1 = falsch); 8) = Sichtseite drehen/nicht drehen (boolesche Variable – 0 = wahr und 1 = falsch). Exportbeispiel eines Steindatensatzes mit acht Attributen: brick\_13, 1060.5, 91.75, 31.25, -4.6, 4, 0, 0.

## In-situ-Fabrikation

(Abbildung 44). In einem weiteren Schritt werden diese für die Produktion erforderlichen Datenpakete roboterkonform und ohne Umwege in die Robotersteuerung eingelesen.



*Abbildung 43: Die digitale Datengenerierung ermöglicht eine durchgängige generative Gestaltung, Analyse und roboterbasierte Produktion*

```

export - Notepad
File Edit Format View Help
#####
:Script written      : Volker Helm
:Script name        : TXT Export
:Script copyrighted : ETHZ
:Script version     : v.3
:Saving Date / Time : 18.10.2010 / 13.29.9
:Script description : export.txt is produced from a rhino 3d file
#####

:Format description :
:(1)= Formatindex / (2)= Beschreibung / (3)= L / (4)= B / (5)= H / (6)= Track / (7)= Full_Measure
#####

START formats
1,Lochstein,240,115,55,1,1
2,Vollstein,246,121,62,6,2,1
3,Vollstein/2,121,90,62,6,3,1
4,Vollstein,246,90,62,6,1,1
END formats

:Index description :
:(1)= Name / (2)= X / (3)= Y / (4)= Z / (5)= Alpha / (6)=Format_typ / (7)= support(bool) / (8) = no_turn(bool)
#####

START bricks
brick_1,2647,52,754,89,1952,5,0,1,0,0
brick_2,2769,02,754,89,1897,5,0,1,0,0
brick_3,2647,52,754,89,1842,5,0,1,0,0
brick_4,2769,02,754,89,1787,5,0,1,0,0
brick_5,2647,52,754,89,1732,5,0,1,0,0
brick_6,2769,02,754,89,1677,5,0,1,0,0
brick_7,2647,52,754,89,1622,5,0,1,0,0
brick_8,2769,02,754,89,1567,5,0,1,0,0
brick_9,2647,52,754,89,1512,5,0,1,0,0
brick_10,2769,02,754,89,1457,5,0,1,0,0
brick_11,2647,52,754,89,1402,5,0,1,0,0
brick_12,2769,02,754,89,1347,5,0,1,0,0
brick_13,2647,52,754,89,1292,5,0,1,0,0
brick_14,2769,02,754,89,1237,5,0,1,0,0
brick_15,2647,52,754,89,1182,5,0,1,0,0
brick_16,2769,02,754,89,1127,5,0,1,0,0
brick_17,2647,52,754,89,1072,5,0,1,0,0
brick_18,2769,02,754,89,1017,5,0,1,0,0
brick_19,2647,52,754,89,962,5,0,1,0,0
brick_20,2769,02,754,89,907,5,0,1,0,0
brick_21,2647,52,754,89,852,5,0,1,0,0
brick_22,2769,02,754,89,797,5,0,1,0,0
brick_23,2647,52,754,89,742,5,0,1,0,0
brick_24,2769,02,754,89,687,5,0,1,0,0
brick_25,2647,52,754,89,632,5,0,1,0,0

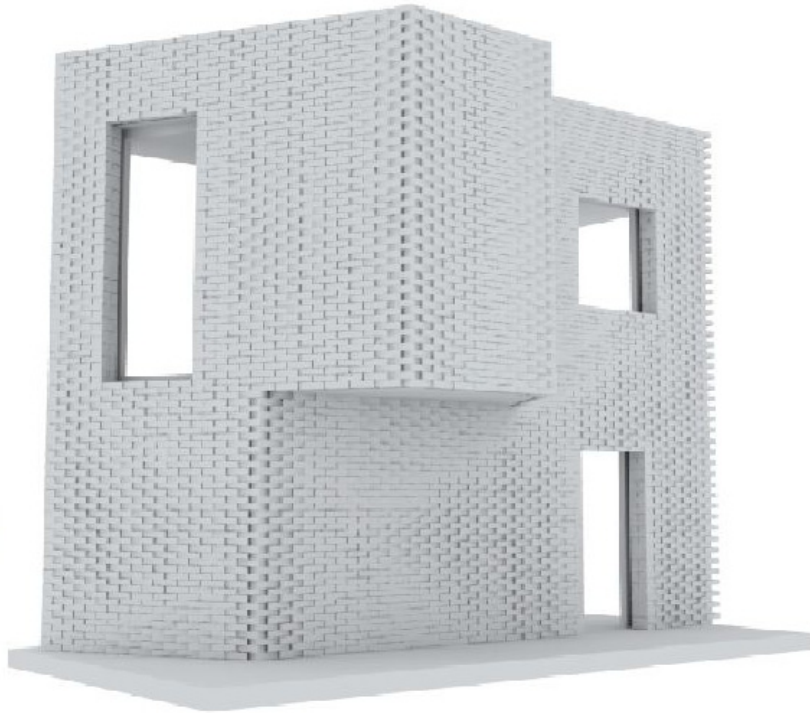
```

Abbildung 44: Export eines Datenpaketes in Form einer Textdatei mit allen nötigen Positionierinformationen für die Produktion eines Flexbrick-Fassadenelementes

Papierpläne sind angesichts dieser digitalen Gestaltungsmodulare nicht mehr nötig, und die Planungskosten für *Flexbrick*-Elemente können trotz des sehr hohen Detaillierungsgrades des Mauerwerks niedrig gehalten werden. Weitere Anforderungen, die an das Softwaremodul gestellt wurden, waren zum einen, die völlige Kontrolle über einen komplexen Entwurf zu erhalten, und zum anderen die Gewährung einer stabilen Verarbeitung hoher Datenmengen während der gesamten Produktionskette. Auch zur Visualisierung und Überprüfung der Gestaltung konnten diese Werkzeuge genutzt werden<sup>189</sup> (Abbildung 45).

<sup>189</sup> Die Untersuchungen zur Datengenerierung im Projekt *Flexbrick* bildeten die Grundlage für das Folgeprojekt *BrickDesign*. Im Rahmen von *BrickDesign* wurde eine vollständige, in die CAD-Anwendung implementierte Software entwickelt. Diese Plattform ermöglicht es dem Anwender, Steinkonfigurationen virtuell selbst zu erstellen und zu betrachten. Nähere Informationen zu dem Projekt *BrickDesign* finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*.

## In-situ-Fabrikation



*Abbildung 45: Visualisierung einer generierten Flexbrick-Fassade*

### **4.3.4 Fabrikationsprozess**

Im Vordergrund des Fabrikationsprozesses in den Fallbeispielen stand die maschinelle Umsetzung von Mauerwerkswänden aus Ziegeln im Maßstab 1 : 1. Anhand mehrerer Prototypen konnten die Vorteile und die Schwierigkeiten der roboterbasierten Fertigung aufgezeigt werden. Ausgangspunkt der Untersuchungen bildete der zuvor beschriebene Stapelungsprozess.

Die größte Herausforderung im Rahmen der Fallbeispiele lag in der Verarbeitung des sehr toleranzbehafteten Materials Ziegel. Grundsätzlich steht dies im Gegensatz zu dem sehr genauen Verarbeitungsprozess eines Roboters. Die durch den Trocknungsprozess der Tonmasse entstehenden geometrischen Ungenauigkeiten führen zu gravierenden Maßabweichungen im gesamten Bauelement, die sich bei einer Stapelung addieren. Zur Vermeidung solcher Maßabweichungen wurde eine automatische Toleranzmessung in den roboterbasierten Prozess eingebunden und mit einem eigens entwickelten System zur

Kompensation gekoppelt. Die konstante Messung der Abweichung erlaubt schon während der Produktion ein gezieltes Intervenieren, bei dem verschiedene Kompensationsstrategien das Addieren der Fehler verhindern. Die ersten Tests der Untersuchung zeigten, dass mit nur einer geringen Anzahl von Interventionen ein Bauteil von sehr hoher Präzision hergestellt werden kann. Ohne Kompensation hätten schon minimale lokale Abweichungen eine unkontrollierbare Auswirkung auf das Istmaß des gemauerten Elementes. Die hohe Maßhaltigkeit erlaubt nun, ohne nachträgliche Anpassungsarbeiten, ein präzises und nahtloses Fügen unabhängig produzierter *Flexbrick*-Bauteile.

Für den Nachweis der maßhaltigen Produktion von Fassadenelementen mussten im Fabrikationsprozess folgende Aspekte und Komponenten untersucht, angepasst und getestet werden: a) Steinungenauigkeiten, b) Nicht lineare Fehler- und Toleranzanalyse, c) Toleranzkompensation, d) Prototypen.

#### *a) Steinungenauigkeiten*

Der entscheidende Vorteil des Klebprozesses der Steine in den Lagerfugen liegt in den hohen strukturellen Eigenschaften des Klebers und dem daraus resultierenden verstärkten Gesamtverbund des Mauerwerks. Zudem erlaubt der Kleber, im Gegensatz zu einem Mörtel, eine saubere maschinelle Verarbeitung. In einem manuell erstellten Steinverbund werden die Toleranzen, ausgelöst durch die produktionsbedingten Verformungen des Materials,<sup>190</sup> durch das Bindemittel Mörtel aufgenommen. Soll ein verklebtes Mauerwerk erstellt werden, sind daher besondere Untersuchungen der Steintoleranzen notwendig (Abbildung 46 bis Abbildung 48), und auch die Kompensation muss als grundlegender Bestandteil in die Fabrikation eingearbeitet werden.

---

<sup>190</sup> Verformungen und Maßungenauigkeiten können bei dem Brennvorgang der Steinmasse entstehen. Die dadurch produzierten Abweichungen zum Sollmaß spielen für den Verbund einer gemörtelten Wand eine untergeordnete Rolle. Für den Klebeverbund sind diese Verformungen von großer Bedeutung, und es war zu untersuchen, ob sich geometrische Regelmäßigkeiten von diesen Materialdeformationen ableiten lassen. So konnte beispielsweise festgestellt werden, dass sich die Steine, die aus einer gemeinsamen Produktionscharge stammen, in ihrer Geometrie ähneln.

## In-situ-Fabrikation



*Abbildung 46a und b: Aufgrund der meist auf der kurzen Seite auftretenden konischen Verformung des Backsteins summieren sich die Ungenauigkeiten bei einer Stapelung ohne Mörtel in Vertikalrichtung auf*



*Abbildung 47: Mögliche geometrische Verformung auf der Längsseite des Steines*



*Abbildung 48: Auswirkungen einer Toleranzaddition: Abweichung der Sollmaßhöhe eines mörtellosen Verbundes mit Steinen, die alle dasselbe Nennmaß aufweisen*

Die Kombination aus vertikalen und horizontalen Ungenauigkeiten hat nicht nur eine Abweichung bezüglich der Sollhöhe zur Folge. Auch die exakte Verzahnung unabhängig vorgefertigter Elemente wird dadurch erschwert und ist ohne die nachträgliche Bearbeitung einzelner Steine kaum möglich.

#### *b) Nicht lineare Fehler- und Toleranzanalyse*

Um die Abweichungen und die Verteilung der auftretenden Toleranzen verstehen zu können, war eine eingehende Analyse des Steinverbundes erforderlich. Das Materialverhalten wurde nach dem Assemblieren durch die Aufnahme von Höhenmessungen verschiedener Steinlagen in einem digitalen Modell sichtbar gemacht (Rückkopplungsprozess). Angesichts der Überlagerung dieser Daten mit den Sollwerten aus der CAD-Planung war damit ein direkter Vergleich möglich. Die Auswertung zeigte, dass die realen Wände ein stetiges Wachstum gegenüber dem immer exakt gleichbleibenden CAD-Modell aufwiesen. Dieser Vorgang ist mit der Addition geometrischer Ungenauigkeiten zu begründen. Anhand des Prototyps #2<sup>191</sup> wurde die Digitalisierung des

---

<sup>191</sup> Der Prototyp #1 war für die Fehler- und Toleranzanalyse nicht relevant. Daher wird auf den ersten Prototypen in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.



## In-situ-Fabrikation

Materialverhaltens erstmals an einem vollständigen, maßstäblichen und robotergefertigten Element durchgeführt (Abbildung 49). Wichtig bei der Erstellung des Prototyps war, dass die Steine aus verschiedenen Produktionslinien<sup>192</sup> stammten und vorab nicht auf ihre Toleranzen vermessen wurden. Dieses Vorgehen gewährleistete eine gute Durchmischung aller denkbaren geometrischen Steinungenauigkeiten und die bestmögliche Analyse der Fehlerquellen. Neben der Toleranzanalyse diente der Prototyp #2 auch zur Evaluation der durchgängigen Produktionskette, bei der die digitalen Werkzeuge zur Datengenerierung ebenfalls eingesetzt werden konnten.

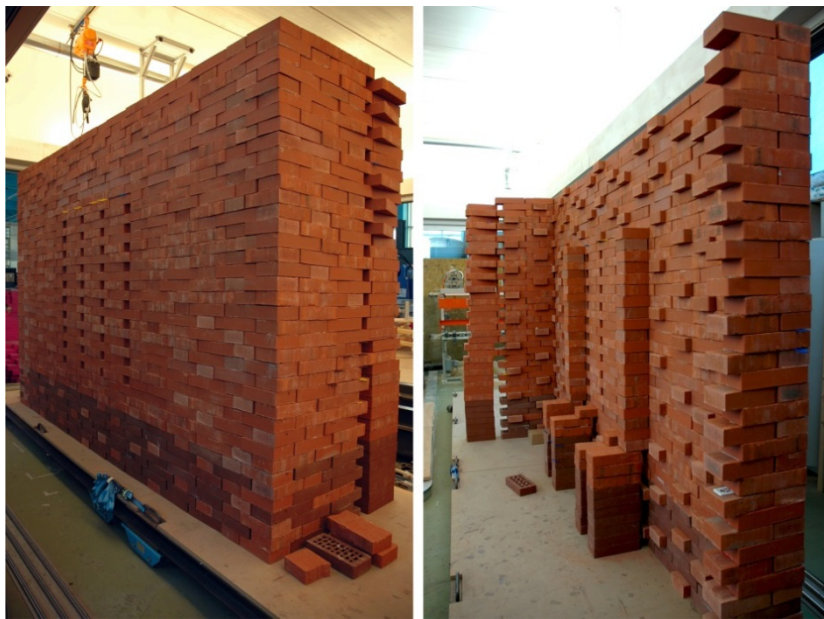


Abbildung 49a und b: Prototyp #2 ohne horizontale Ausgleichselemente

Für die Rückführung der Istmaße des Prototyps #2 waren die vertikalen Abweichungen von großer Bedeutung. Während des Aufbauprozesses wurde jeder einzelne Stein nach dem Ablegen an mehreren Positionen automatisiert auf die absolute Höhenlage vermessen. Mit diesen

---

<sup>192</sup> Unter einer Produktionslinie wird die Herstellung von Steinchargen mit der exakt gleichen Zusammensetzung verstanden. Sind zwischen der Herstellung von Chargen größere Zeitabstände vorhanden, kann die Beschaffenheit einzelner Zusätze naturbedingt variieren. Schon kleine Abweichungen der Steinrezeptur führen nach dem Brennvorgang zu leicht veränderten geometrischen Verformungsregeln der Steine, die sich während der Schichtung bemerkbar machen können.

Angaben konnte im CAD ein Modell rekonstruiert werden, das der tatsächlich gebauten Situation entsprach. Die Überlagerung des digitalisierten Modells mit den Planungsgrundlagen verdeutlichte die auftretenden Differenzen (Abbildung 50).

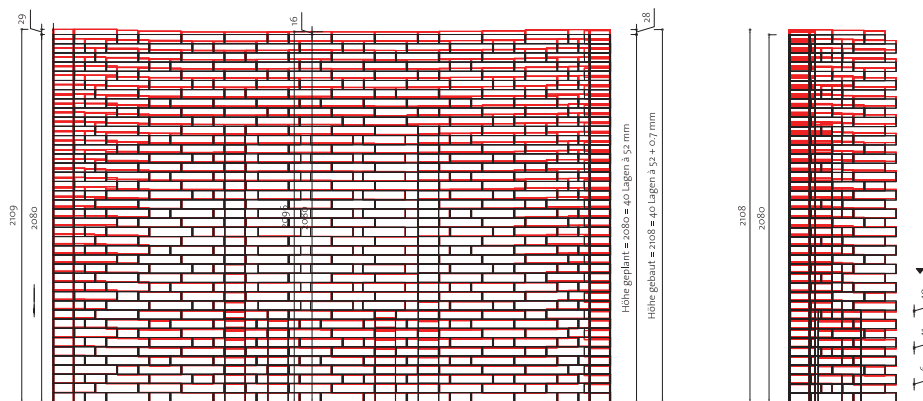


Abbildung 50: Überlagerung mit den rückgeführten Daten der gebauten Ziegelsteinwand (rot) und den Sollmaßen der CAD-Planung (schwarz)

Vorbereitend für Maßnahmen zur Kompensation dieser Abweichungen waren die Toleranzanalysen ein notwendiger erster Schritt, und sie verdeutlichen, dass die Fehlerquellen nicht linear sind: Jede Steinproduktion ist aufgrund unterschiedlicher Rahmenbedingungen und abweichender Zusammensetzung der Rohmaterialien anders. Aber auch innerhalb einer Serie können unerwartet vereinzelt markante Unregelmäßigkeiten, die in dieser Arbeit als „Ausreißersteine“ bezeichnet werden, auftreten. Die Gründe hierfür können kurze Pausen in der Produktion, ein Materialwechsel oder die falsche Lagerung während der Trocknungsphase sein.

Wie deutlich wurde, kann eine exakt einheitliche Herstellung der Steine mit gleichbleibenden Toleranzen nicht gewährleistet werden. Trotz dieser erschwerten Voraussetzungen wurden Strategien zur Ermöglichung einer roboterbasierten Fabrikation untersucht, da die Vorteile des Klebprozesses weiter verfolgt werden sollten.

## In-situ-Fabrikation

### c) Toleranzkompensation

Für die Toleranzkompensation wurde nach der eingehenden Toleranzanalyse ein Maßnahmenkatalog erstellt. Die Maßnahmen, wie beispielsweise das Unterlegen oder das Aussortieren von Steinen, basieren auf einem entwickelten Algorithmus, der simuliert, wie sich ein frühes Intervenieren auf Abweichungen zum Sollmaß auswirkt (Abbildung 51 und Abbildung 52).

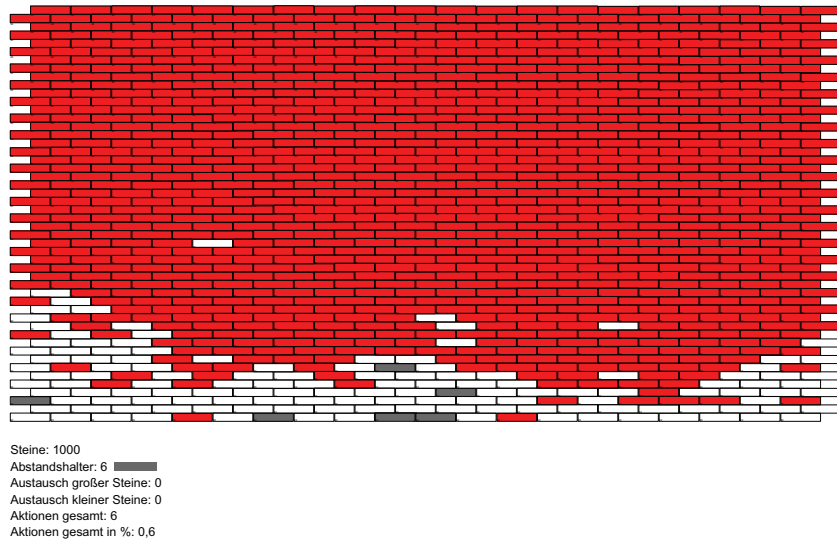
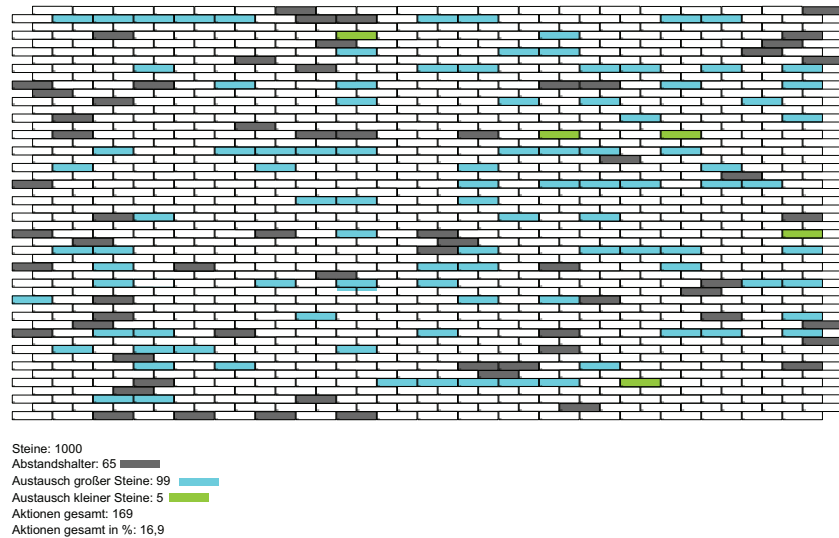


Abbildung 51: Simulation einer Zufallsverteilung von 1 000 Steinen mit einem Toleranzbereich von 3 mm. Nur bei Sollmaß-Unterschreitung wurde virtuell unterlegt. Die Abweichungen addieren sich schon nach kurzer Zeit und können bei zunehmender Anzahl der Reihen nicht mehr ausgeglichen werden (rot).



*Abbildung 52: Simulation einer Zufallsverteilung von 1 000 Steinen mit einem Toleranzbereich von 3 mm. In dieser Simulation wurde unterlegt und bei Extremabweichungen einzelner Elemente (Ausreißersteine) ausgetauscht. Die Sollmaße konnten nach wiederholten Durchläufen (Iterationen) mit einem durchschnittlichen Eingreifen von 16,9 % eingehalten werden.*

In der Umsetzung am realen Mauerwerk wurden die gleichen Maßnahmen wie in der Simulation ergriffen:

Steine mit extremen Differenzen in der Höhe vom Nennmaß mussten, innerhalb eines festgelegten Spektrums, aussortiert werden (Abbildung 53). Größere Ungenauigkeiten ließen sich dadurch vorab verhindern. Mehrere Messreihen verdeutlichten, dass dieser produktionsbedingte Ausschuss pro Palette (ca. 500 Steine) in einem relativ geringen Prozentbereich (unter 3 %) lag. Vor dem Platzieren der Steine durch den Roboter bestand demnach die erste Aufgabe darin, die Steinhöhe zu ermitteln und bei zu großen Abweichungen die entsprechenden Steine auszusondern.

## In-situ-Fabrikation

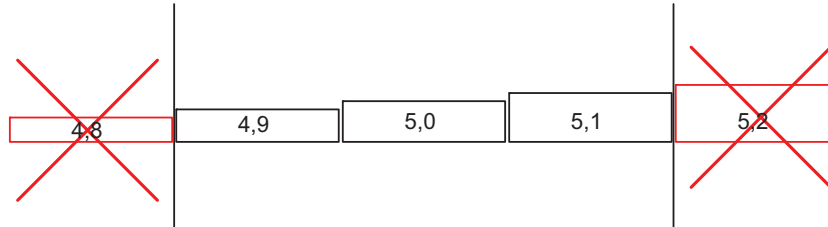


Abbildung 53: Das Nennmaß lag in diesem Beispiel bei 5 cm. Der Toleranzbereich betrug  $\pm 1$  mm; Steine, die außerhalb dieses Bereiches lagen, wurden aussortiert.

Nicht nur die Auswertung der Steinhöhe spielte bei der Aussortierung eine Rolle. Denn auch die Art der geometrischen Verformung, die bei dem Trocknungsprozess zustande kommen kann, hatte Einfluss auf den Toleranzverlauf der Wand. Ist die Deformation zu groß, wirkt sich das ebenfalls negativ auf die Maßhaltigkeit aus. Da die Steine aufgrund der eingearbeiteten Schattenfugen nicht gedreht werden können, mussten solche Steine mit einer Krümmung in Richtung Steinunterseite unter allen Umständen aussortiert werden, da sonst ein Hebel entstanden wäre (Abbildung 54).

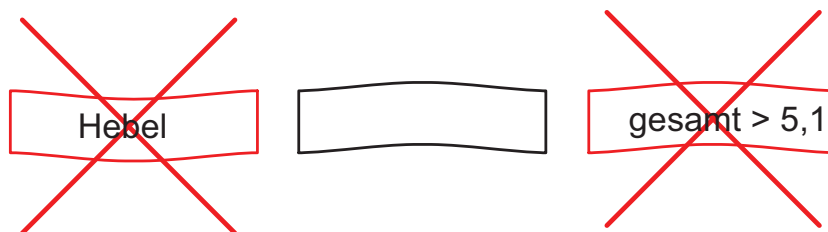
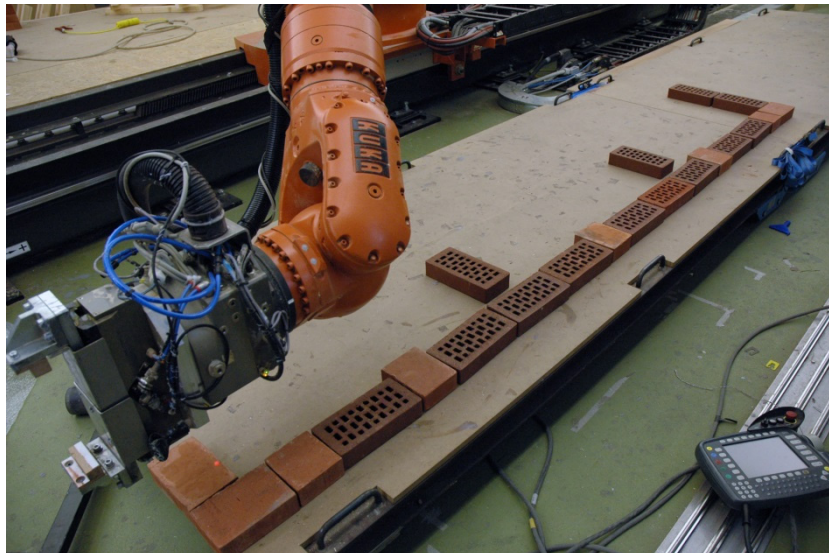


Abbildung 54: Mögliche geometrische Verformungen nach dem Trocknungsprozess der Steine

Für die Auswertung der Steinhöhe und der geometrischen Verformung wurde ein prototypischer Scanner mit folgender Funktionsweise entwickelt: Ein elektronisches Tastsystem wird über einen Federmechanismus auf die Oberfläche des Steines geführt, während das Material durch ein Schienensystem fährt. Die abgetasteten Datenpunkte werden direkt ausgewertet. Eine Überschreitung des Toleranzbereiches zeigt der Scanner sofort an, und der Stein muss aussortiert werden.

Trotz der Aussonderung von Steinen mit Extremabweichungen können sich auch kleinere Maßdifferenzen nach mehreren Reihen

aufsummieren. Um diese Abweichungen vom Planungsmaß feststellen zu können, ist eine Toleranzmessung der Höhe notwendig. Manuell wäre ein solcher Vorgang sehr zeitaufwendig und würde zudem gegen einen durchgängig automatisierten Produktionsablauf sprechen. Daher wurde für das *Flexbrick*-Projekt ein Feedbackprozess entwickelt, der nach dem Positionieren einer kompletten Steinreihe die absolute Höhe der einzelnen Steine vermisst, analysiert und, wenn nötig, gegensteuert (Abbildung 55).



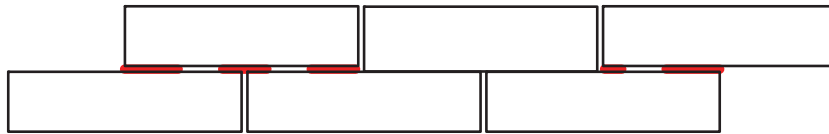
*Abbildung 55: Sensorikbasiertes Feedbacksystem: Absolute Steinhöhen werden zur Überprüfung von Toleranzabweichungen automatisch gemessen*

Der am Roboter installierte Distanzmesser<sup>193</sup> liest die Z-Werte ein, die sofort in einer digitalen Routine überprüft und verarbeitet werden. Wird anhand dieser Messung festgestellt, dass ein Wert außerhalb des zulässigen Bereiches liegt, stoppt der Roboterarm über dem problematischen Bereich. Zwei Möglichkeiten können die Ursache sein: Entweder liegt das Ergebnis der Messung weit über oder unter dem Nennmaß. In beiden Fällen erscheint auf der Anzeige des Bedienungspanels der Robotersteuerung eine Hinweismeldung, die die erforderliche Maßnahme beschreibt. Wird das Maß einer Steinreihe innerhalb des festgelegten Toleranzbereiches nach dem Platzieren

<sup>193</sup> Baumer Electric AG, <http://www.baumer.com/ch-en/products/distance-measurement/photoelectric-sensors/> (abgerufen am 11.08.2014).

## In-situ-Fabrikation

unterschritten, muss die Differenz ausgeglichen werden (Abbildung 56). Das frühe „Anschlagen“ dieses Feedbackprozesses bewirkt, dass die Ausgleichselemente nicht stärker als 1 mm sein müssen und deshalb keine – von außen sichtbaren – Fugen hinterlassen.



*Abbildung 56: Das Unterschreiten des Sollmaßes innerhalb eines festgelegten Bereiches kann durch Unterlegen von Zusatzelementen ausgeglichen werden*

Verschiedenste Materialien wurden auf ihre Eignung als Ausgleichsmaterial getestet (Abbildung 57). Größe, Position und Anzahl der schichtbildenden Elemente spielten bei dieser Evaluation eine wichtige Rolle. Der geforderte statische Verbund zwischen dem zusätzlichen Material und dem Klebstoff wurde ebenfalls mehreren Tests unterzogen. Als geeignete Zwischenlage stellte sich handelsüblicher Draht heraus, da sich die Auflagefläche durch ihn minimieren ließ und der nahezu ununterbrochene direkte Verbund zwischen Stein und Kleber gewährleistet war.<sup>194</sup>

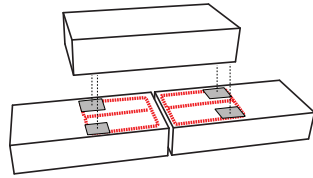
---

<sup>194</sup> Zu erwähnen ist, dass der Ausgleichsdraht manuell auf der Oberseite des Steines verteilt wurde. Digital gesteuerte Werkzeuge zur Vereinzelung und Verteilung waren in diesem Fallbeispiel zwar angedacht, wurden aber aufgrund der grundsätzlichen Fragestellungen des Projektes nicht umgesetzt.



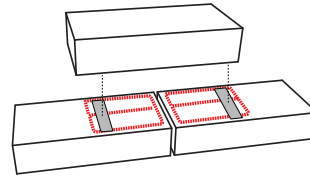
## Volker Helm

Type 1 - Medium Size Shim (40mmx45mm)  
Corner Placement



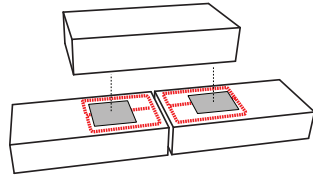
Material Possibilities: Plastic  
Surface Area Coverage: 4 x 1800mm<sup>2</sup>

Type 2 - Strip Shim (15mmx90mm)  
Edge Placement



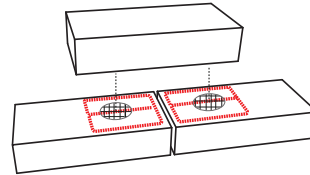
Material Possibilities: Plastic, Rubber  
Surface Area Coverage: 2 x 1350mm<sup>2</sup>

Type 3 - Large Size Shim (50mmx80mm)  
End Placement



Material Possibilities: Plastic  
Surface Area Coverage: 2 x 4000mm<sup>2</sup>

Type 4 - Mesh Shim (50mmx80mm)  
Center Placement



Material Possibilities: Woven Steel, Woven Plastic  
Surface Area Coverage: 2 x 1350mm<sup>2</sup>

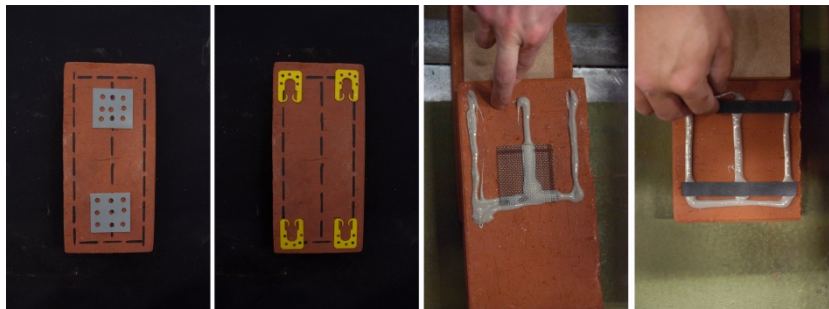


Abbildung 57a und b: a) Übersicht über verschiedene Materialien und die Positionierungsmöglichkeiten des Ausgleichsmaterials; b) Untersuchung des Ausgleichsmaterials anhand verschiedener Materialproben

Bei Abweichungen vom Planungsmaß lag nicht immer nur die einseitige Bedingung vor, dass der Toleranzbereich unterschritten wurde. Stellte die Messung eine Überhöhung einzelner Steine fest, stand ein zuvor angelegtes Depot mit kleineren „Jokersteine“ für den Austausch der überhöhten Steine zur Verfügung. Erste manuell durchgeführte Assemblierungstests zur Überprüfung der Toleranzkompensation zeigten, dass Ungenauigkeiten durch frühzeitige Intervention minimiert werden konnten. Planungsmaße konnten eingehalten werden,



## In-situ-Fabrikation

und die Verzahnung unabhängig produzierter Bauteile war durchführbar (Abbildung 58).

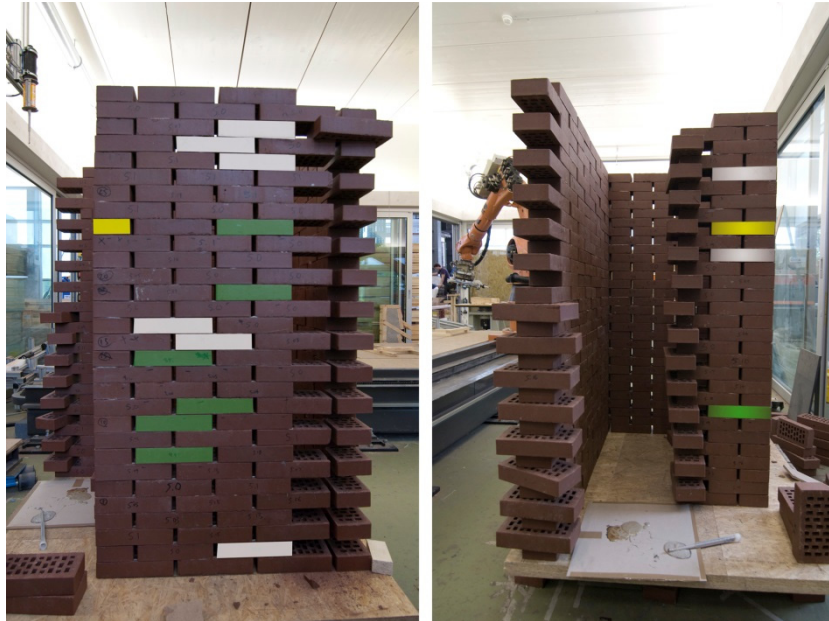


Abbildung 58a und b: Erste Assemblierungstests mit Toleranzkompensation. Weiß bedeutet, dass das Sollmaß unterschritten wurde. Als Maßnahme wurde unterlegt. Grün bedeutet, dass das Sollmaß überschritten wurde. Als Maßnahme wurde der Stein ausgetauscht. Gelb bedeutet, dass das Sollmaß massiv unterschritten wurde. Als Maßnahme wurde ein hoher Stein eingefügt.

### d) Prototypen

Es wurden mehrere Prototypen mit unterschiedlichen Schwerpunkten ausgearbeitet. Zum einen sollte das ästhetische Potenzial einer robotergestützten, maßhaltigen Produktion aufgezeigt und zum anderen mehrere Konstruktionstypologien und verschiedene bautechnische Details entwickelt werden. Dabei sollte vorrangig die erhöhte strukturelle Steifigkeit – erreicht durch den Klebeprozess – genutzt werden. Beispielsweise eignen sich *Flexbrick*-Elemente für eine Vielzahl verschiedener Unterkonstruktionen. Wie anhand des Prototyps #3 aufgezeigt werden konnte, erweist sich die Herstellung besonders stabiler und dünner Wände als außergewöhnlicher Anwendungsbereich.

## Volker Helm

Mit nur vier Befestigungspunkten war die Aufhängung einer knapp  $3 \times 3$  Meter großen Wand durchführbar (Abbildung 59).



*Abbildung 59: Prototyp #3 – Herstellung eines maßhaltigen Leichtbauelementes und Implementierung konstruktiver Bauteile*

Gegenüber dem Prototyp #3 wurden beim Prototyp #4 außerdem Rotationsstudien für die Gestaltung eingebunden (Abbildung 60). Diese Untersuchungen dienten neben der Überprüfung der Gestaltung dazu, die Aufhängungsschienen auch bei einer Verdrehung einzelner Steine sicher in den Verbund zu integrieren. Grenzwerte für die Steinrotationen mussten gefunden werden, um diese dann wiederum als Parameter in die Datengenerierung einbinden zu können.

## In-situ-Fabrikation

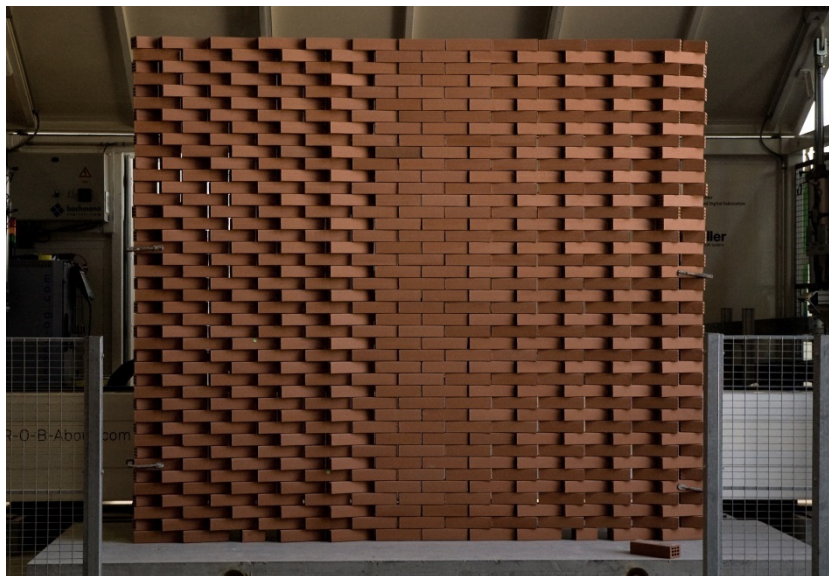
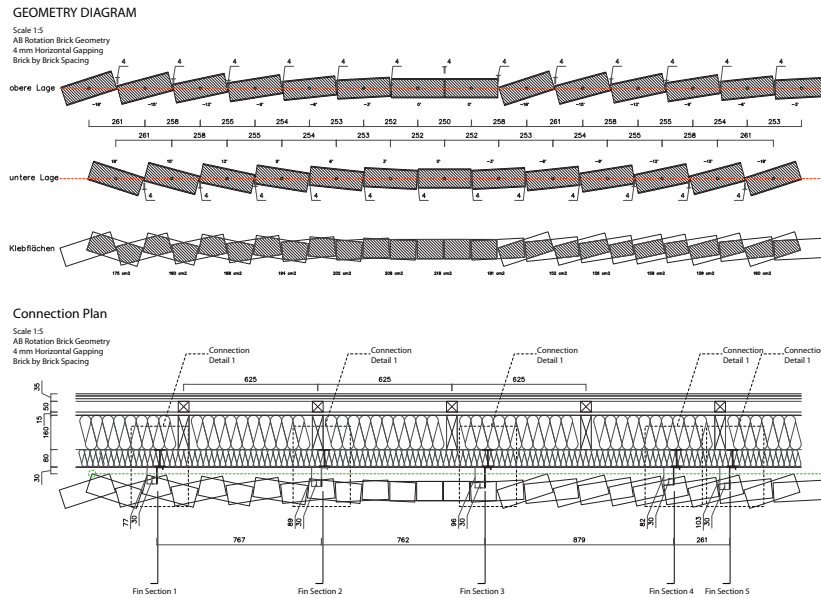


Abbildung 60a und b: a) Prototyp #4 – Lösungsvorschläge für die Aufhängung von Wänden bei starken Verdrehungen der Steine; b) Überprüfung von Rotationsstudien mit dem Flexbrick-Stein anhand eines roboterbasiert hergestellten verklebten Verbundes

Die je nach Prototyp erforschten unterschiedlichen Details bildeten die Grundlage für die Planung und den Bau eines maßstäblichen Gebäudeausschnittes, der zur Verifizierung der Produktumsetzung herangezogen wurde. Vorab mussten jedoch noch mehrere Testbauteile

einer eingehenden bautechnischen Produktprüfung unterworfen werden. Seitens des Industriepartners wurden in Zusammenarbeit mit externen Prüfungsanstalten<sup>195</sup> diverse Belastungstests durchgeführt. Der unübliche Verbund zwischen einem Kleber und dem Backstein ist die Besonderheit an dem *Flexbrick*-System. Einige der hierdurch erhofften Vorteile konnten bereits nachgewiesen werden. Von besonderem Nutzen ist die Tatsache, dass das System Zugkräfte aufnehmen kann, was im direkten Gegensatz zu einer gemörtelten Wand steht. Die Bemessung eines solchen innovativen Mauerwerksystems ist jedoch eine Herausforderung. Viele vorher nie untersuchte Eigenschaften, die im Zuge dieser Forschungsarbeit mit einer Ziegelwand kombiniert wurden, müssen grundlegend berücksichtigt werden.<sup>196</sup>

#### 4.3.5 Produktumsetzung

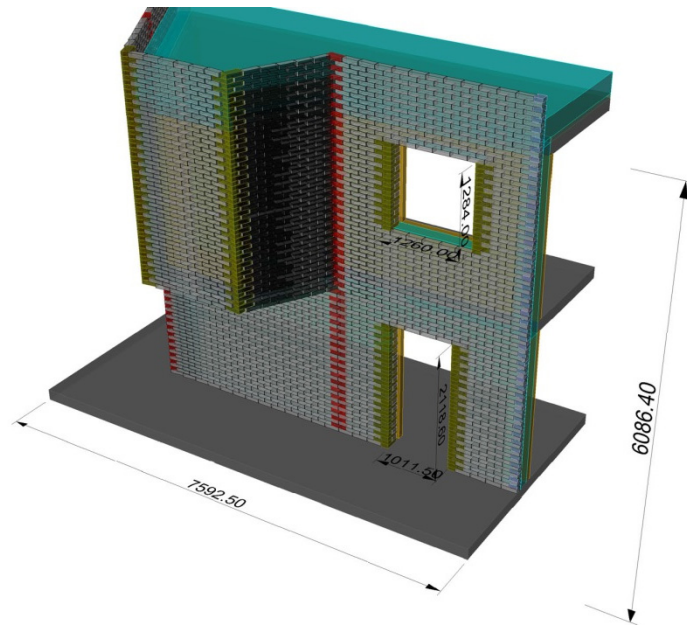
Zum Abschluss des *Flexbrick*-Projektes wurde ein großformatiger Prototyp mit dem Ziel umgesetzt, roboterbasierte Produktionsabläufe, Toleranzen, die Konstruktion und die Aufhängung zusammenfassend zu testen. Als Vorlage diente ein zweigeschossiger Gebäudeausschnitt, bei dem bewusst nicht standardisierte Details in die Planung mit einbezogen wurden (Abbildung 61).

---

<sup>195</sup> Speziell erstellte Testelemente wurden an die HTL Rankweil (Höhere Technische Lehranstalt) und die EMPA (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt) zur bautechnischen Prüfung übergeben. Unterschiedliche Belastungstests wie Zug- und Druckspannung in den Lagerfugen des Steinverbundes wurden vorgenommen. Aufgrund der unüblichen Prüfung auf Zugkräfte (ein Mörtel kann in dem Verbund nicht auf Zug belastet werden) mussten vorab Bemessungskonzepte für die Klebstoffvariante entwickelt werden.

<sup>196</sup> Weitere statische Tests zur Produktprüfung sind vom Industriepartner für die Umsetzung eines marktreifen Fassadensystems vorgesehen.

## In-situ-Fabrikation



*Abbildung 61: Dreidimensionales Modell eines zweigeschossigen Gebäudeausschnittes. Für die Umsetzung des finalen Flexbrick-Prototyps wurde ein Ausschnitt dieser Darstellung gewählt*

Auch das erweiterte Spektrum an gestalterischen Möglichkeiten, das sich durch die digitale Produktionskette eröffnet, wurde weiterentwickelt und getestet. Anforderungen und Ziele in Verbindung mit dem finalen Prototyp waren folgende:

### *Elementierung und Bauablauf*

Schon im dreidimensionalen digitalen Modell sollten Bauzeiten optimiert und geprüft werden. Hierfür spielt die virtuelle Unterteilung der gesamten Fassade in kleinere, für die Roboterproduktion günstige Teile eine große Rolle. Baurelevante Informationen, wie beispielsweise Maximalabmessungen des Baubereiches, die mögliche Geschwindigkeit der Maschine oder die Anordnung von Dilatationsfugen, können zur Optimierung im Vorfeld in die Datengenerierung einbezogen werden (Abbildung 62). Die Umsetzung des Prototyps ermöglicht dann den entscheidenden Abgleich zwischen der digitalen Planung und der empirischen Forschung.

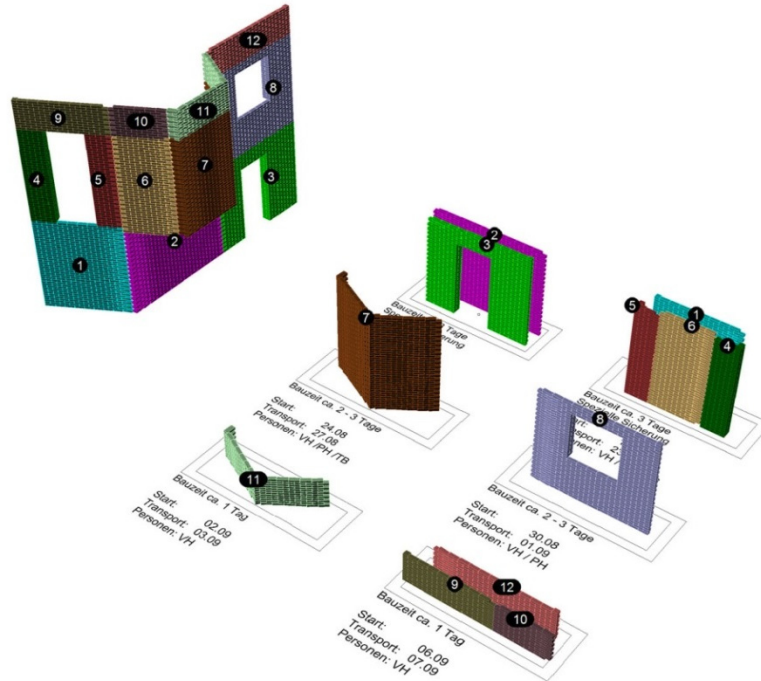


Abbildung 62: Elementierung des dreidimensionalen Planungsmodells für eine optimierte Roboterproduktion

### Design

Die Herstellung des Prototyps sollte darüber hinaus zur Überprüfung der durchgängigen Datengenerierung und der damit verbundenen Gestaltungsmöglichkeiten dienen. Die kontrollierte Verdrehung einzelner Steine ließ sich auf diese Weise gezielt an unterschiedlichen baukonstruktiven Situationen wie Eckelementen, Fensterdetails oder horizontalen und vertikalen Übergängen testen.

### Bauteilvariation

Ein weiteres an den finalen Prototyp geknüpftes Forschungsziel bestand darin, möglichst komplexe und ungleiche Fassadentypen herstellen zu können. Neben zusammenhängenden, nicht rechtwinkligen Eckelementen wurden Varianten mit Fensteröffnungen, die aufgrund des Klebprozesses mit Laibung und Sturz aus Stein ausgestattet werden konnten, maschinell erstellt (Abbildung 63).



## In-situ-Fabrikation



*Abbildung 63: Die roboterbasierte Produktion eines Fassadenelementes mit Fensteröffnung*

### *Statische Anforderungen und Assemblierung*

Die Lastabtragung der Wände erfolgte über eine Aufhängung im Fußpunkt und wurde nicht direkt über das Fundament in den Boden geleitet. Die Art der punktuellen Befestigung nur über den Kopfbeziehungsweise Fußpunkt des Elementes an der Stirnseite der Decke ist eine weitere Innovation: Der Prototyp vermochte aufzuzeigen, dass auf die nicht erwünschte Rückverankerung in der Mitte des Bauteiles verzichtet werden konnte (Abbildung 64). Zur Überprüfung der Horizontalfügung einzelner Teile wurde ein Geschosswechsel mit Deckenplatte geplant (Abbildung 65). Aufgrund der exakten Fertigung der Wände war nach der Assemblierung mehrerer Fertigteile übereinander keine ablesbare Horizontalfuge mehr erkennbar. Überraschend war auch die kurze Zeitspanne, in der die Fassade an dem Rohbau befestigt werden konnte. Die angebrachten Fixierungselemente – zum einen an den Eckpunkten der Wände, zum anderen als Gegenstücke an den Stirnseiten der Geschossplatten – ermöglichten einen unkomplizierten Zusammenbau in nur wenigen Stunden.



*Abbildung 64: Befestigung eines Flexbrick-Elements. Eine Rückverankerung in der Mitte des Bauteils war nicht notwendig*



*Abbildung 65: Assemblierung des finalen Prototyps*

Hinsichtlich der Fallbeispiele und Experimente I lässt sich abschließend feststellen, dass die wesentlichen Vorteile einer roboterbasierten digitalen Fabrikation, gekoppelt mit Feedbackprozessen, herausgearbeitet und bewiesen werden konnten. Die Untersuchungen stellen die Grundlagen für reaktive Prozesse auf einer Baustelle dar und sind somit die Basis für eine In-situ-Fabrikation. In dem folgenden Kapitel, das



die Fallbeispiele und Experimente II vorstellt, wird aber ein weiterer entscheidender Schritt vollzogen: Die Vorproduktion von Bauelementen wird durch den direkten Baustelleneinsatz einer mobilen und mit Sensorik ausgestatteten Robotereinheit erweitert, woraufhin das manuelle Assemblieren vollständig entfällt.

### 4.4 Experimente II – In-situ-Fabrikation

Nach den gewonnenen Erkenntnissen über rückkopplungsgestützte Fabrikationsprozesse wurden die Experimente und Fallbeispiele II zur Erforschung der Grundlagen für die In-situ-Fabrikation – die direkte Produktion auf der Baustelle – durchgeführt. Ziel der Studien war es, die zu Beginn der Arbeit aufgestellte These (Kapitel 1.2 *Forschungsleitende These*) zu verifizieren. Die Versuche konnten im Rahmen des achtzehnmonatigen (2011–2012) von der EU geförderten Forschungsprojektes *ECHORD: dimRob* durchgeführt werden.

Im Mittelpunkt dieses Untersuchungsabschnittes standen neben der Produktion von großmaßstäblichen konstruktiven Systemen zum einen der Entwurf einer mobilen roboterbasierten Baumaschine<sup>197</sup> und zum anderen deren Einbindung als reaktives System in einen automatisierten Bauablauf. Die Studien und Experimente wurden zielgerichtet in folgender Reihenfolge angesetzt: 1) Experimentaufbau, 2) Materialtoleranzen, 3) Mensch-Maschine-Interaktion, 4) Mobilitäts- und Lokalisierungstechniken sowie 5) Multifunktionale Prozesse.

Mit der Erforschung mobiler Konstruktionsroboter wird ein neues, zukunftsorientiertes Gebiet betreten, dessen Erschließung eine eminente Herausforderung darstellt. Denn im Gegensatz zu vorangegangenen Forschungsprojekten<sup>198</sup> wird in dieser Arbeit die generative roboterbasierte Fertigung mit komplexen Toleranzerkennungs- und Lokalisierungsverfahren verknüpft.

---

<sup>197</sup> Die mobile Baumaschine wurde in Zusammenarbeit mit der Bachmann Engineering AG (Industriepartner) innerhalb des Projektes entwickelt und umgesetzt.

<sup>198</sup> Vorbereitende Arbeiten werden in den Ausführungen zum Forschungsstand beschrieben; siehe Kapitel 1.4.3 *In-situ-Fabrikation*.

#### 4.4.1 Experimentaufbau

Mobile autonome Robotersysteme bilden auf dem Gebiet der Robotik heutzutage ein Forschungsfeld mit wachsenden Aufgaben.<sup>199</sup> Aufgrund verbesserter Hardwareeigenschaften der Sensorik konnten hier in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt werden. Robuste, belastbare Systeme, die sich für einen vielfältigen Einsatz auf der Baustelle eignen, wurden hingegen kaum untersucht.

Die Entwicklung und Zusammenstellung eines adäquaten Experimentaufbaus, das den Anforderungen einer Produktion auf der Baustelle entspricht, war eine wichtige Grundvoraussetzung für die eigentliche Forschungsarbeit und die Durchführung der Experimente. Etliche Faktoren, wie beispielsweise die Abmessungen und die Stabilität, das Gewicht und die Traglast der Anlage, mussten schon im Vorfeld präzise aufeinander abgestimmt sein. Neben der eigentlichen Apparatur hatten aber auch Softwareschnittstellen und der Datentransfer einen hohen Stellenwert für das Vorhaben. Folglich überlagern sich verschiedene Disziplinen – unter anderem Architektur, Maschinenbau, Robotik und Informatik –, deren Anteile miteinander koordiniert werden mussten.

Grundsätzlich besteht die Einheit aus folgenden Einzelkomponenten, die zusammenhängend evaluiert oder entwickelt werden mussten: a) dem Roboterarm, b) dem mobilen Unterbau, c) der Sensorik und d) den Greifern.

##### *a) Der Roboter*

Für die Auswahl des geeigneten Industrieroboters wurden verschiedene Modelle von mehreren Herstellern evaluiert. Die zu vergleichenden Hauptkriterien waren hinsichtlich einer zukünftigen Produktion von architektonischen Elementen mit vorhandenen standardisierten Baumaterialien festgelegt worden. Aufgrund des besonderen Anwendungsbereiches des Roboters haben die maschinenspezifischen Faktoren Reichweite, Traglast und Eigengewicht den größten Einfluss auf die Untersuchung. Die Reichweite der Anlage begrenzt die maximale Bauteil- und Wirkungshöhe und beeinflusst gravierend die

---

<sup>199</sup> Als Beispiel sei hier das Autonomous System Lab (ASL) der ETH Zürich angeführt: <http://www.asl.ethz.ch/index> (abgerufen am 11.08.2014).

## In-situ-Fabrikation

Anzahl der Neupositionierungen bei einem Herstellungsprozess, dessen Ergebnis größer ist als die Maschine selbst: Je kleiner die Reichweite, desto öfter muss die Anlage neu ansetzen. Die maximale Traglast der Maschine ist für die Auswahl der Konzepte ausschlaggebend. Da das Repertoire an Prozessen und unterschiedlichen Materialien möglichst offen und variabel gehalten werden sollte, wurde die gewünschte Traglast im vorliegenden Fall relativ hoch angesetzt. So konnten neben diskreten Elementen wie Backsteinen auch ungleiche maßgeschneiderte Elemente assembliert werden. Mit einer höheren Traglast sind im Übrigen auch formative und materialbearbeitende Abläufe möglich. Ein weiterer ausschlaggebender Parameter, das Eigengewicht des Roboters, bestimmt die Flexibilität der gesamten mobilen Einheit. Zusammengenommen wirken sich daher folgende Merkmale besonders günstig auf das System aus: eine große Reichweite und eine hohe Traglast bei geringem Eigengewicht. Kompatibilität und Entwicklungsstand der Software zur Ansteuerung des Roboters wurden ebenfalls näher untersucht, um die anschließende Einbettung in bestehende Hard- und Softwarekonzepte gewährleisten zu können. Aus der Reihe evaluierter Roboter (Tabelle 1) wurde letztlich das Modell IRB 4600 – 40 / 2.55 der Firma ABB ausgewählt.

Manufacturer	Model	Reach [m]	Payload [kg]	Weight [kg]
Motoman	HP20-6	1,9	6	280
	EH80	2	80	570
Kuka	KR16L6-2	1,9	6	240
	KR30L2	3,1	16	700
	KR60-3	2,5	30	673
ABB	IRB4600	2-2,5	20-60	420
FANUC	M20iA/10L	2	10	250
	M710iC/20L	3	20	540

*Tabelle 1: Vergleich von Industrierobotern für die mobile Anlage. Gegenübergestellt wurden Reichweite, Tragkraft und Eigengewicht*

Die ursprünglichen Anwendungsbereiche des mit einer seriellen Kinematik<sup>200</sup> ausgerüsteten IRB 4600 sind unter anderem Schneiden, Schweißen, Montage, Palettieren/Verpacken und Messen.<sup>201</sup> Mit einer Reichweite von 2,55 m und dem daraus resultierenden Arbeitsbereich<sup>202</sup> (Abbildung 66), einer Handhabungskapazität von 40 kg und einer zusätzlichen Armlast von 20 kg eignet sich der IRB 4600 – 40 / 2.55 für den vielseitigen Einsatz auf einer Baustelle.

---

<sup>200</sup> In der Kinematik (von *bewegen*; Bewegungslehre) geht es um die Bewegungsabläufe von Punkten und Körpern im Raum. Sie nimmt in der Robotertechnik einen zentralen Stellenwert ein. Mit serieller Kinematik wird die Abfolge der einzelnen Achsen, im vorliegenden Fall aufeinander aufbauender Glieder (in Reihe), bezeichnet. Dies ist vergleichbar mit dem menschlichen Arm. Die meisten *klassischen* Industrieroboter entsprechen diesem Aufbau, der eine vielseitige und *offene* Nutzung ermöglicht. Für spezielle Anwendungen werden jedoch auch Roboter mit paralleler Kinematik eingesetzt (zum Beispiel Delta-Roboter; Stewart-Plattformen). Prinzipiell wird in der Kinematik zwischen Vorwärts- und Rückwärtskinematik unterschieden. Vorwärtskinematik: „Ein serieller Roboter ist eine endliche Kette von Gliedern, die man sich als starre Körper vorstellt. Die einzelnen Glieder sind durch Gelenke verbunden. Die Gelenke ermöglichen eine gegenseitige Bewegung der Glieder des Roboters. Wir nehmen an, daß man die Möglichkeit hat, die gegenseitige Lage und Bewegung der Glieder genau zu vermessen. Die gegenseitige Bewegung benachbarter Glieder des Roboters kann eine Drehung oder eine Schiebung sein (d. h. wir betrachten Drehgelenke und Schubgelenke). Schraubgelenke wären natürlich auch denkbar, aber sie kommen seltener vor und werden daher beim Drehgelenk und durch die Schubstrecke beim Schubgelenk bestimmt. Diese Größen bestimmen die Lage des Endeffektors im Raum. Der Endeffektor selbst ist dabei als letztes Glied des Roboters definiert. Die Basis (der Rastraum) ist das erste Glied. Die Lage des Endeffektors ist durch die Lage des Koordinatensystems auf dem Werkzeug (dem ‚tool frame‘) bestimmt. Dieses Koordinatensystem wird in einem Koordinatensystem, das mit der Basis verbunden ist, ausgedrückt. Die Lage des Endeffektors hängt dann von den ‚Gelenkvariablen‘, den Drehwinkeln und Schubstrecken ab. Diese Abhängigkeit auszudrücken ist die direkte Aufgabe der Robotik.“ Rückwärtskinematik: „Diese Aufgabe ist die Umkehrung der vorigen Aufgabe. Eine bestimmte Lage des Endeffektors ist gegeben und es sind solche Werte der Gelenkvariablen gesucht, für die der Endeffektor die vorgegebene Lage einnimmt. Die Lösung dieser Aufgabe ist für einen allgemeinen sechsachsigen Roboter nicht einfach. Sie führt auf eine algebraische Gleichung 16. Grades.“ Husty, Manfred, et al. *Kinematik und Roboter*. Berlin/Heidelberg: Springer, 1997, S. 415–416.

<sup>201</sup> Das Datenblatt des IRB 4600 kann als PDF heruntergeladen werden; ABB Ltd, <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-4600> (abgerufen am 11.08.2014).

<sup>202</sup> Eine Definition für den Arbeitsbereich des Roboters geben Husty et al.: „Die umgekehrte Aufgabe der Robotik ist eine (mehrwertige) Abbildung vom Raum aller möglichen Lagen in den Parameterraum. Die Menge aller Lagen, für welche mindestens eine Lösung der umgekehrten Aufgabe existiert, heißt der Arbeitsraum des Roboters.“ Husty, Manfred, et al. *Kinematik und Roboter*. Berlin/Heidelberg: Springer, 1997, S. 416.

## In-situ-Fabrikation

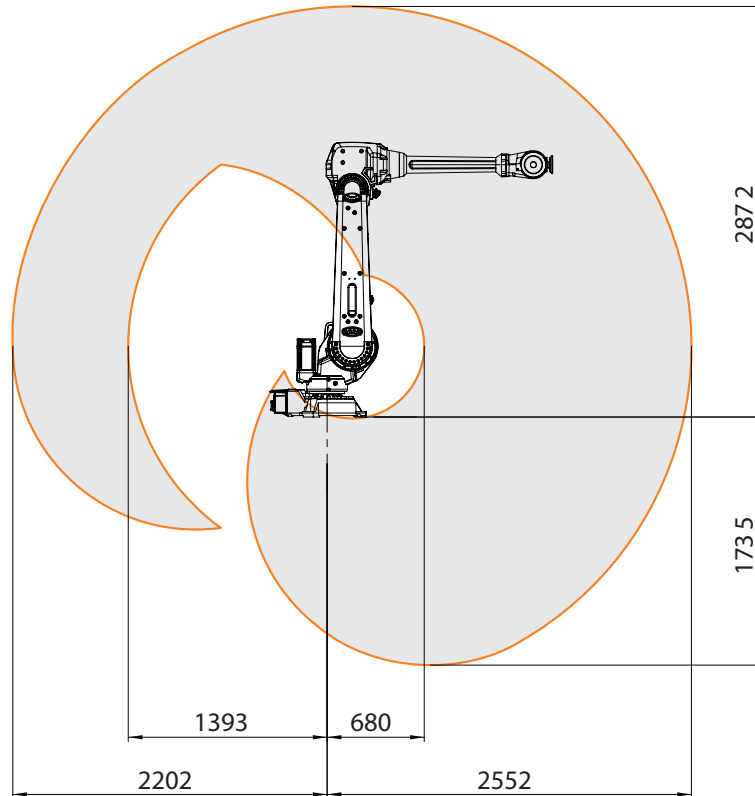


Abbildung 66: Der Arbeitsbereich des ABB IRB 4600 – 40 / 2.55 (alle Angaben in mm)

Neben der Apparatur wurde auch die Ansteuerung des Roboters evaluiert. Aufgrund der fortgeschrittenen Simulationsfunktionen erwies sich die von ABB entwickelte Steuerungssoftware RobotStudio<sup>203</sup> als ein für die Off- und Onlineprogrammierung sehr fortgeschrittenes Werkzeug.

### b) Mobiler Unterbau

Für die Entwicklung des mobilen Unterbaus mussten zahlreiche verschiedene Anforderungen beachtet und aufeinander abgestimmt werden. Im Vordergrund stand die maschinenseitige Flexibilität in der Fortbewegung zur Erstellung architektonischer Strukturen auf einer Baustelle.

<sup>203</sup> ABB Ltd, RobotStudio, <http://new.abb.com/products/robotics/de/robotstudio> (abgerufen am 11.08.2014)

Neben kürzeren Bewegungsabläufen, die wegen der eingeschränkten und teilweise unkoordinierten Platzverhältnisse auf einer Baustelle erforderlich sind, müssen überdies längere Transportwege für das gesamte Equipment eingeplant werden (Transport von Baustelle zu Baustelle). Hieraus resultiert eine weitere wichtige Bedingung, nämlich eine besonders kompakte und zugleich stabile Einheit aus Roboter und Plattform zu konstruieren. Beispielsweise muss die Einheit im zusammengefalteten Zustand durch eine Standardtüröffnung passen.

Die Firma Bachmann Engineering AG – Industriepartner des Forschungsprojektes *ECHORD: dimRob* – entwickelte in Zusammenarbeit mit der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation mehrere Lösungsalternativen für eine Basis, die alle den oben genannten Vorgaben entsprechen. Folgende Systeme wurden zur Auswahl ausgearbeitet: Palettenplattform, Hydraulikplattform, Spider Legs mit Raupe und Raupenfahrwerk mit Gelenkstützen.

#### *Palettenplattform*

Der erste Vorschlag für die Einheit beschränkte sich auf eine Einheit, die sich zwar gut transportieren lässt, sich aber nicht aus eigenem Antrieb fortbewegen kann. Die kompakte Plattform in der Größe einer genormten Industriepalette wird durch zusätzliche Gelenkstützen stabilisiert. Nachteilig ist, dass die Apparatur sich nur mithilfe einer anderen Maschine, beispielsweise eines Krans oder Gabelstaplers, fortbewegen und in eine andere Position versetzen lässt. Es handelt sich somit bei der Palettenlösung um eine starre Einheit, die für weiterführende Untersuchungen im Bereich der mobilen Robotik nicht geeignet ist.

#### *Hydraulikplattform*

Das Besondere bei dieser Lösung ist, dass sich die Plattform, auf die der Roboter montiert ist, kontrolliert hydraulisch in z-Richtung bewegen lässt. Der Vorteil ist eklatant: Der sechsachsige Roboter erhält eine weitere Achse, die den Arbeitsbereich der Maschine in der Höhe vergrößert. Wie im Fall der Palettenplattform kann sich diese Plattform jedoch nur mittels äußerer Kräfte versetzen lassen und ist daher für weitere Untersuchungen ebenfalls nicht geeignet.

### *Spider Legs mit Raupe*

Der Begriff „Spider Legs“ bezieht sich auf schon bestehende mobile Minikräne, die durch spezielle, sich der Umgebung anpassende Abstützungen stabilisiert werden.<sup>204</sup> Diese Stützen verleihen den Maschinen hohe Flexibilität und erlauben den Einsatz an schwierigen Orten. Zudem können die Kräne dank ihrer besonderen Abstützkonstruktion teilweise in der Höhenposition austariert und auf diese Weise exakt positioniert werden. Beweglich sind die Minikräne dank eines integrierten Raupenfahrwerks, das zugleich die Fortbewegung auf unebenem Gelände gewährleistet. Der Einsatzbereich dieser Maschinen erstreckt sich unter anderem auf Montage- und Transportarbeiten oder den Fensterbau. Gleichwohl wurde der sehr ambitionierte Ansatz, den Unterbau eines Minikrans mit einem Industrieroboter zu kombinieren, in Anbetracht mehrerer Faktoren nicht verfolgt. Zum einen hält die Mechanik der kleinen Plattform den Bewegungskräften eines Industrieroboters nur unzureichend stand, da sie nur für das Heben von Lasten ausgelegt ist. Die gewünschte Wiederholgenauigkeit, die zum Assemblieren diskreter Bauelemente notwendig ist, wäre unter dieser Voraussetzung nicht gewährleistet. Zum anderen sind die üblicherweise auf solchen Minikränen befindlichen robusteren Systeme für die im Rahmen dieser Arbeit projektierten Einsätze auf einer Baustelle zu massiv und hätten darüber hinaus den finanziellen Rahmen der zur Verfügung stehenden Mittel weit überschritten.

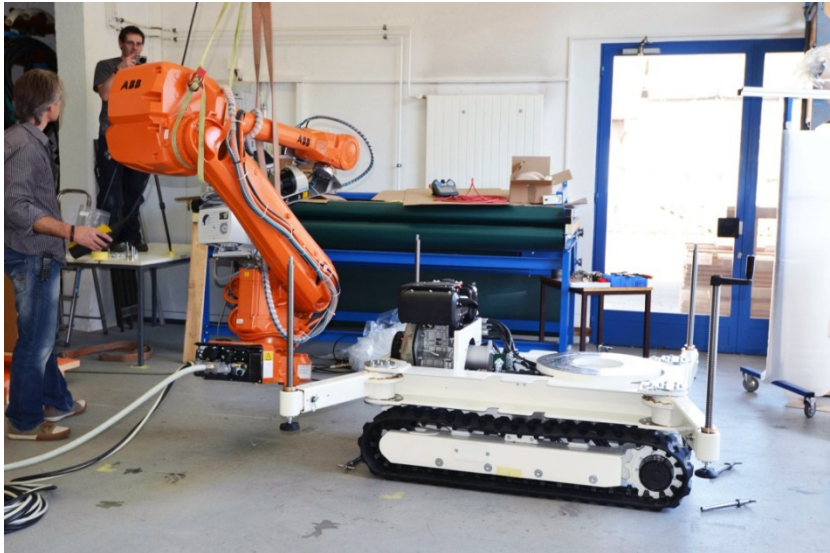
### *Raupenfahrwerk mit Gelenkstützen*

Das vierte und letztlich realisierte Konzept basiert auf dem Entwurf einer soliden Metallkonstruktion mit einem widerstandsfähigen Raupenfahrzeug (Abbildung 67). Zur ergänzenden Stabilisierung wurden einklappbare Gelenkstützen konstruiert, die den individuellen Platzsituationen einer Baustelle angepasst werden können. Sie verbessern nicht zuletzt die gewünschte Kompaktheit und Flexibilität. Der Antrieb der hydraulisch betriebenen Raupen erfolgt unabhängig über einen in das System integrierten Dieselmotor. Eine autonome Neupositionierung war wegen fehlender elektronischer Ansteuerung und Wegmessung nicht möglich. Auch ist die Kontrolleinheit für den

---

<sup>204</sup> Maeda Mini Cranes, <http://www.maedaminicranes.co.uk/> (abgerufen am 11.08.2014).

Roboter noch nicht in die Einheit integriert, sondern muss vorerst extern mitgeführt werden.



*Abbildung 67: Zusammenbau des Industrieroboters ABB – IRB 4600 und des motorbetriebenen Raupenfahrwerks („Hochzeit“)*

Unter diesen konstruktiven Planungsvoraussetzungen betragen die Abmessungen der mobilen Fabrikationseinheit im Transportzustand gesamthaft 1,40 m / 0,80 m / 1,50 m (Länge/Breite/Höhe) (Abbildung 68).



## In-situ-Fabrikation

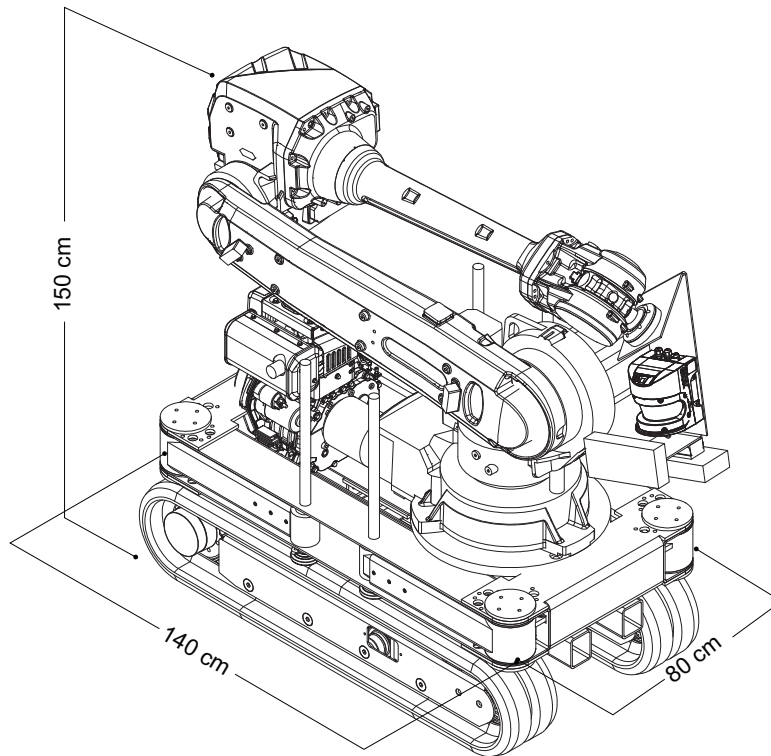


Abbildung 68: Die mobile Fabrikationseinheit ist von ihren Abmessungen her so konzipiert, dass sie in der Transportposition durch ein Standardtürformat passt

Im ausgefahrenen Zustand (Abbildung 69a) beeinflusst die Geometrie des Unterbaus den maximalen Baubereich des Roboters. Von Vorteil ist, dass die Basis des Roboters<sup>205</sup> erhöht auf einer Plattform sitzt. So kann der vertikale Arbeitsbereich der Anlage besser ausgenutzt werden, da der Arm aufgrund seiner Kinematik in der Lage ist, Punkte unterhalb seines Nullpunktes in der eigenen Basis anzufahren (siehe Diagramm Abbildung 66). Lage und Ausfahrlänge der Abstützungen bestimmen die Abstandsgrenze des Roboterarmes zur Einheit (Abbildung 69b). Wird die Abstandsgrenze nicht eingehalten, ist die *Selbstkollision* von Arm oder Werkstück mit dem Unterbau möglich.

<sup>205</sup> Mit der Basis des Roboters (Basis-Koordinatensystem) ist die untere Fläche des runden Befestigungsflansches gemeint, der vor der ersten Achse liegt. Der Mittelpunkt dieses Flansches kann als Werksnullpunkt bezeichnet werden. Bei einer In-situ-Fabrikationsanlage handelt es sich hinsichtlich dieser Basis aber nur um eine theoretische Bezugsfläche, da der Boden auf einer Baustelle meist uneben ist. Die Roboterbasis ist somit nicht unbedingt mit der Werksobjektbasis gleichzusetzen, die nach Versetzung neu eingemessen werden muss.

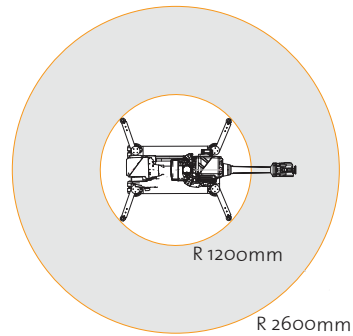


Abbildung 69a und b: a) die komplette Anlage in einem ausgefahrenen Zustand; b) der Baubereich der mobilen Fabrikationseinheit in der Draufsicht

### c) Sensorik

Wie bereits in Kapitel 2.5 *Die Steuerung und Regelung maschineller Bauprozesse* angeführt, ist ein Austausch mit der Umwelt mittels einer Maschine, die ohne technische Sinnesorgane ausgestattet ist, nicht möglich. Da aber die Interaktion mit der Umgebung und dem Menschen mit Blick auf die an die Arbeit gestellten Anforderungen unbedingt erforderlich ist, wurde die vorgestellte mobile Einheit mit unterschiedlichster Sensorik ausgerüstet. Die Ausstattung wurde vorerst bewusst minimal gehalten, da eine Untersuchung völlig autonomer Systeme nicht vorgesehen war. Ziel war vielmehr, mit kostengünstiger Hardware eine große Bandbreite an Fabrikationskonzepten abzudecken. Daher wurde darauf geachtet, dass die verwendeten Sensoren die Prinzipien der – gemäß Einteilung von Hesse und Schnell<sup>206</sup> – taktilen, elektronischen, optisch-visuellen und akustischen Messungen erfüllen können (Tabelle 2).

---

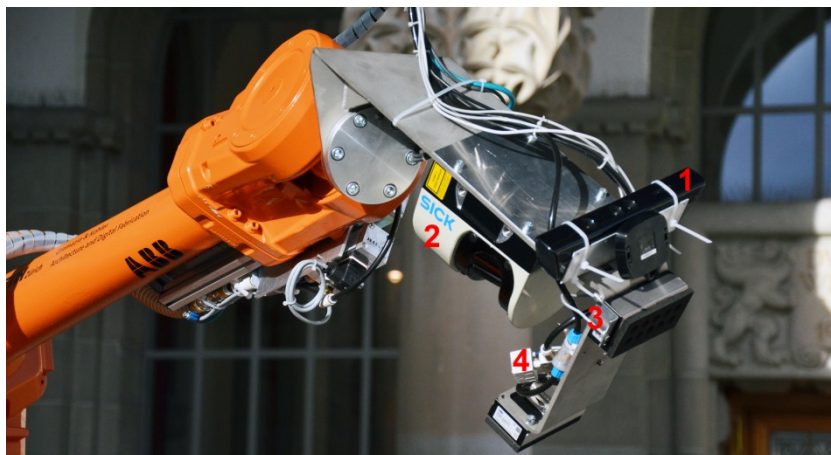
<sup>206</sup> Hesse, Stefan, und Gerhard Schnell. *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion – Ausführung – Anwendung*. 5. Aufl., Wiesbaden: Vieweg + Teubner/Springer, 2011, S. 15.

## In-situ-Fabrikation

Prinzip	taktil		elektronisch		optisch/visuell			akustisch
Sensortyp	Durchfluss-Sensoren (SMC)	mechanische Taster	IMU (Inertial Measurement Unit) 6DOF	iPhone-Gyroskop	2-D-Laser-Scanner (Sick LMS 500)	3-D-Kamera (Kinect XBOX 360)	optische Miniatursensoren (Contrinex)	Spracherkennung (Kinect XBOX 360)
digital	x						x	
analog		x	x	x	x	x		x

*Tabelle 2: Ausstattung der mobilen Robotereinheit mit Sensorik (Einteilung nach Hesse/Schnell, vgl. Anm. 116)*

Die Implementierung der einzelnen Komponenten erfolgte in einer speziell für das Projekt entwickelten Kombinationshalterung, die Platz für Sensoren und Greifer bereitstellte (Abbildung 70).



*Abbildung 70: Implementierung verschiedener Sensortypen in das kompakte Greifersystem: 1) 3-D-Kamera, 2) Laserscanner, 3) Miniatur-Lichtschranke, 4) Druckluftsensor*

Die notwendigen Toleranz- und Abstandsmessungen wie auch die Objekt- und Umgebungserkennung, die Mensch-Maschine-Interaktion und die Suchfahrten konnten mit diesem Equipment abgedeckt werden und bildeten die Grundlage für die Einführung von Feedbacksystemen. Beispiele hierfür werden im Zusammenhang mit den Fallbeispielen aufgeführt.

*d) Endeffektor*

Nicht zuletzt wegen variierender Materialien und wechselnder geometrischer Formen sollten bei den Versuchen der In-situ-Fabrikation viele unterschiedliche Herstellungskonzepte zur Anwendung kommen. Es bestand der Anspruch, ein möglichst flexibles System zu konstruieren, das eine hohe Anzahl unterschiedlicher Experimente ermöglichte, ohne dass nachträgliche Modifikationen an der Maschine vorgenommen werden müssten. Die Auswahl einer universellen Greiferlösung zur Abdeckung möglichst vieler Prozesse war folglich essenziell. Die Entscheidung fiel auf zwei Vakuumgreifer, die jeweils in horizontaler und vertikaler Ausrichtung an einer Multifunktionshalterung angebracht wurden (Abbildung 71). Eine ungleiche Ausrichtung hat den Vorteil, dass die Bauteile sowohl von oben als auch von der Seite gegriffen werden können, ohne dass sich dadurch für den Werkzeugmittelpunkt<sup>207</sup> die Koordinatenebene ändert. Dies minimiert die Komplexität der Roboterbewegungen und wendet Konflikte durch unnötige Umorientierungen ab.<sup>208</sup> Ein weiterer Vorteil der kompakten Vakuumgreifer ist, dass der Unterdruck verhältnismäßig große Ansaugkräfte erzeugt und dadurch eine Vielzahl verschiedener Materialien gehoben werden kann. Betrieben werden die Greifer über

---

<sup>207</sup> In der Robotik wird der Werkzeugmittelpunkt oftmals als TCP (Tool Center Point) bezeichnet, der sich meist im letzten Glied des Roboterarmes befindet (Endeffektor). Zur Erleichterung der Handhabung und der Roboterprogrammierung können alle Bewegungen relativ zu diesem Punkt eingestellt werden.

<sup>208</sup> Mögliche Konflikte können Kollisionen der Apparatur mit sich selbst oder Singularitäten darstellen. Bei Singularitäten handelt es sich um Ausnahmesituationen, in denen es aufgrund kollinearer Achsstellungen zu Mehrdeutigkeiten oder zu Divisionen durch null kommen kann.

## In-situ-Fabrikation

eine in das System eingebundene Vakuumpumpe<sup>209</sup>, die als I/O<sup>210</sup> über die Programmierung angesteuert wird.

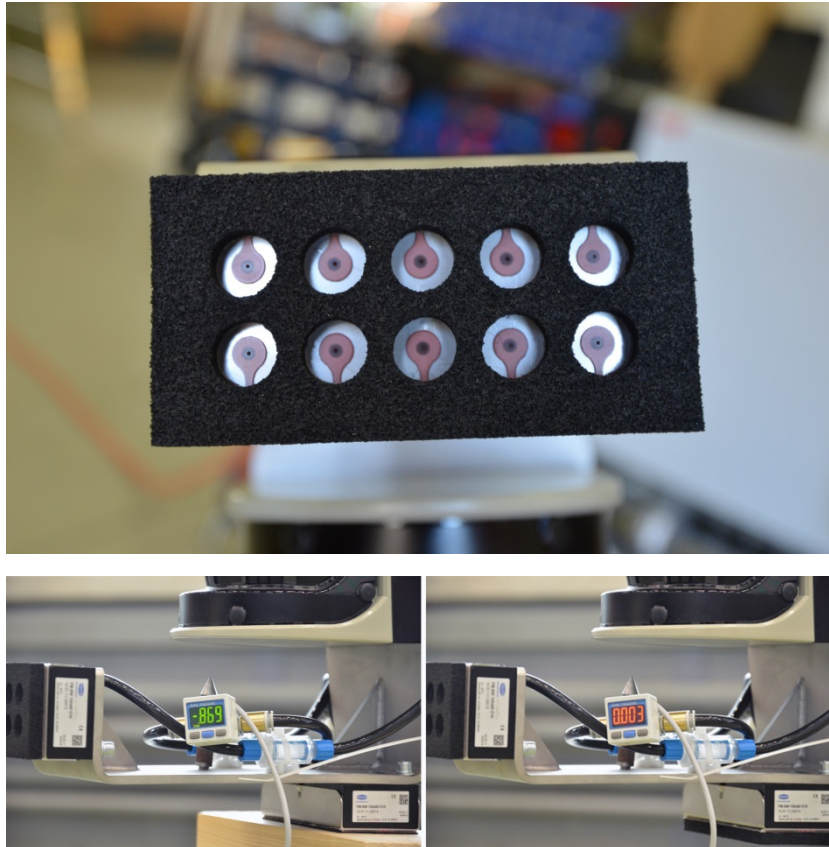


Abbildung 71a und b: a) Die Untersicht eines Vakuumgreifers; b) Vertikaler Vakuumgreifer belastet (links) und unbelastet (rechts)

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass ein gleichermaßen effektives wie komplexitätsminimiertes Forschungsequipment (Abbildung 72) für das Forschungsprojekt *ECHORD: dimRob* und für die Experimente II gefunden werden konnte.

<sup>209</sup> Die kompakte Vakuumpumpe (Trockenläufer-Pumpe mit konstanter Saugleistung) ist auf der mobilen Anlage montiert und kann über die Robotersteuerung kontrolliert aktiviert und deaktiviert werden.

<sup>210</sup> I/O steht für die englischen Begriffe *Input* (Eingabe) und *Output* (Ausgabe). Externe Hardwarekomponenten können sowohl als digitales wie auch als analoges Ein- oder Ausgabegerät an die Robotersteuerung angeschlossen werden. Bei der Vakuumpumpe handelt sich um ein digitales Ausgabegerät, da nur das Ein- und Ausschalten über den Robotercode gesteuert werden muss (gleichzusetzen mit Greifen oder Nichtgreifen).

## Volker Helm

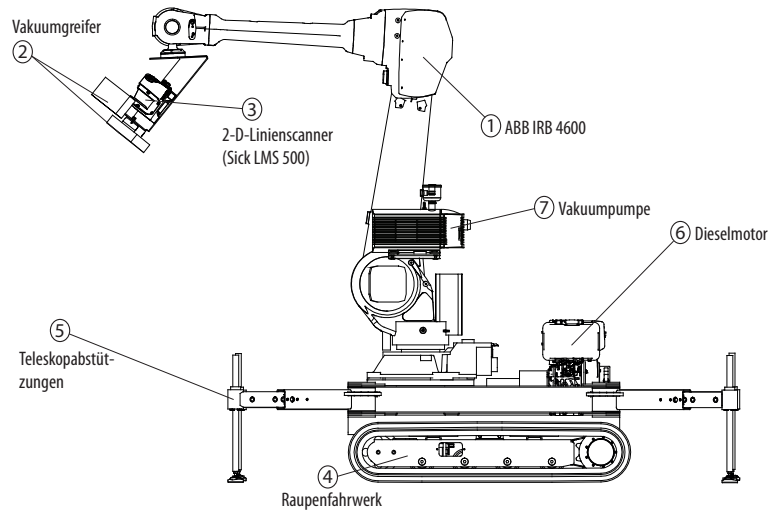


Abbildung 72: Die mobile Versuchsanlage und deren grundlegende Komponenten im Überblick

Der Einsatz der Komponenten wird aufgezeigt und der Nutzen des Equipments näher untersucht. Ein wichtiger Aspekt ist, dass die Bauteile nicht ausschließlich als einzelne und unabhängige Geräte gesehen, sondern ihr Zusammenspiel und die Vernetzung unterschiedlicher Kapazitäten zu einer Einheit betrachtet werden.

### 4.4.2 Toleranzen und Scanprozesse

Fast jeder Einsatz auf einer Baustelle ist einzigartig in Bezug auf Gebäudegröße, Materialien und die daraus resultierenden Toleranzen. Die Zielsetzung des ersten In-situ-Fabrikations-Experimentes war daher die Untersuchung eines stabilen Assemblierungsvorganges im Maßstab 1 : 1 unter Einbezug von Materialtoleranzen. Diesem Ziel angemessen wurde ein Materialkonzept entwickelt, das diskrete Holzelemente mit markant variierenden Höhen vorsah (Abbildung 73).

## In-situ-Fabrikation

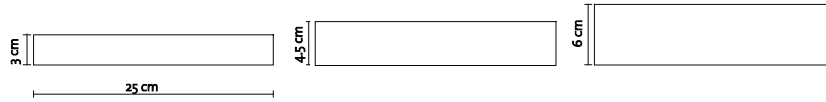


Abbildung 73: Das Materialkonzept für die Toleranz- und Scanexperimente sieht Holzblöcke vor, die in drei verschiedenen Höhen ausgebildet sind

Basierend auf diesen Holzelementen wurde eine über Parameter gesteuerte Schichtung geplant, deren geometrisches Verhalten in Anbetracht der jeweiligen Maßunterschiede nicht vorhersehbar war. Um die Auswirkungen solcher unvorhersehbaren Abweichungen über mehrere Reihen beurteilen zu können, wurde vorher im Computer eine Schwerkraftsimulation angefertigt (Abbildung 74).

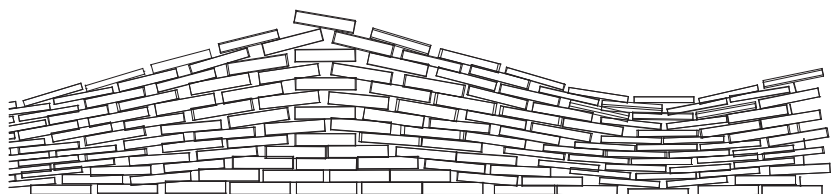
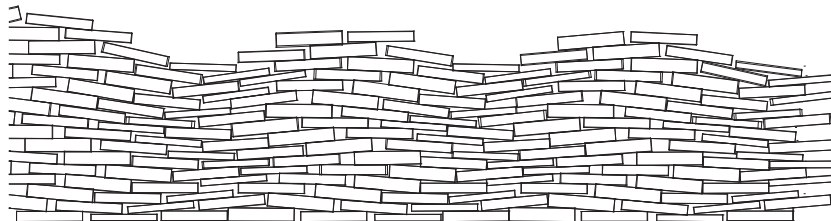
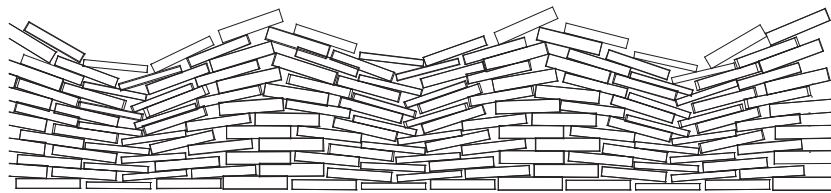


Abbildung 74: Simulation fallender Elemente mit unterschiedlichen Höhen

Ein roboterbasierter Aufbau solcher Strukturen wäre ohne Rückführung der aufaddierten Toleranzen nicht möglich. Nach wenigen Reihen gäbe es eine Kollision zwischen dem Fabrikationswerkzeug und dem schon



verbauten Material, da dem System die Position der unteren Reihe nicht bekannt ist. Ähnliche Anforderungen, wie sie dieses Beispiel veranschaulicht, sind auf einer Baustelle zu erwarten, wenn ein Materialaufbau digital produziert werden soll. Auch dort können unerwartete Veränderungen der Umgebung auftreten, auf die automatisiert reagiert werden muss. Genau an diesem Punkt setzt die Sensorik als technisches Sinnesorgan an. Auftretende Abweichungen werden erkannt und in die weitere Aufbau-logik einberechnet.

Eine reale Umsetzung erfuhr dieser Prozess im Projekt *Stratifications*<sup>211</sup> im Rahmen der Konferenz *FABRICATE 2011* in London. Die geschichtete und zirkulierende Struktur des *Stratifications*-Projektes wurde gesamthaft mit 1.330 Holzelementen, die jeweils drei verschiedene Höhen aufwiesen, generiert. Nach der generativen Design- und Datenerstellung erfolgte die Produktion mit dem Roboter. Noch während des Aufbauprozesses wurden die Abweichungen in jeder gelegten Reihe über einen Laserscanner aufgenommen und an die Kontrollsteuerung zurückgesendet. Im anschließenden Datenverarbeitungsprozess wurden die Umorientierung und die Repositionierung des Werkzeugmittelpunktes für die nachfolgenden Bauteile berechnet, die dann in angepasster Winkel- und Höhenstellung ohne Kollision auf die schon verlegte Reihe aufgesetzt werden konnten. Für das Experiment lassen sich entsprechend vier Arbeitsschritte (Abbildung 75) wie folgt festhalten: 1) Design- und Datenerzeugung, 2) Umgebungserfassung, 3) Datenanpassung gemäß den Material- und Aufbautoleranzen und 4) adaptive Assemblierung.

---

<sup>211</sup> Das Projekt *Stratifications* wurde 2011 auf der *FABRICATE*-Konferenz in London mit der Unterstützung von der Bachmann Engineering AG realisiert. Weitere Informationen zu diesem Projekt finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*.



## In-situ-Fabrikation

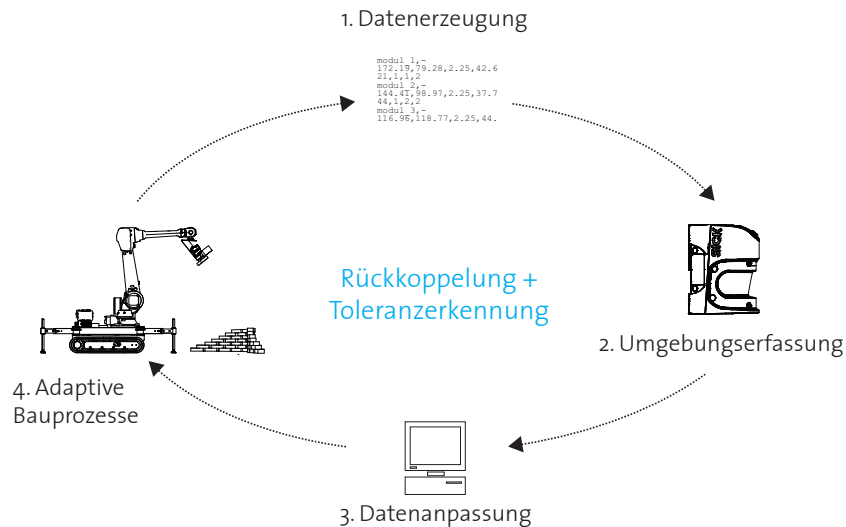
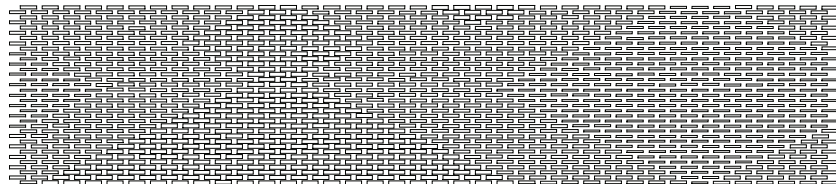


Abbildung 75: Arbeitsschrittdiagramm für die Toleranzerkennung und Rückkopplung der Installation Stratifications

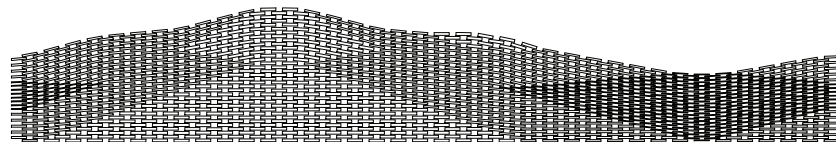
Der erste Arbeitsschritt, die Design- und Datengenerierung, erfolgte über ein parametergesteuertes Skript. Die unterschiedlich großen Elemente wurden zuerst kontrolliert über ein Graustufenpixelbild in einem festgelegten Raster im CAD positioniert.<sup>212</sup> In einer anschließenden Computersimulation wurde der „freie Fall“, das heißt die Schichtung ungleicher Elemente, dieser Konfiguration virtuell aufgebaut und somit die zukünftige gebaute Formation digital annäherungsweise nachgeahmt. Zwecks besserer Kontrollmöglichkeit bezüglich Entwurf und Umsetzung durch den Roboter stellte die Ausgabe des Skriptes die Simulation zum einen zweidimensional als Abwicklung und zum anderen dreidimensional als fertige Anordnung dar (Abbildung 76). Gleichzeitig mit der Erzeugung der visuellen Daten fand auch eine Analyse für die maschinelle Baubarkeit statt. Als ein umsetzbares Design gefunden war, wurden alle benötigten Parameter automatisiert für den Robotercode erzeugt, der direkt in die

<sup>212</sup> Die Auflösung des Pixelbildes repräsentiert die Anzahl der Elemente. Beispiel: Wenn die Bildgröße 50 Pixel auf 20 Pixel beträgt, werden gesamthaft 1 000 Elemente berechnet. Die Farbtiefe jedes einzelnen Pixels (8 Bit Graustufen) bestimmt die Auswahl des Steinblocks (3 mm, 4 mm oder 6 mm Materialstärke). Somit dient ein über das Skript eingelesenes Bildmuster als kontrolliertes Einstell- und Designmedium.

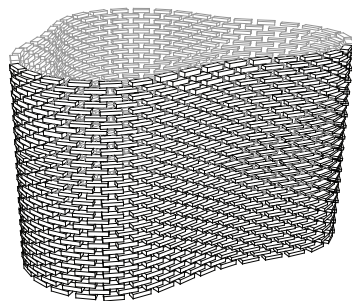
Programmierungsumgebung der mobilen Einheit eingebunden werden konnte.<sup>213</sup>



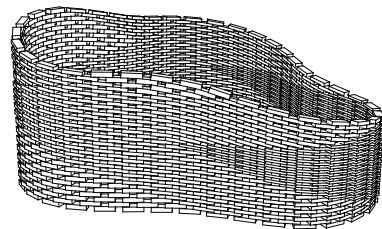
(a)



(b)



(c)



(d)

*Abbildung 76: a (2-D-Abwicklung): Die Ausgangskonfiguration der unterschiedlichen Elemente wird über ein Graustufenpixelbild kontrolliert und positioniert; b (2-D-Abwicklung): Die Schichtung der ungleichen Elemente wird simuliert; c, d (3-D): Die Schichtung der ungleichen Elemente wird zur Überprüfung der Struktur dreidimensional simuliert*

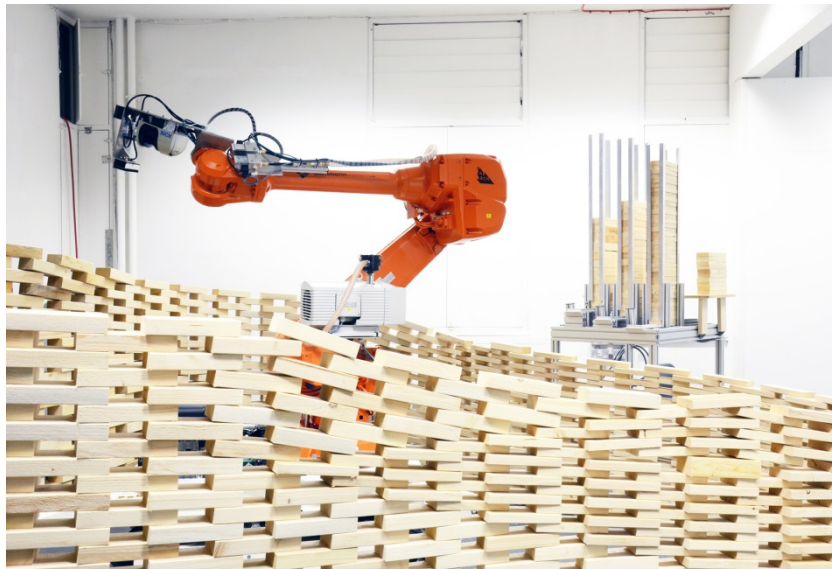
Der Umgang mit Material- und Aufbautoleranzen und die sich daraus ergebende Rückkopplung waren der zentrale Gegenstand dieses

---

<sup>213</sup> Für die Ansteuerung von ABB-Industrierobotern wurde die höhere Programmiersprache RAPID entwickelt. Die nötigen Programmierbefehle und Raumkoordinaten, die zur Erstellung der Struktur *Stratifications* nötig waren, wurden direkt aus der CAD-Umgebung in das RAPID-Format umgewandelt und exportiert.

## In-situ-Fabrikation

Experimentes. Die aus der Datengenerierung entstandene Idealmaßplanung musste mit der abweichenden realen Bausituation abgeglichen werden. Hierzu war das Scannen<sup>214</sup> der einzelnen Steinreihen notwendig (Abbildung 77).



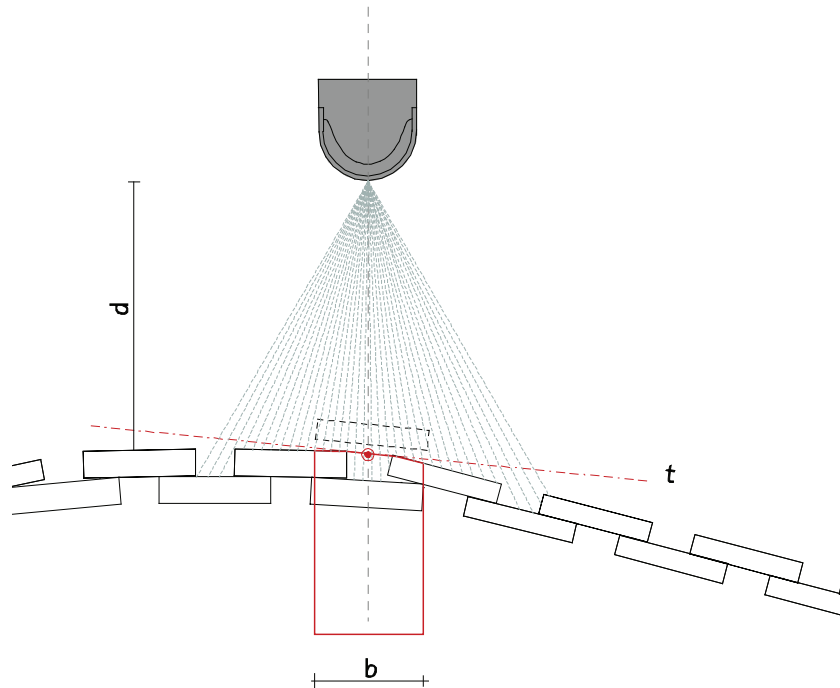
*Abbildung 77: Nach Ablegen der unterschiedlichen Holzelemente beginnt nach jeder Reihe der erforderliche Scanprozess*

Das System erhielt dadurch die Informationen über Verschiebungen, Höhenänderungen und Winkelabweichungen gegenüber dem Planungsmaß (Abbildung 78). Mit diesen Informationen wurden Orientierung und Positionierung für die nächste Reihe ermittelt und automatisch an die Steuerung gesendet. Ein nachträgliches manuelles Eingreifen war nicht erforderlich, sodass der Aufbauprozess ohne Unterbrechungen stattfinden konnte. Anhand des Experimentes *Stratifications* wurde deutlich, dass die mobile Einheit aufgrund ihrer Ausstattung mit Sensorik a) spontan auf nicht vorhersehbare und b) auf sich verändernde Bedingungen eingehen kann.

---

<sup>214</sup> Für den Scanprozess wurde der Lasermesssensor Sick LMS 500 verwendet. Sick AG. Lasermesssensoren der Produktfamilie LMS5xx. Waldkirch, 2011; als PDF unter Sick AG, <https://www.mysick.com/saqqara/pdf.aspx?id=im0037513> (abgerufen am 11.08.2014).

## Volker Helm



*Abbildung 78: Die Sollmaßplanung wird mit der realen Situation verglichen. Abweichungen beeinflussen die Orientierung beim Aufbau der folgenden Reihe ( $b$  = neu ermittelte Position,  $d$  = neuer Abstand,  $t$  = neuer Neigungswinkel).*

Die roboterbasierte Assemblierung der Holzelemente erfolgte durch die implementierten Vakuumgreifer. Ein mit Luftdruck betriebener Materialspender, der für die jeweils unterschiedlichen Bauteilhöhen mit drei Kammern versehen war, stellte die Zufuhr der Holzblöcke über einen längeren Zeitraum sicher (Abbildung 79).

## In-situ-Fabrikation



*Abbildung 79: Assemblierung der Holzelemente mit automatisierter Materialzufuhr*

### 4.4.3 Mensch-Maschine-Interaktion

Da die Fabrikationseinheit direkt auf einer Baustelle eingesetzt werden soll, muss sie in der Lage sein, unbekannte Arbeitsbereiche zu erfassen und auf sie zu reagieren. Hindernisse, vorhandene Strukturen oder auch Menschen müssen von dem System erkannt werden, damit eine positionsgetreue, kollisions- und unfallfreie Produktion gewährleistet ist. Durch den Gebrauch von integrierter 2-D- und 3-D-Scantechnologie können einfache, sich aus dieser Umgebungserfassung ergebende Aufgaben gelöst werden. Als Herausforderung stellt sich aber der Einsatz solcher Technologien für komplexere Zielsetzungen dar, beispielsweise für die Echtzeitaufnahme von sich verändernden Umgebungen, die Objekterkennung und den Umgang mit nicht vorhersehbaren Geschehnissen. Hier bietet sich die autonome kognitive Robotik an, zu der bereits zahlreiche Forschungen angestellt und veröffentlicht wurden.<sup>215</sup>

In der architektonischen In-situ-Fabrikation, die vorwiegend außerhalb der Laborumgebung stattfindet, würde ein völlig autonom agierendes

---

<sup>215</sup> Als Beispiel ist hier das Institute of Robotics and Intelligent Systems der ETH Zürich aufzuführen; <http://www.iris.ethz.ch/> (abgerufen am 11.08.2014).

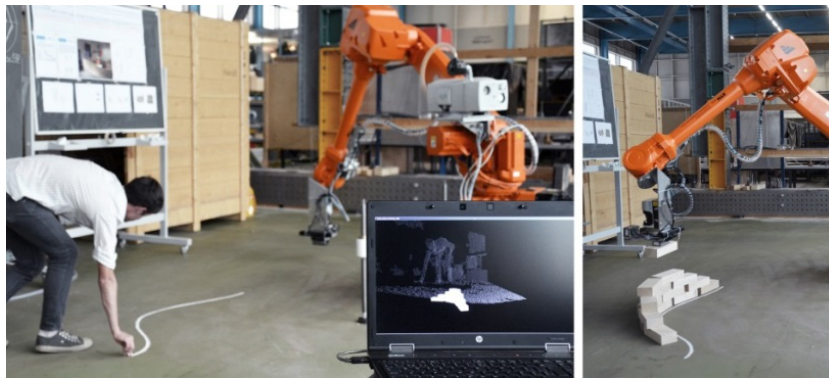
System allerdings einen sehr großen technischen Aufwand bedeuten. Gleichwohl könnten selbst mit modernster Hard- und Software bei Weitem nicht alle vorhersehbaren und unvorhergesehenen Aufgaben auf einer Baustelle durchweg ohne Einwirkung des Menschen maschinell abgehandelt werden. Es stellt sich daher die wesentliche Frage, ob ein gänzlich autonomes System für den Gebrauch auf einer Baustelle überhaupt notwendig oder erwünscht ist. Der Aufwand sollte dem Nutzen unter bestimmten Erwägungen gegenübergestellt werden. Beispielsweise ist zu überdenken, ob für die Anlage schwierig zu erfassenden Aufgaben durch menschliche Anweisungen tatsächlich vereinfacht und damit abgekürzt werden können. Auch ist das Erfordernis, dass globale Positionen selbstständig erkannt werden, zu überprüfen. Und nicht zuletzt ist zu fragen, ob die mobile Einheit – im Fall ihres Einsatzes in einem mehrgeschossigen Rohbau – das Stockwerk oder die Raumnummer selbstständig erkennen muss. Derartige Informationen wären dem System leicht manuell zu übermitteln, ohne dass dafür zusätzliche Sensorik aktiviert werden müsste.

Genau um diese Kommunikation zwischen Maschine und Mensch geht es in dem folgenden Experiment, das mehrere Lösungsansätze aufzeigt. Untersucht wurden mögliche Schnittstellen für die Übermittlung menschlicher Handlungsanweisungen, die von dem Roboter abgehandelt werden sollten. Dabei war es von besonderem Interesse, möglichst einfache und intuitive Vorgehensweisen, die auch für eine reale Baustellensituation geeignet sind, zu erkunden. Angestrebt waren interaktive Steuerungsmethoden, für die keine speziellen Programmier- und Roboterkenntnisse vorhanden sein müssen. Eine direkte Vor-Ort-Programmierung, besonders für eine flexible Just-in-time-Fabrikation, ist sehr aufwendig und nur durch Fachpersonal zu bewerkstelligen. Aus diesem Grund wurden für die programmierlose Roboterkommunikation zwei grundsätzliche Experimente der Mensch-Maschine-Interaktion entwickelt: die Kooperation durch Gestikulation und die unterstützende Bestimmung von Werkobjekten.

## In-situ-Fabrikation

### *Kooperation durch Gestikulation*

Die in dem System integrierte 3-D-Kamera<sup>216</sup> ermöglicht eine Datenaufnahme (Punktwolke) der Umgebung. Mit zusätzlichen Programmierbibliotheken<sup>217</sup> können Objekte anhand ihrer Farbe oder Geometrie erkannt und vermessen werden. Neben solchen statischen Gegenständen vermag das Kamerasystem aber auch menschliche Gesten und Bewegungen in Echtzeit zu erkennen. Hier setzte das Experiment an: Ziel war es, dem Roboter seinen Arbeitsbereich über Handbewegungen zu vermitteln (Abbildung 80).



*Abbildung 80a und b: Das interaktive 3-D-Scansystem nimmt Handbewegungen in einem virtuellen 3-D-Modell auf und wandelt sie in Positionsinformationen für die Roboterfabrikation um*

Die Vorgehensweise sollte aufzeigen, dass variierende Produktionsregeln in Echtzeit und ohne die Neucodierung des eigentlichen Prozesses umsetzbar sind. Dies bedeutet, dass das gesamte System von einer ständigen Interaktion mit der physischen Umgebung (dem Menschen) beeinflusst wird. Demonstriert wurde das Experiment als

---

<sup>216</sup> Das hier verwendete System ist die von Microsoft und Primesense entwickelte 3-D-Kamera Kinect, die als Eingabegerät für die Spielekonsole Xbox 360 eingesetzt wurde. Unter der Verwendung eines Tiefensensors, einer Infraroteinheit, einer RGB-Kamera sowie von Mikrofonen ist diese Hardware in der Lage, dreidimensionale Umgebungsmodelle in Echtzeit zu erstellen. Zusätzlich kann die Kamera Gesten, Bewegungen und Sprache erkennen. Im Bereich der Videospieleanwendung kann ein Benutzer beispielsweise über Bewegungen oder Sprache Spielfiguren steuern.

<sup>217</sup> Als Beispiel ist an dieser Stelle die freie Programmierbibliothek OpenCV zu nennen, die auch für verschiedene Experimente in der In-situ-Fabrikation genutzt wurde; OpenCV SourceForge, <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/> (abgerufen am 11.08.2014).



interaktiver Prozess (Abbildung 81) auf den Zürcher Wissenschaftstagen *Scientifica 2011*.<sup>218</sup> Die Zuschauer der Ausstellung hatten die Möglichkeit, während eines Fabrikationszyklus im Maßstab 1 : 1 in den Produktionsprozess einzugreifen. Mit Kreide konnte ein freies Liniensegment auf den Boden gezeichnet werden. Über die 3-D-Kamera wurde während des Zeichenvorganges die Hand erkannt, deren Bewegung gespeichert (Abbildung 82) und diese in einer CAD-Umgebung visualisiert. Nach einer entsprechenden automatischen Anpassung der Datenverarbeitung und nach Überprüfung der Erreichbarkeit des Roboterarms wurden entlang der gezeichneten Linie Steinreihen produziert.

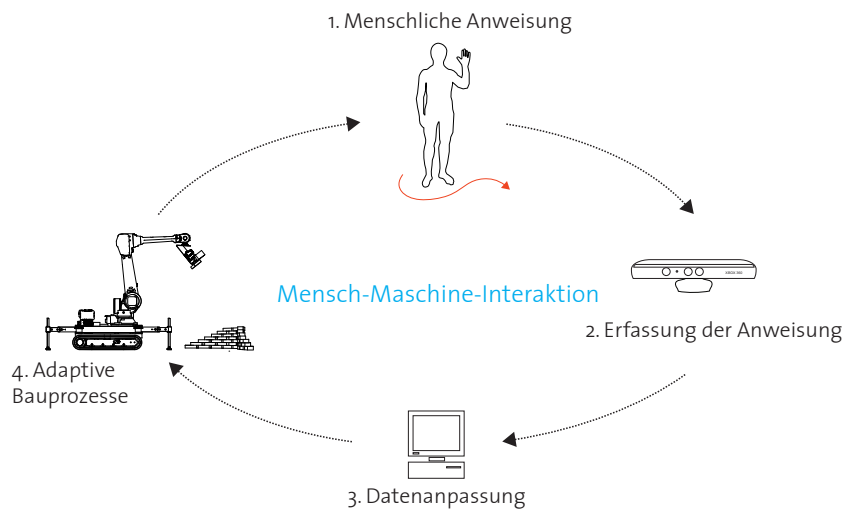


Abbildung 81: Arbeitsschrittdiagramm für den Demonstrator der Mensch-Maschine-Interaktion

<sup>218</sup> Weitere Informationen zu dem Projekt *The Endless Wall* finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*.



## In-situ-Fabrikation



*Abbildung 82: Über die am Roboter installierte 3-D-Kamera konnten menschliche Bewegungen aufgenommen und gespeichert werden*

Im Rahmen der *Scientifica 2011* wiederholte sich dieser Vorgang in einer Schleife mehrmals pro Tag: In einem Viertelkreis um den Roboter herum wurde eine Ausgangsstruktur aufgebaut; mithilfe der Freiformlinie als Kommunikationsmittel wurde der Maschine der weitere schlangenförmige Anbau dieser Ausgangssituation angezeigt. Nach Abschluss des Datenverarbeitungsprozesses wurden die hinteren Elemente der bereits gebauten Struktur von dem am TCP des Roboters angebrachten Vakuumgreifer entnommen und an die neue vordere Position angesetzt (Abbildung 83).

## Volker Helm

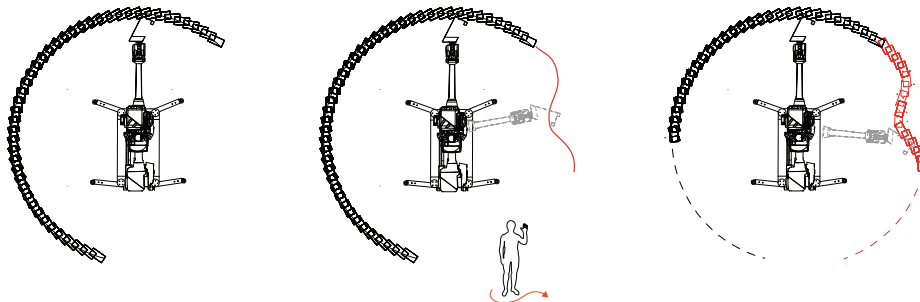


Abbildung 83: a) die aufgebaute Ausgangssituation; b) die aufgenommene menschliche Bewegung; c) die neue, von dem Roboter positionierte Formation

Anhand der um die Maschine „herumwandernden“ Formation ließen sich unterschiedliche Bewegungen erproben. Um einen durchgängig stabilen und kollisionsfreien Verlauf zu gewährleisten, musste die absolute Höhe der abgelegten Steine vermessen werden. Die Höheninformationen waren aufgrund der sich aufaddierenden Materialtoleranzen rechnerisch nicht mehr vorhersehbar.

Mit diesem Experiment wurde nachgewiesen, dass von Industrierobotern hergestellte architektonische Bauteile durch menschliches Gestikulieren in ihrer Ausformulierung beeinflussbar sind. Eine programmierfreie Mensch-Maschine-Kommunikation ist mittels mit Sensorik ausgestatteter Maschinen ohne zusätzliche Eingabehardware möglich. Denkbare Einsatzgebiete für diese Technologie auf einer Baustelle sind die Detektion von Hindernissen, das Anzeigen oder Abgrenzen von Baubereichen, die Erfassung bestehender Strukturen und die sicherheitsrelevante Registrierung von Menschen und Bauteilen oder der Maschine.

### *Unterstützende Bestimmung von Werkobjekten*

Im Gegensatz zu dem ersten Experiment, bei dem die Sensorik mit der Maschine fest verbunden war, wurde in der nachfolgend dargelegten Untersuchung mit externer, vom Roboter losgelöster Sensorik gearbeitet. Während das Objekt (Mensch) bei einer Kooperation durch Gestikulation von einer Kamera erfasst und ausgewertet wird, bietet die externe Messeinheit die Möglichkeit, verschiedene Bezugssysteme ohne vorherige Objekterkennung zu erfassen. Die unterschiedlichen Ebenen im Raum können der Roboteranlage sensorgestützt schnell und

## In-situ-Fabrikation

intuitiv angezeigt werden. Eine Anwendung für dieses System wäre die automatisierte Einmessung von Werkobjekten<sup>219</sup>, deren eigene Basis oftmals von der Basis des Roboters abweicht. Besonders in einer toleranzbehafteten und unebenen Umgebung, wie sie auf einer Baustelle zu erwarten ist, hat die Orientierung von Werkobjekten einen hohen Stellenwert. So kann es vorkommen, dass die mobile Einheit infolge eines ungleichmäßigen Bodens schräg zu der zu bearbeitenden Stelle positioniert ist. Da die Einheit mit einem festgelegten Bezugssystem (Werksnullpunkt des Roboters) ausgestattet ist, müssen solche Lagedifferenzen erkannt und im weiteren Bauprozess mit eingerechnet werden.

Die Einmessung abweichender Bezugssysteme ist überwiegend von einem manuellen Vorgang geprägt. Da sich bei vielen industriellen Abläufen die Lage der Werkobjekte nicht verändert, findet das manuelle Einmessen zur Optimierung oder Automatisierung grundsätzlich jedoch nur einmal, und zwar bei Prozesseinrichtung, statt und bleibt deshalb weitgehend unberücksichtigt. Erst bei sich ständig ändernden Bedingungen<sup>220</sup> wird die sich wiederholende Überprüfung der eigenen Lage zum Werkobjekt wichtig. Das Einmessen über ein manuelles Anfahren von Punkten auf einer Ebene zur Erkennung der Werkobjektkoordinaten würde hier einen zu großen Zeitaufwand erfordern. Umgekehrt erscheint aber auch das vollautonome Erkennen von Objekten und ihrer Lage in einem undefinierten Raum sehr komplex und rechenaufwendig. Als Lösung für eine praktikable und effektive Ebenenbestimmung auf der Baustelle wird eine menschengestützte Kooperation mit der Maschine vorgeschlagen: Die von der Basis abweichenden Werkobjektkoordinaten werden vom Menschen aufgrund seiner Wahrnehmungsfähigkeit erkannt und mithilfe eines Gyroskops<sup>221</sup> vermessen. Dies hat mehrere positive Effekte. Zum einen ist das Scannen eines kompletten Raumes nicht

---

<sup>219</sup> Werkobjekte können Gegenstände sein, die der Roboter greifen und neu positionieren soll. Nicht immer haben Roboter und Werkobjekt die gleiche Ausrichtung des Koordinatensystems. Im Verhältnis zur Roboterbasis kann beispielsweise ein Werkobjekt schräg, rotiert oder über Kopf ausgerichtet sein (auch als Anwender- oder Objekt-Koordinatensystem bezeichnet). Diese unterschiedlichen Ausrichtungen müssen zwingend untereinander abgeglichen werden.

<sup>220</sup> Hierzu zählen beispielsweise dynamische Prozesse der mobilen Robotik (indoor und outdoor) und kooperierender Robotersysteme.

<sup>221</sup> Ein Gyroskop wird zur Bestimmung der Lage von Objekten eingesetzt.

mehr notwendig, und zum anderen erfolgt die Positionierung von Einmesspunkten intuitiv: Sie müssen nicht erst durch aufwendige Algorithmen gefunden werden. Für das Fallbeispiel wurde eine schiefe, rampenartige Ebene aufgebaut, die offensichtlich eine von der Ausrichtung des TCP abweichende Lage aufwies. Das Szenarium entsprach in Anbetracht toleranzbedingter Unebenheiten und der beabsichtigten schrägen Lage der Bauteile einer realen Baustellen-situation. Mit einem integrierten Smartphone-Gyroskop – gewissermaßen dem externen Sensor – wurden von dem kooperierenden Menschen zwei Messungen durchgeführt, indem er den Sensor direkt auf den Endeffektor beziehungsweise die schiefe Ebene anlegte, um die Lage von TCP und schiefer Ebene zu vermessen. Daraufhin ließ sich die Position beider Ebenen zueinander präzise bestimmen, und das am Roboter befestigte Werkzeug konnte die Orientierung der Rampe übernehmen und seine Stellung anpassen (Abbildung 84). Das neue Werkobjekt, die schiefe Ebene, wurde in der Roboterprogrammierung abgespeichert und war jederzeit abrufbar. Auf diese Weise konnten gezielte, vom Menschen ausgewählte Informationen aus dem Umfeld der Maschine übermittelt werden, ohne dass komplexe Objekt-erkennungsalgorithmen eingesetzt wurden.

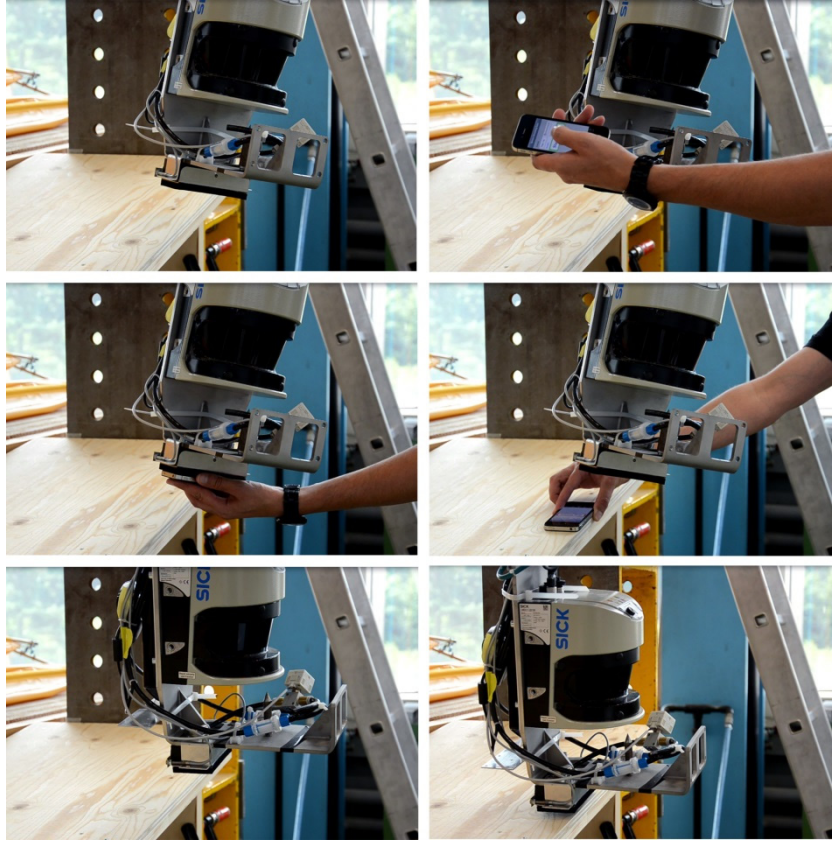


Abbildung 84: Einmessen einer schiefen Ebene über externe Sensorik in Kooperation mit dem Menschen (das Bildintervall entspricht ca. 5–10 Sekunden pro Aufnahme)

### 4.4.4 Lokalisation und Mobilität

Über die oben beleuchteten Aspekte Toleranzen und Mensch-Maschine-Interaktion hinausgehend sind die nachfolgenden Studien der Lokalisation und Mobilität der Fabrikationseinheit außerhalb der Laborumgebung gewidmet. Im Gegensatz zu fest verankerten Maschinen (zum Beispiel CNC-Maschinen oder für die Vorfertigung eingesetzte Industrieroboter) sind der Arbeitsbereich einer mobilen Anlage und die daraus resultierende Größe des Bauteils nicht begrenzt.<sup>222</sup> Eine kontinuierliche Herstellung „endloser“ Bauteile ist vorstellbar. Untersucht wurden daher Strategien, mit deren Hilfe das

<sup>222</sup> Kohler, Matthias. „Aerial Architecture.“ *Log 25, Reclaim Resi[lience]stance // .....R<sup>2</sup>* (2012): 23–30.

System seine eigene veränderbare Position in Bezug auf bereits vorhandene Strukturen erkennt.

Die Experimente zur Lokalisierung und Neupositionierung wurden in einer Tiefgarage der ETH Zürich durchgeführt, um die räumliche Situation einer Baustelle zu simulieren. Wesentliche baustellenähnliche Merkmale wie die eingeschränkte Deckenhöhe oder der leicht schräge Boden ermöglichten realitätsnahe Untersuchungen. Der Einfluss variierender Umgebungsparameter auf die Produktionsmethodik der mobilen Robotereinheit während des gesamten Prozesses war ebenfalls wichtig. Um diese neuartigen Ansätze umfassend erforschen und aufzeigen zu können, wurde mit Studierenden der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation das Projekt *Die fragile Struktur*<sup>223</sup> entwickelt. Neben der roboterbasierten Assemblierung von schmalen diskreten Holzelementen zu einem komplexen, nicht standardisierten Konstruktionssystem ließ sich anhand der fragilen Struktur die In-situ-Fabrikation in einem architektonischen Maßstab demonstrieren. Angesichts des Forschungsschwerpunktes, der sich auf die Mobilität auf einer Baustelle richtet, sollte die additive Herstellung der fragilen Struktur sogar um ein Vielfaches größer ausfallen als die Abmessungen der Baumaschine (Abbildung 85).

Die Schritte zu der Konstruktion waren in folgende Stufen unterteilt: 1) Prozessentwicklung, 2) Konstruktionssystem, 3) Objekterkennung, Lokalisierungstechnik und Neupositionierung sowie 4) In-situ-Fabrikation.

---

<sup>223</sup> Weitere Informationen zu dem Projekt *Die fragile Struktur* finden sich in Kapitel 7.5 *Projektverzeichnis*.

## In-situ-Fabrikation



*Abbildung 85: In-situ-Fabrikation der fragilen Struktur. Über 1 000 diskrete Holzelemente wurden direkt vor Ort klebefrei assembliert*

### *1) Prozessentwicklung*

Am Anfang eines komplexen digitalen Fabrikationsprozesses steht die algorithmisch beschriebene Prozess- und Designentwicklung unter Berücksichtigung der räumlichen und strukturellen Rahmenbedingungen.<sup>224</sup> Im Rahmen eines Lehrprojektes an der ETH Zürich war es die Aufgabe der Studierenden, sich in einem ersten Schritt mit der Eigenstabilität von robotergestützten additiven Prozessen zu beschäftigen.

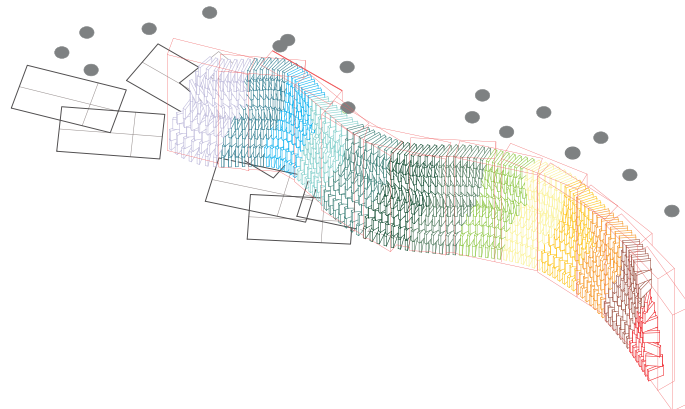
Unter Verwendung einer Vielzahl diskreter Elemente entstanden unterschiedliche Prototypen, mit deren Hilfe Rückschlüsse sowohl auf die Gesamtstabilität als auch auf die einzelnen Fabrikationsschritte gezogen werden konnten. Die in diesen Vorstudien erarbeiteten Entwürfe im Modellbaumaßstab ließen sich von den Studierenden unmittelbar mithilfe kleiner stationärer Roboter umsetzen. Das übergeordnete Ziel dieser Übung bestand darin, die gewonnenen Informationen aus der Modellbauphase in einen baumaßstäblichen In-situ-Fabrikationsprozess zu überführen.

---

<sup>224</sup> Siehe Kapitel 2.2 *Algorithmen in der Architektur*.



Hierbei erwiesen sich der Maßstabswechsel sowie der Sprung von einem festverankerten zu einem mobilen System als zentrale Herausforderungen. Während in der ersten Phase die strukturelle Entwicklung des Entwurfes im Vordergrund stand, galt die Aufmerksamkeit in der darauffolgenden Umsetzungsphase der Einbeziehung wichtiger technischer Aspekte in das Fabrikationssystem. So werden bereits während der Generierung der CAD-Daten neben den Positionskordinaten der einzelnen Bauteile auch die Informationen bezüglich der kinematischen Erreichbarkeit des Endeffektors im Raum sowie die der Anzahl der Neupositionierungen beziehungsweise deren genauen Lage erzeugt (Abbildung 86). Viele der von der Hardware ausgehenden Bedingungen fließen schon in die Programmierung solcher Strukturen ein und begrenzen bestimmte Entwurfparameter. Gesamthaft lässt sich daher feststellen, dass das Experiment *Die fragile Struktur* von folgenden Faktoren beeinflusst wird: erstens von der Geometrie des Bauteils, zweitens von strukturellen und entwurfsbedingten Vorgaben und drittens von der Beschaffenheit und Leistungsfähigkeit der eingesetzten Hardware.



*Abbildung 86: Die Anzahl und die Ausrichtung der Neupositionierungen werden bereits im Entwurfsprozess berücksichtigt und einberechnet*

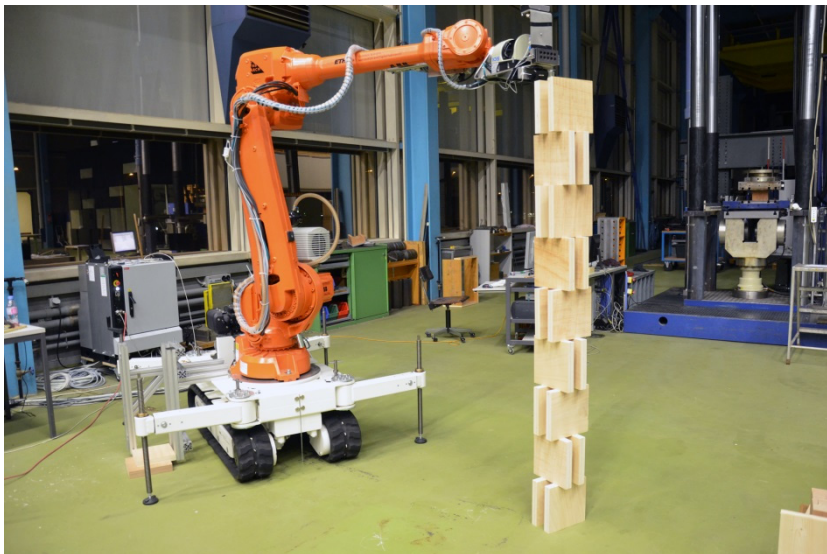
## *2) Konstruktionssystem*

Bei der Umsetzung der fragilen Struktur traten – abgesehen von dem architektonischen Maßstab und der In-situ-Fabrikation – bestimmte bautechnische Besonderheiten hervor. Dies war zum einen darin



## In-situ-Fabrikation

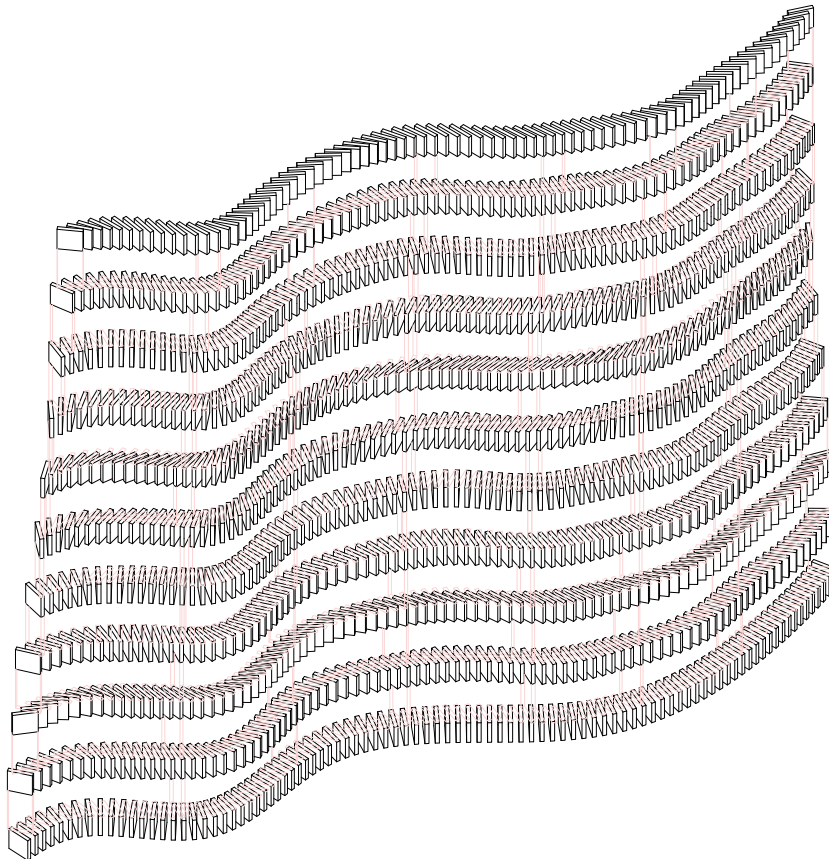
begründet, dass als diskrete Bauteile sehr schmale Holzelemente gewählt worden waren (Breite 225 mm / Höhe 225 mm / Tiefe 35 mm). Zum anderen erfuhren die Elemente keinen dauerhaften Zusammenhalt durch Klebstoff oder Schrauben. Auf der Grundlage dieses empfindlichen und fügungsfreien Verbundes konnten durch die Versuche weitere entscheidende Argumente für die In-situ-Fabrikation herausgearbeitet werden. Der Bewegungsapparat des Roboters erlaubte eine präzise vordefinierte Verteilung der dünnen Bauteile, ohne dass bereits verbaute Platten in Bewegung gerieten oder umfielen (Kartenhauseffekt). Versuche, solche Strukturen manuell aufzubauen, scheiterten meist an der genauen Platzierung oder infolge von durch den Menschen hervorgerufenen Kollisionen, was die Aufbauten jeweils einstürzen ließ. Digitale Maschinen hingegen können solche Aufgaben ohne Konzentrationsschwäche und in gleichbleibender Qualität erfüllen (Abbildung 87).



*Abbildung 87: Aufbautest eines fragilen Turmes. Dank der digitalen Fabrikation durch den Roboter ist eine präzise und kollisionsfreie Positionierung möglich*

Genau diese Präzision der Maschine wurde für die Herstellung der beschriebenen fragilen Struktur ausgenutzt. Der Roboter assemblierte über einen Algorithmus eine hohe Anzahl von schwierig zu platzierenden Elementen in einer größtmöglich variierenden Formation

(Abbildung 88). Über das Eigengewicht des Materials wurde ein stabiler Verbund erreicht, sodass das Zusammenwirken der einzelnen Bausteine eine tektonisch selbsttragende Struktur ergab.



*Abbildung 88: Explosionszeichnung der programmierten fragilen Struktur. Die Verdrehungen der einzelnen Holzelemente sind hinsichtlich Stabilität und Baubarkeit abgestimmt*

### *3) Objekterkennung, Lokalisierungstechnik und Neupositionierung*

Der Aufbau in der Tiefgarage stellte neben Material, Struktur und Form noch weitere für dieses Experiment wesentliche Ansprüche an die In-situ-Fabrikation. Die mobile Herstellung großmaßstäblicher Bauteile setzt voraus, dass die Anlage nach dem Versetzen eine Orientierung im Raum und zu bereits gebauten Abschnitten besitzt. Für die geplante acht Meter lange Holzwand war eine mehrmalige Neupositionierung

## In-situ-Fabrikation

notwendig (Abbildung 89). Das Ziel der Untersuchung bestand darin, eine möglichst unkomplizierte und schnell einzurichtende Einmessung zu finden.

Vorab ließen sich zwei Richtungen erkennen: das globale und das lokale Referenziersystem. Unter einem globalen Referenziersystem ist in diesem Experiment die externe Positionsbestimmung (Tracking) der mobilen Anlage zu verstehen, die beispielsweise über Satelliten via Global Positioning System (GPS) oder fest installierte Kamerasysteme vorgenommen wird. Bei einem lokalen Referenziersystem orientiert sich das System an bekannten Punkten im Raum.

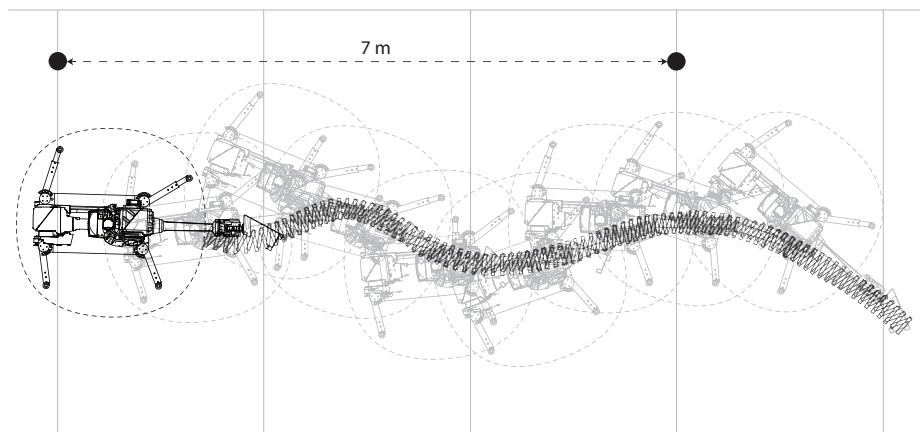


Abbildung 89: Die Neupositionierung des Roboters

Bei der genauen Erforschung möglicher Positionierungsmethoden stellten sich globale Referenziersysteme für die In-situ-Fabrikation als nicht anwendbar heraus, da entweder die Maßgenauigkeit nicht ausreichte (GPS) oder das System nicht für den Innenbereich geeignet (GPS) beziehungsweise sehr aufwendig einzurichten war (Kamera-Tracking). Im Gegensatz dazu konnte der genaue Standpunkt bei lokalen Referenziermethoden über das Scannen schon hergestellter Objekte oder über die gefahrene Strecke<sup>225</sup> der mobilen Basis ermittelt werden. Bei lokalen Methoden besteht zwar die Gefahr, dass sich Toleranzfehler aufaddieren, für die Fertigung der fragilen Struktur

---

<sup>225</sup> Die beschriebene Wegmessung wird oftmals mit dem Fachbegriff Odometrie bezeichnet. Darunter ist eine lokale, über den Antrieb ausgelöste Positionsbestimmung zu verstehen. Zum Beispiel kann über das Abrollen eines Raupenfahrwerks der zurückgelegte Weg berechnet werden.

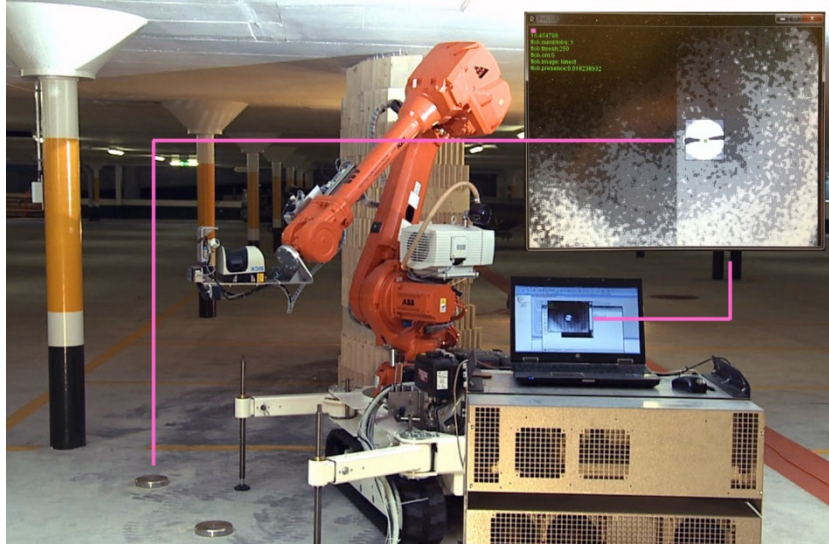
stellte sich diese Vorgehensweise jedoch als baustellentauglich heraus. Einerseits war das Einrichten oder Kalibrieren externer, von der Maschine getrennter Hardware vor Fabrikationsbeginn nicht notwendig. Andererseits ließen sich mit dem geeigneten Equipment ausreichende Genauigkeiten zur Objekterstellung erzielen.

Das Besondere bei dem entwickelten Positionierungsprozess der Experimente II ist, dass sich das gesamte System selbst referenziert. Über zwei Metallscheiben (Satelliten), die der Roboter an definierten Positionen mit sich führt, misst sich die Anlage nach jedem Versetzen neu ein. Der Ablauf einer Neupositionierung bei der fragilen Struktur lässt sich folgendermaßen beschreiben: Die Einheit baut, gemäß ihrer kinematischen Erreichbarkeit, ein größtmögliches Segment der gesamten Formation; nach Beendigung dieses Abschnittes werden, basierend auf den vorherigen Berechnungen der Erreichbarkeit, die beiden Metallscheiben auf einer freien Fläche des Bodens vom Roboterarm verlegt. Die schon gebaute Struktur und die Satelliten stehen demnach in einer bekannten Lage zueinander. In dem nächsten Schritt wird die Fabrikationseinheit in Richtung der noch zu bauenden Wand verfahren. Die grobe Zielposition wird vorab von dem TCP angezeigt und anhand von Kreidemarkierungen zum Zweck der Anfahrhilfe gekennzeichnet. Ist der neue Standpunkt erreicht, werden die beiden Metallscheiben mit einer 3-D-Erfassungskamera gescannt und ihr Mittelpunkt über einen *Blob-Detection-Algorithmus*<sup>226</sup> ermittelt (Abbildung 90).

---

<sup>226</sup> Der englische Begriff *blob* bedeutet im Deutschen so viel wie Tropfen oder Klecks. *Blob Detection* ist ein Algorithmus, der im Bereich der Computervision zur Anwendung kommt. Mithilfe dieser Methode können in einem digitalen Bild zusammenhängende Ansammlungen von ähnlichen Pixeln erkannt werden. Verschiedenste Ab- und Eingrenzungsparameter ermöglichen dem Anwender die gezielte Erkennung der *Blobs*. Durch diese Vorgehensweise konnten bei der fragilen Struktur die Mittelpunkte der Metallscheiben mit einer Genauigkeit von unter zwei Millimetern erkannt werden.

## In-situ-Fabrikation



*Abbildung 90: Das Scannen der Satelliten. Nach dem Versetzen der mobilen Robotereinheit werden die Mittelpunkte der Metallscheiben über ein 3-D-Scanverfahren ermittelt*

Aufgrund dieser Vorgehensweise sind für das Einmessen der Anlage nunmehr zwei wichtige Koordinatensysteme bekannt: Durch das Ablegen der Scheiben wurde die Lage der Struktur zu den Satelliten ermittelt, und durch das Scannen der Metallteile konnte nach dem Versatz das Verhältnis von der mobilen Robotereinheit zu den Scheiben und daher auch zur Struktur errechnet werden. Mit diesen Informationen war es dem System möglich, an dem gebauten Abschnitt anzusetzen und mit dem Bauen fortzufahren und gegebenenfalls den Vorgang der Neupositionierung mithilfe der lokalen Referenziermethode zu wiederholen (Abbildung 91).

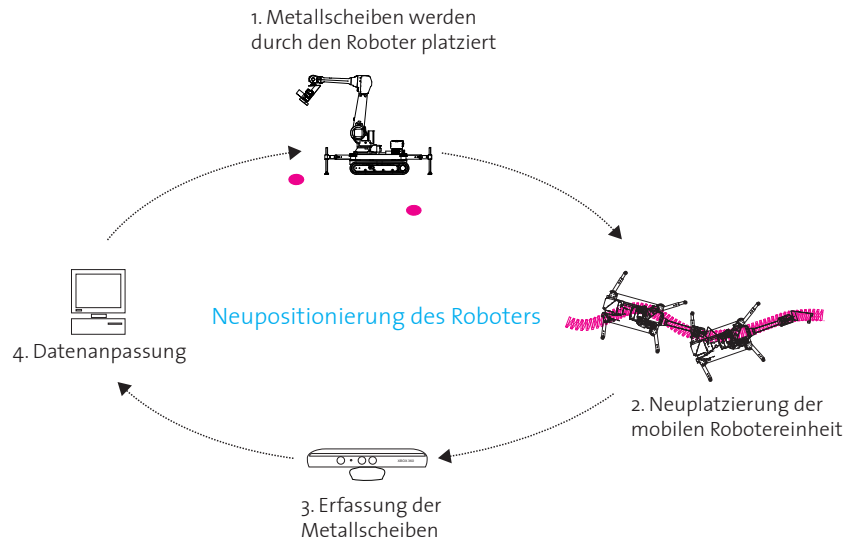


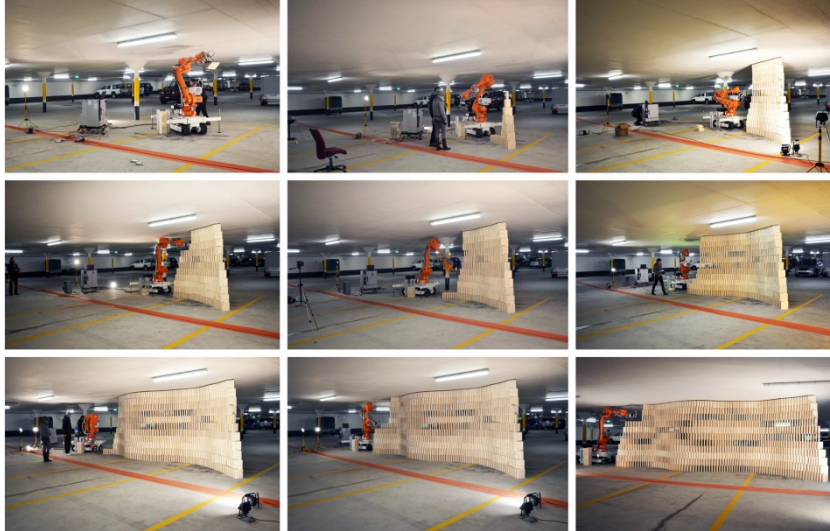
Abbildung 91: Ablaufdiagramm der Neupositionierung für die fragile Struktur

#### 4) In-situ-Fabrikation

Mit diesem Experiment ließen sich die Vorteile der roboterbasierten In-situ-Fabrikation angesichts der Möglichkeit, die Maschine neu zu positionieren, erstmals in einem architektonischen Maßstab nachweisen. Wie oben angemerkt, sind die – wenngleich günstigen – Bedingungen der Tiefgarage der ETH Zürich nicht mit den Gegebenheiten einer realen Baustelle zu vergleichen. Dessen ungeachtet hatten zentrale Faktoren, wie beispielsweise ein unebener Boden oder eine niedrige Deckenhöhe, die in einer Laborumgebung nicht anzutreffen sind, Einfluss auf den Prozess. Es konnten daher im Rahmen dieser wichtigen Grundlagenversuche folgende für die In-situ-Fabrikation forschungsrelevanten Anforderungen verifiziert werden: Infolge des mehrmaligen Versetzens der Maschine (Abbildung 92) und der daraus resultierenden Mobilität bleibt der Baumaßstab nicht auf die Größe der Maschine beschränkt.



## In-situ-Fabrikation



*Abbildung 92: Ablauffolge der Roboterpositionierung (die einzelnen Aufnahmen entstanden in einem Zeitabstand von ca. 40 Minuten)*

Auch sind die in der Vorproduktion übliche Elementbauweise und deren manuelle Ausführung auf einer Baustelle im Fall einer In-situ-Fabrikation aufgrund des kontinuierlichen Herstellungsverfahrens ausgeschlossen. Darüber hinaus konnte in dem Versuch der Verbund zwischen einer mobilen Fabrikation auf einer Baustelle und der digitalen Herstellung algorithmisch beschriebener Bauteile untersucht und aufgezeigt werden (Abbildung 93).



*Abbildung 93: Die fertig fabrizierte, acht Meter lange fragile Struktur in einer Tiefgarage der ETH Zürich*

#### **4.4.5 Reaktive Prozesse**

Mit den abschließenden Experimenten wurde das Ziel verfolgt, Einwirkungen aus der gebauten Umwelt direkt an Ort und Stelle in den Entwurfs- und Fabrikationsprozess einfließen zu lassen und zu validieren. In Kombination mit diesen reaktiven Vorgängen sollten die Versuche zudem darlegen, dass die Maschine als Multifunktionsapparat nicht nur einzelne Prozesse abhandeln kann. Als Versuchsgrundlage wurde das Konzept einer „digitalen Werkbank“<sup>227</sup> gewählt. Das zu verbauende Material, beeinflusst durch Umgebungsfaktoren, wurde situationsbedingt hinsichtlich seiner Form bearbeitet und anschließend als angepasstes Bauteil assembliert.

Der Experimentablauf sah vor, dass die Prozesse einer automatisierten Fabrikationskette ohne Unterbrechung auf die möglichen Toleranzen und Hindernisse einer Baustelle eingingen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden die drei folgenden Teilbereiche untersucht: a) das

---

<sup>227</sup> Die „digitale Werkbank“ wird in dieser Arbeit als computergesteuerte multifunktionale Werkzeugeinheit verstanden. Verschiedene Arbeitsschritte können ohne Umrüstung der Maschine erfolgen.



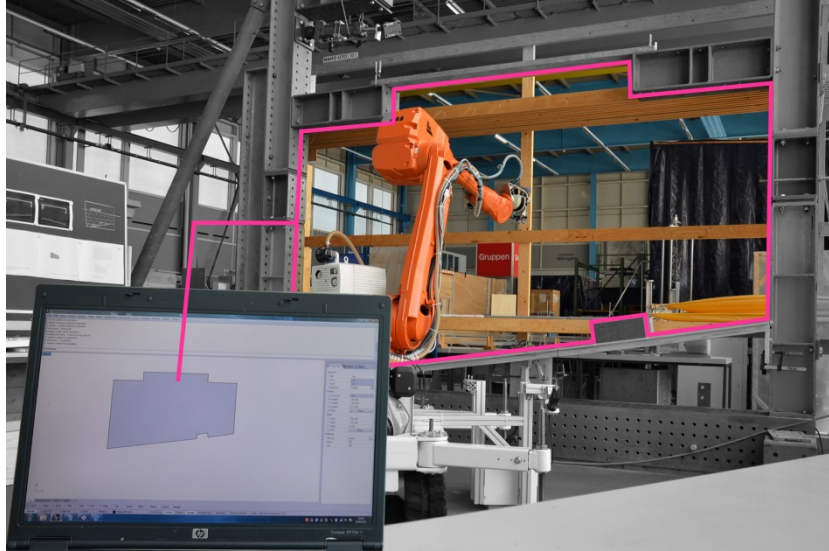
## In-situ-Fabrikation

Scannen des Arbeitsbereiches, b) die Bauteilgenerierung und c) das Bearbeiten und Assemblieren.

### *a) Scannen des Arbeitsbereiches*

Für die Untersuchung eines reaktiven Systems spielt die Digitalisierung der Umgebung eine entscheidende Rolle. Zum einen können solche Bestandsaufnahmen dem Abgleich mit einer schon vorhandenen CAD-Planung dienen. Zum anderen lassen sich aber auch völlig unerwartete Abweichungen oder Hindernisse feststellen, auf die, sofern es im Bereich der Durchführbarkeit des Systems liegt, reagiert werden kann. Zur Simulation derartiger Toleranzen wurde in der ersten Versuchsphase ein Stahlrahmen aufgebaut. Ziel des experimentellen Aufbaus war es, verschiedene Parameter – wie die Schräge des Bodens oder eingebaute Hindernisse – in mehreren Variationen zu testen. Für den Scanprozess kam der am TCP installierte Laserscanner Sick LMS 500 zum Einsatz. Ein Vorteil dieses Scanners ist, dass eine Abstandsmessung auch bei weit entfernten Objekten (bis zu 65 m) möglich ist. Die zu erreichende Genauigkeit ist abhängig von der Objektentfernung und der Eigenschaft des Materials, auf das der Laser trifft. Bei der Vermessung des Versuchsaufbaus (4,3 m / 3 m) war die Vorgabe, in einem Toleranzbereich von unter 3 mm zu bleiben. Wichtig war hierbei, verschiedene Testmaterialien in den Stahlrahmen zu integrieren und zu scannen. So wurden beispielsweise eine schiefe Ebene aus Holz und Hindernisse aus Stein oder expandiertem Polystyrol (EPS) eingesetzt.

Zur Überprüfung der gescannten Objekte übermittelte ein Prozessor die aufgenommenen Messpunkte an eine CAD-Software, mit der eine zusammenhängende Polylinie erzeugt und visualisiert wurde (Abbildung 94). Dies ermöglichte die schnelle messbare Überprüfung der verschiedenen Scangenaugigkeiten in Bezug auf Entfernungen und Materialien. So konnte beispielsweise in kürzester Zeit eine Verschiebung der Hindernisse oder eine Winkeländerung am Boden erfasst und digital ausgewertet werden.



*Abbildung 94: Der Versuchsaufbau. Der Rahmen und das Hindernis werden mit dem am Roboter installierten Scansystem vermessen. Die Daten lassen sich direkt nach diesem Vorgang in einer CAD-Anwendung betrachten und auswerten.*

### *b) Bauteilgenerierung*

Die schnelle Datenverarbeitung und die Präzision in der Umsetzung durch die digitale Fabrikation ermöglichen eine individuelle und auf die jeweils vorgefundene Situation angepasste Herstellung. Bevor jedoch der Roboter anfängt zu produzieren, werden die aus dem Scanprozess resultierenden Daten als Rahmenbedingungen für die Erzeugung eines generativen Designs herangezogen. Die für den Entwurfsalgorithmus relevanten Parameter waren im vorliegenden Fall die Schräge der Basis und das Hindernis. Ziel der Berechnungen war es, eine Reaktion der aus individuellen Einzelbausteinen bestehenden Wandkonfiguration auf diese Größen hervorzurufen. Der Gesamtverbund passte sich sowohl den Schrägen als auch dem Hindernis an (Abbildung 95). Um zu verdeutlichen, dass unterschiedliche Hindernisse unterschiedliche Auswirkungen auf den Prozess der generativen Planung haben, wurden in der Umsetzungsphase verschiedene Exponate gebaut. Neben der Anpassung an die geometrischen Eigenschaften einzelner Bauteile leistete das Skript aber auch einen Export für die roboterbasierte Produktion. Somit konnten der Maschine die Produktions- und

## In-situ-Fabrikation

Assemblierungsinformationen in einem durchgängigen digitalen Prozess übermittelt werden.

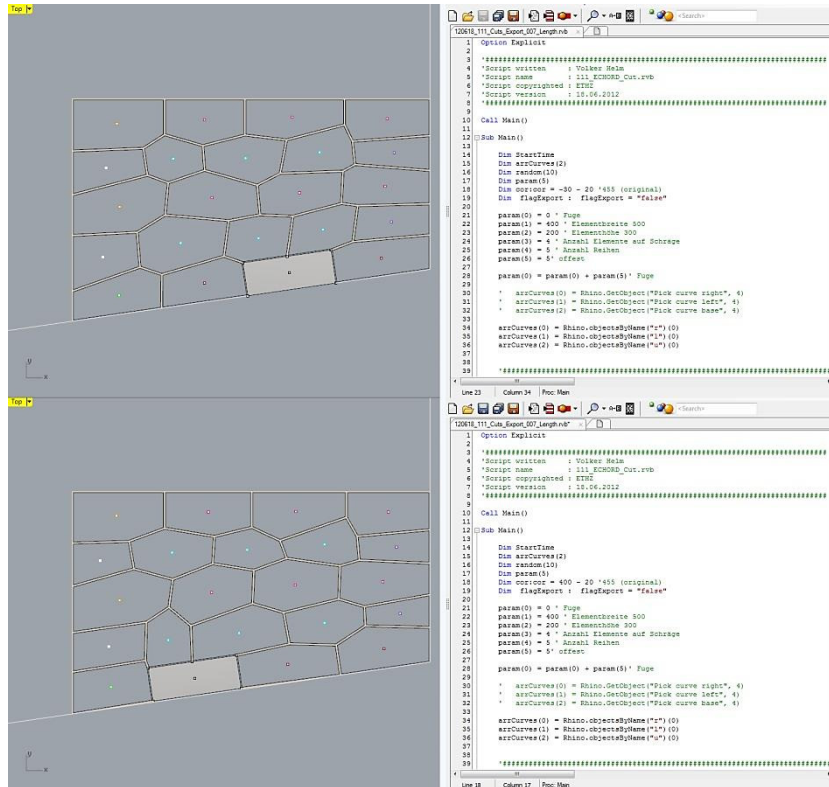


Abbildung 95: Die Bauteile passen sich der Verschiebung des Hindernisses an

### c) Bearbeiten und Assemblieren

Nach dem Scan- und Generierungsprozess sowie der Übermittlung aller produktionsrelevanten Daten mussten die berechneten individuellen Blöcke fabriziert werden. Hier setzte das Konzept der „digitalen Werkbank“ an. Sowohl der Bearbeitungsvorgang als auch die räumliche Positionierung sollten in ein und demselben Ablauf geschehen. Für die Herstellung der ungleichmäßigen Formen wurden als Grundmaterial EPS-Blöcke, deren Abmessungen vor der Bearbeitung 500 mm / 300 mm / 100 mm betragen, gewählt. Als Bearbeitungswerkzeug diente ein an der Roboterbasis fest angebrachter Thermo-Schneider mit Messerklinge für extrudierte Hartschaumplatten.

So konnte der am Endeffektor befestigte Vakuumbreifer die einzelnen Blöcke von einem dafür vorgesehenen Materialspender aufgreifen und dann gemäß den programmierten Pfaden entlang des Messers führen. Nach Beendigung dieses Schneidvorganges entsprach die verbliebene Form der vom Rechner generierten Geometrie. In einem unmittelbar anschließenden Schritt wurde der Block direkt innerhalb des vorher gescannten Rahmens unter Berücksichtigung der schrägen Ebene und des Hindernisses verbaut (Abbildung 96).



*Abbildung 96a und b: a) Der Roboter führt den EPS-Block entlang einer Thermo-Schneidemaschine; b) Nach dem Schneidprozess wird der Block direkt verbaut*

Die grundlegenden Versuche zu den reaktiven Prozessen haben ergeben, dass die mobile Robotereinheit dank ihrer Ausstattung mit Sensorik auf abweichende Umgebungsparameter direkt vor Ort eingehen kann.<sup>228</sup>

---

<sup>228</sup> Es muss jedoch angemerkt werden, dass sich die Veränderungen in einem vorher festgelegten Ausmaß bewegen. Auf völlig unerwartete und nicht vorhersehbare Geschehnisse kann dieser Prozess nicht reagieren. Bei sehr komplexen und undefinierten Vorgängen wird mit Blick auf die aus den Experimenten gezogenen Erkenntnisse zur Vereinfachung wieder die menschliche Kooperation mit einbezogen.

## **5. Zusammenfassung und Auswertung der Experimente**

In der folgenden Zusammenfassung werden die Ergebnisse der aufgezeigten Experimente und Fallbeispiele, die innerhalb von drei Jahren durchgeführt wurden, konkretisiert und ausgewertet.

### **5.1 Zusammenfassung und Auswertung der Experimente I**

In den Experimenten I konnten vorbereitend für die Fabrikation auf einer Baustelle anhand einer mit Sensorik ausgestatteten Feldfabrik richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden. Unterteilt sind die Versuche selbst in a) Materialparameter, b) Datengenerierung, c) Fabrikationsprozess und d) Fallbeispiel: Produktumsetzung.

#### *a) Materialparameter*

In den Experimenten wurde Ziegel als grundlegendes konstruktives Element für die Herstellung einer verklebten Mauerwerkswand verwendet. Neben einer präzisen und sauberen maschinellen Verarbeitung war, infolge der Verwendung von Klebstoff, eine erhöhte strukturelle Eigenschaft des Gesamtverbundes zu erwarten.

Wegen des roboterbasierten Klebprozesses verändern sich die Anforderungen an die Steine. Beispielsweise entfällt die sonst herkömmliche, durch den Mörtel entstehende Lagerfuge. Daher wurde als Alternative zum normalen Backstein der *Flexbrick*-Stein entwickelt und in einer Kleinserie produziert. Durch die Fertigung in Längsrichtung konnte beidseitig eine Nut eingearbeitet werden, die eine hohe optische Qualität des gesamten Verbundes gewährleistet. Anhand der anschließenden Prüfreihe, basierend auf dem neu produzierten *Flexbrick*-Stein, konnte die angenommene erhöhte strukturelle Stabilität nachgewiesen werden. Anders als beim gemörtelten Verbund waren die Proben sogar in der Lage, Zugkräfte aufzunehmen. Folglich konnten ein auf neue Weise erzielt Erscheinungsbild und erweiterte Bauteileigenschaften aufgezeigt werden. Als nachteilig ist hierbei anzumerken, dass das Mörtelbett, das normalerweise die Verformungstoleranzen des Backsteins ausgleicht, entfällt.

Im nächsten Schritt wurde das Ziel angestrebt, die Möglichkeit der digitalen Datengenerierung mit in die Bauteilparameter einfließen zu lassen, um komplexere Elemente erstellen zu können.

#### *b) Datengenerierung*

Für die Planung und Produktion unterschiedlicher digital erzeugter Bauteile musste eine automatisierte Datengenerierung gefunden werden. Die in diesem Projekt selbst entwickelten Werkzeuge ermöglichen eine robuste Datengenerierung für Designstudien, Datenaustausch und Roboteransteuerung. Die über einen Algorithmus am Computer erzeugten Elemente können auf ihre Baubarkeit analysiert und anschließend direkt nach dem Export maschinell gefertigt werden. Für die Produktion sind keine Papierpläne mehr erforderlich, was den Aufwand für die Arbeitsvorbereitung minimiert. Um möglichst schnell auf Modifikationen oder Konzeptänderungen eingehen zu können, wurde das Gestaltungs- und Datengenerierungsmodul für die Experimente bewusst offen und flexibel gehalten. Dank der entwickelten Werkzeuge konnten schon vor der Produktionsphase viele unterschiedliche Konzepte untersucht, virtuell überprüft und visualisiert werden. Aufgrund der experimentellen Anwendung handelt es sich bei dem Gestaltungs- und Datengenerierungsmodul jedoch um eine prototypische Entwicklung und nicht um eine allgemein bedienbare und fertige Softwarelösung.

Es lässt sich festhalten: Schon während der Datengenerierung werden die digitalen Konstruktions- und Entwurfparameter mit realen Werkstoffeigenschaften zusammengefügt beziehungsweise vollzieht sich die Verknüpfung von Code und Material.

#### *c) Fabrikationsprozess*

Resultierend aus der Datengenerierung und der Festlegung von Programmier- und Hardwareschnittstellen wird eine durchgängige maschinelle Umsetzung digital informierter Bauteile möglich. In den Experimenten I stand die Produktion von nicht standardisierten Mauerwerkswänden aus Ziegeln im Maßstab 1 : 1 im Vordergrund. Die größte Herausforderung stellten hierbei die produktionsbedingten Steintoleranzen, die sich infolge des Klebprozesses schon nach

## In-situ-Fabrikation

einigen Steinlagen aufsummieren und zu erheblichen Planungsmaßabweichungen des Bauteils führen können. Zur Vermeidung solcher Abweichungen wurden ein eigens entwickelter Analysealgorithmus und eine automatisierte Toleranzmessung in den roboterbasierten Aufbauprozess integriert. Die Erkenntnis aus der digitalen Analyse ist, dass mit einer nur geringen Anzahl an Interventionen – beispielsweise Unterlegen, Austauschen oder Aussortieren von Extremverformungen – ein Steinverbund von hoher Genauigkeit produziert werden kann. Eine konstante Höhenmessung des physischen Bauteils, durchgeführt mittels Abstandssensoren, erlaubt ein gezieltes Intervenieren in den Bauprozess mit verschiedenen Kompensationsstrategien und verhindert dadurch ein Wachstum der Abweichungen. Zur Überprüfung wurden mehrere kleinere Prototypen gebaut, vermessen und zwecks virtueller Überlagerung mit dem digitalen Modell rückgeführt. Die durch die Feedbackprozesse erreichbare Maßgenauigkeit der einzelnen Elemente ermöglicht das präzise Fügen der Mauerwerksfertigteile ohne nachträgliche Anpassungsarbeiten.

Die Ergebnisse der Experimente belegen: Die Kopplung der digitalen Fabrikation mit Feedbackprozessen lässt einen Informationsaustausch mit der Umwelt – in diesem Beispiel mit der schon gebauten Struktur – zu und ermöglicht damit dem System, noch während des Bauprozesses optimierte Anpassungen vorzunehmen. Kritisch betrachtet handelt es sich in diesen Studien aber noch nicht um ein geschlossenes System, da der Prozess der Toleranzkompensation, wie beispielsweise das Unterlegen, Austauschen oder Aussortieren, manuell erfolgte. Dennoch konnten für die Grundlagenforschung der In-situ-Fabrikation wichtige Erkenntnisse in Bezug auf Rückkopplungsprozesse und anschließendes situatives Handeln gewonnen werden.

### *d) Produktumsetzung (Fallbeispiel)*

Das aus den Experimenten zur Datengenerierung und zur feedback-basierten Toleranzkompensation neu erlangte Wissen wurde in einem Fallbeispiel an einem großformatigen Prototyp angewandt. Hierbei wurde der Prozess, von der generativen Designerstellung bis zur roboterbasierten Produktion, an mehreren vofabrizierten, nicht standardisierten Wandelementen getestet. Aufgrund des maßhaltigen

Verbundes der verklebten Steine konnte ein leichtes, flexibel gestaltbares Fassadensystem aus Ziegeln entwickelt werden.

## **5.2 Zusammenfassung und Auswertung der Experimente II**

Die für die In-situ-Fabrikation wichtigen Untersuchungen der Experimente I lassen sich als Grundlagen und Einstieg in die Experimente II bezeichnen. Aber im Gegensatz zu einer roboter-basierten Feldfabrik wird bei den Experimenten II der entscheidende Schritt zur direkten Produktion auf einer Baustelle vollzogen. Hierzu wird auf den Versuchen zu den Feedbackprozessen aufgebaut, indem diese um reaktive Prozesse (selbstregelnde Systeme und Interaktion) erweitert werden.

Unterteilt sind die Auswertungen wiederum den Experimenten entsprechend: a) Experimentaufbau, b) Materialtoleranzen, c) Mensch-Maschine-Interaktion, d) Lokalisierungstechniken und e) reaktive Prozesse.

### *a) Experimentaufbau*

Eine kompakte Maschine, ausgestattet mit einem fahrbaren Unterbau, Sensorik und multifunktionalen Greifern, wurde evaluiert, konzipiert und umgesetzt. Alle maßgeblichen Versuche konnten mit dieser Forschungsanlage durchgeführt werden. Es muss aber angemerkt werden, dass es sich bei der mobilen Plattform um eine Versuchsanlage mit einem einfachen technischen Aufbau handelte. Eine computerbasierte Steuerung des Unterbaus, die beispielsweise ein autonomes Verfahren ermöglicht, war zu diesem Zeitpunkt noch nicht implementiert. Weitere Faktoren, wie eine unabhängige Stromversorgung oder die Integration der Kontrolleinheit des Roboters in ein gesamthaft dynamisches System, sind noch offen. Daher wird für weiterführende Versuche hinsichtlich einer automatisierten Fabrikation auf der Baustelle eine Erweiterung beziehungsweise ein Umbau der Maschine empfohlen.



### *b) Materialtoleranzen (Experimente und Fallbeispiel)*

Der Umgang mit extremen Materialtoleranzen, wie sie auf einer Baustelle auftreten können, wurde an einem Fallbeispiel getestet. Aufbauend auf den Feedbackprozessen der Experimente I wurde hierzu ein Versuch entwickelt, der auf der Assemblierung unterschiedlicher Materialstärken basierte. Mittels eingesetzter Sensorik und algorithmisch beschriebener Handlungsstrategien konnte den durch die Stapelung entstandenen unvorhersehbaren Materialkonfigurationen gegengesteuert werden. Darüber hinaus ergab sich die Gelegenheit, die Flexibilität der Maschine zu erproben, da das Fallbeispiel im Rahmen einer Ausstellung in London stattfand und zu diesem Zweck ein Transport der gesamten Anlage notwendig war.

### *c) Mensch-Maschine-Interaktion (Experimente und Fallbeispiel)*

Das Experiment Mensch-Maschine-Interaktion zeigte auf, dass menschliche Gesten und Bewegungen über eine im System integrierte 3-D-Kamera in Echtzeit für die Maschine erkennbar sind. Über Handbewegungen konnte dem Roboter vermittelt werden, welches sein lokaler Arbeitsbereich war, ohne dass eine Neuprogrammierung des Prozesses erforderlich wurde. Die Bewegung der Apparatur lässt sich folglich durch eine verhältnismäßig einfache Kommunikation ohne spezielle Roboterkenntnisse gezielt steuern. Die Robustheit dieses Verfahrens wurde anhand eines Fallbeispiels, das über mehrere Tage andauerte, demonstriert. Im Rahmen einer Ausstellung konnten Besucher dem Roboter über eine Handbewegung die genaue Produktionsposition übermitteln. Nachdem die Gesten über die Sensorik richtig erkannt worden waren, setzte die Fabrikationsmaschine die jeweiligen Befehle in Bauabläufe um.

Des Weiteren wurden Mensch-Maschine-Konzepte mit Sensorik entwickelt, die sich außerhalb des Robotersystems befinden, beispielsweise in Form von Richtungsmessern in Mobiltelefonen. Solche externe Sensorik, positioniert vom Menschen, erleichtert unter anderem das Erfassen verschiedener Bezugssysteme. Unterschiedliche Ebenen, wie die Roboterebene zur Raumebene, können miteinander abgeglichen werden und ermöglichen die schnelle Einmessung des Systems.

Sicherheitstechnische Aspekte, die bei Mensch-Maschine-Interaktionen eine wichtige Rolle spielen, wurden in diesen Experimenten nicht weiter untersucht. Dies wird für zukünftige Arbeiten im Bereich der roboterbasierten In-situ-Fabrikation notwendig sein.

*d) Lokalisierungstechniken (Experimente und Fallbeispiel)*

Mit der Entwicklung eines lokalen Referenziersystems, basierend auf Referenzmarkierungen und Computer Vision, konnte in mehreren sich wiederholenden Versuchen allgemein nachgewiesen werden, dass sich die Robotereinheit autonom einmessen und an bereits gebaute Strukturen ansetzen kann. Die kontinuierliche Herstellung großmaßstäblicher Bauteile ist demnach grundsätzlich möglich. Die aus den Experimenten zur Lokalisierung gewonnenen Erkenntnisse wurden in einem Fallbeispiel außerhalb des Labors in situ eingesetzt. Mit der Verarbeitung von mehr als 1 000 Holzelementen produzierte die Einheit eine exemplarische fortlaufende Konstruktion, die um ein Vielfaches größer war als die Abmessungen der Baumaschine.

*e) Reaktive Prozesse (Experimente)*

Das Ziel des letzten Experimentes bestand darin, verschiedene Bereiche der In-situ-Forschung zu kombinieren und in einem Entwurfs- und Fabrikationsprozess zu verarbeiten. Hierbei standen zwei Schwerpunkte im Vordergrund: Zum einen wurden die Einwirkungen aus der Umwelt direkt in den Fabrikationsprozess eingebracht. In Kombination mit diesen reaktiven Vorgängen legten die Versuche zum anderen dar, dass eine mobile Maschine als Multifunktionsapparatur mehrere Arbeitsschritte in einem einzigen Prozess (auf einer Baustelle) verarbeiten kann. Die in diesem Experiment entwickelte durchgängige Produktionskette konnte Prozesse – wie die Erfassung des Arbeitsbereiches oder eine auf die Umgebungssituation abgestimmte digitale Bauteilgenerierung, die individuelle Bearbeitung einzelner Materialblöcke und das Assemblieren nicht standardisierter Elemente – nahtlos aneinanderreihen.

### **6. Schlussbetrachtung**

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Stand der Forschung haben verdeutlicht, dass zwischen effizienten flexiblen und digital informierten Bauprozessen und den – meist manuellen – Vorgehensweisen in der gängigen Praxis eine eindeutige Forschungslücke besteht. Sich ändernde technische und wirtschaftliche Bedingungen tragen jedoch dazu bei, dass ein konzeptuelles Umdenken stattfindet und neue Denkansätze in Betracht gezogen werden, um auf neue architektonische Fragestellungen und erweiterte Anforderungen in der digitalen Fabrikation einzugehen.

Genau hier setzt die neue Forschungsrichtung der In-situ-Fabrikation, der durchgängigen digitalen Produktion unmittelbar am Bauplatz, an.

#### **6.1 Forschungsergebnisse**

Die In-situ-Fabrikation lässt sich als logische Konsequenz aus der stationären digitalen Vorfabrikation im ersten Schritt und aus der computergestützten Baurobotik für die Baustellenfabrik und Feldfabrikation ableiten. Dazu wurde in den Experimenten eine mobile Robotereinheit entwickelt, die aufgrund ihrer kompakten Abmessungen auf einer bestehenden Baustelle eingesetzt werden kann. Neben dem Umstand, dass Roboterarme verschiedenste materialaufbauende, formative oder subtraktive Konzepte umsetzen können, existiert für mobile Anlagen ein erweitertes Spektrum in den Bereichen der Produktion von großmaßstäblichen Bauteilen, der Logistik und der Ökologie.

Diese Erkenntnisse bildeten die Voraussetzung für die These vom direkten Einsatz des Roboters auf der Baustelle und führten zu der Kernforschung dieser Arbeit. So konnte im Rahmen dieser Arbeit durch die Ausstattung der mobilen Robotereinheit mit Scantechnologie ein ständiger Austausch zwischen Maschine und der gebauten Umgebung erreicht werden. Materialtoleranzen und baustellenbedingte Hindernisse ließen sich auf dieser Grundlage erkennen, und Strategien zur automatisierten Problemlösung konnten gefunden werden. Des Weiteren wurde anhand der eingesetzten Sensorik die unmittelbare Kommunikation zwischen dem Menschen und der (Bau-)Maschine

demonstriert. Diese Tatsache bringt den entscheidenden Vorteil mit sich, dass komplexe maschinelle und datenverarbeitende Vorgänge durch menschliche Interaktionen zusätzlich unterstützt oder maßgeblich vereinfacht werden können.

Neben diesen neuartigen und erweiterten Produktionsbedingungen spielt auch der zukünftige Einfluss der In-situ-Fabrikation auf die Architektur eine große Rolle. Im Vergleich zu herkömmlichen digitalen Entwurfs- und Bauprozessen lassen sich schon jetzt konkrete Effekte hinsichtlich der Entwurfsmethodik und dem Resultat feststellen, wie sie in Kapitel 4.4 *Experimente II – In-situ-Fabrikation* aufgezeigt wurden. Unabhängig von Maßstab und Komplexität besteht beispielsweise nun die Möglichkeit, anpassungsfähige Bauteile ohne einschränkende Elementierung an Ort und Stelle maschinell zu produzieren. Zugleich entfällt die manuelle Assemblierung von Einzelteilen.

Generell lässt sich daher festhalten, dass der Einsatz roboterbasierter mobiler Produktionsmaschinen, die in einer unstrukturierten Arbeitsumgebung komplexe und großformatige Bauteile in einem kontinuierlichen Produktionsprozess erstellen können, ein neuartiges Forschungsfeld ist. Bisher existieren nur sehr wenige Untersuchungsansätze auf diesem Gebiet. Aus diesem Grund ist die In-situ-Fabrikation als eine grundlegende neue Forschungsrichtung in der Architektur anzusehen, die maßgebliche Impulse für weiterführende Forschungsarbeiten im universitären und industriellen Kontext aussendet und neue Anwendungsbereiche in der Baubranche eröffnet.

Auch lassen sich, angeregt durch die vorliegende Arbeit, grundsätzliche Fragestellungen und Anforderungen in der zukünftigen digitalen Fabrikation erkennen, die vermutlich vor allem in der Erweiterung des dynamischen Verhaltens durch technische und konzeptuelle Modifikationen sowie in dem Einbezug kooperierender Bauroboter liegen.

## **6.2 Zukünftige Herausforderungen der In-situ-Fabrikation**

Die Auswirkungen der Forschung im Bereich der In-situ-Fabrikation sind mannigfaltig und ineinandergreifend. Sie lassen sich nicht auf einzelne Prozesse reduzieren und bedürfen einer zusammenhängenden Betrachtung. Jedoch können einzelne Potenziale hervorgehoben,

diskutiert und weiterführend in den Kontext aufbauender Forschungsarbeiten eingebunden werden. Die zukünftige Forschung stellt zugleich mit Blick auf die angestrebte Zusammenführung vieler unterschiedlicher Fachgebiete eine große Herausforderung dar. Eine Vertiefung durch anknüpfende Untersuchungen und Experimente bietet sich daher an und ist für die nachfolgend aufgeführten Bereiche notwendig.

### **6.2.1 Erweiterung dynamischer Prozesse**

Die Experimente haben gezeigt, dass eine mobile Robotereinheit grundsätzlich in der Lage sein kann, Bauaufgaben, wie das Assemblieren diskreter Elemente, in einer undefinierten Umgebung auszuführen. Eine Besonderheit hierbei ist, dass aufgrund der Mobilität der Anlage ein gewissermaßen „endloser“ Anbau von Strukturen möglich ist. Der Maßstab ist nicht auf die Abmessungen der Maschine beschränkt, sondern wird durch die freie Bewegung im Raum festgelegt. Es ist aber anzumerken, dass die für diese Untersuchung entwickelte Maschinerie in ihrer Autonomie eingeschränkt ist. Für zukünftige Forschungen bietet sich eine Modifizierung der Robotereinheit an. Eine erhöhte maschinelle Selbstständigkeit in der Positionsbestimmung hat ein dynamischeres Verhalten im gesamten Bauablauf zur Folge. Die dadurch entstehenden erweiterten Feedbackprozesse stellen neue Herausforderungen an die Datenverarbeitung und Schnittstellen.

### **6.2.2 Kooperierende Baurobotik**

Nach der aktuellen Option einer einzelnen Maschine ist der für die Forschung nächste logische Schritt die Überlegung, dass mehrere mobile Robotereinheiten in einer dynamischen Kooperation auf einer Baustelle zusammenwirken.<sup>229</sup> Eine solche Zusammenarbeit würde ein großes Potenzial in verschiedenen Richtungen eröffnen: Schwere Lasten könnten bei Bedarf von mehreren Systemen gehoben und transportiert werden; auch könnte eine Arbeitsteilung stattfinden,

---

<sup>229</sup> Einzelne Aspekte von kooperativen Prozessen konnten bereits in Kapitel 4.4.3 *Mensch-Maschine-Interaktion* betrachtet werden.

indem einzelne Roboter unterschiedliche Aufgaben erfüllen, also beispielsweise ein System Material assembliert, während ein anderes das Fügen übernimmt. Die Multi-Robotik-Kooperation wird voraussichtlich ein zentrales Thema in der In-situ-Fabrikation werden und die Entwicklung innovativer dynamischer Fabrikationsprozesse auf einer Baustelle wesentlich beeinflussen. Für die Herstellung anpassungsfähiger Bauteile unter der Verwendung kooperierender Bauroboter wird demnach zukünftig eine fortlaufende intensive Forschung auf den Gebieten der erweiterten Umgebungserkennung und der dynamischen Rückkopplungssysteme notwendig sein.

### **6.2.3 Künstliche Intelligenz**

Wie bereits in Kapitel 2.5 *Die Steuerung und Regelung maschineller Bauprozesse* angedeutet, könnten Forschungsschwerpunkte aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (KI-Forschung) einen Einfluss auf die In-situ-Fabrikation haben.

Aus den durchgeführten Experimenten geht deutlich hervor, dass insbesondere die Betrachtung der Maschine als lernendes System, das sich adaptiv auf die Umwelt, Lebewesen oder andere Maschinen einstellen und neu gewonnene Erfahrungen auf gleichartige Situationen übertragen kann, von Interesse wäre. Auch könnte das System aus den Ergebnissen der bereits gebauten Strukturen lernen und darauffolgende Prozesse kontinuierlich selbstständig verbessern. Erkenntnisse aus erfolgreichen beziehungsweise weniger erfolgreichen Strategien würden gespeichert, analysiert und in nachfolgende Generationen eingearbeitet werden. Angesichts der vielfältigen Themenüberschneidungen mit der Informatik und der Robotik wäre eine enge Zusammenarbeit mit den auf diesen Gebieten spezialisierten Forschungsgruppen notwendig und wünschenswert.

### **6.2.4 Untersuchung weiterführender architektonischer Konzepte**

Die in dieser Arbeit umgesetzten Experimente bringen verschiedenste Ansätze und Technologien zusammen. So wurde nicht nur an der Maschine und den sensorbasierten Steuerungs- und Lokalisationsmethoden, sondern auch an baumaßstäblich erweiterten Material- und

## In-situ-Fabrikation

Konstruktionssystemen geforscht. Angesichts der Reichweite der einzelnen Disziplinen konnten nicht alle Schwerpunkte im gleichen Umfang behandelt werden. Für die Beantwortung der mit Blick auf die In-situ-Fabrikation gestellten Forschungsfrage waren zunächst einmal verschiedene technologische Anforderungen zu untersuchen. Jedoch konnten anhand von Fallbeispielen auch die Auswirkungen der In-situ-Fabrikation auf architektonische Systeme und die gebaute Umwelt aufgezeigt werden. Abgesehen von den zu untersuchenden Modifikationen an der Maschine sollten sich zukünftige Studien vor allem den Potenzialen und Einflüssen von in situ produzierter Architektur und deren Leistungsfähigkeit widmen. Nicht zuletzt ist eine zentrale Frage von entscheidender Bedeutung, nämlich wie weitreichend der Einfluss der mobilen digitalen Fabrikation auf das zukünftige Bauen, die Industrie und die gebaute Umwelt sein wird.

## 7. Anhang

### 7.1 Literaturverzeichnis

- Andres, Jürgen, Thomas Bock, Friedrich Gebhart, und Werner Steck. „First Results of the Development of the Masonry Robot System ROCCO: a Fault Tolerant Assembly Tool.“ In *Proceedings of the 11th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. Brighton 24.–26. Mai 1994), herausgegeben von Denis A. Chamberlain, 87–93. Amsterdam/London/New York/Tokyo: Elsevier, 1994.
- Balaguer, Carlos, und Mohamed Abderrahim. „Trends in Robotics and Automation in Construction.“ In *Robotics and Automation in Construction*, herausgegeben von Carlos Balaguer und Mohamed Abderrahim, 1–20. InTech, 2008; <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/5555.pdf> (abgerufen am 11.08.2014).
- Bammé, Arno, Günter Feuerstein, Renate Genth, Eggert Holling, Renate Kahle, und Peter Kempin. *Maschinen-Menschen, Mensch-Maschinen: Grundrisse einer sozialen Beziehung*. Reinbek: Rowohlt, 1983.
- Beier, Thomas, und Petra Wurl. *Regelungstechnik: Basiswissen, Grundlagen, Anwendungsbeispiele*. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., 2013.
- Bock, Thomas. „Construction robotics.“ *Autonomous Robots* (Springer Science + Business Media), Vol. 22, Nr. 3 (2007): 201–209.
- Bock, Thomas. „Das Dach wird zuerst gebaut – und das Erdgeschoss zuerst rückgebaut.“ *Bauingenieur*, Sonderdruck aus Heft 2 (2009): 47–55.
- Bock, Thomas, Willi Victor Lauer, Thomas Linner, und Nora Eibisch. „Automatisierung und Robotik im Bauen.“ *Arch+198/199*, Vol. 43 Haus der Zukunft (2010): 34–39.
- Bock, Thomas, und Thomas Linner. „Automatisierte Hochbaustellen.“ *Informationen Bau-Rationalisierung (IBR)*, Nr. 41 (März 2012): 21–26.
- Bonwetsch, Tobias, Daniel Kobel, Fabio Gramazio, und Matthias Kohler. „The Informed Wall: applying additive digital fabrication techniques on architecture.“ In *Synthetic Landscapes, Proceedings of the 25th Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture (ACADIA 06)*. Louisville 12.–15. Okt. 2006), 489–495. ACADIA, 2006, [http://cumincad.architexturez.net/system/files/pdf/acadia06\\_489.content.pdf](http://cumincad.architexturez.net/system/files/pdf/acadia06_489.content.pdf) (abgerufen am 11.08.2014).
- Bonwetsch, Tobias, Fabio Gramazio, und Matthias Kohler. „Digitally Fabricating Non-Standardised Brick Walls.“ In *Manu Build: Proceedings of the 1st International Conference* (Rotterdam 25.–26. April 2007), 191–196. London: CIRIA, 2007.



## In-situ-Fabrikation

- Bonwetsch, Tobias, Fabio Gramazio, und Matthias Kohler. „R-O-B: Towards a Bespoke Building Process.“ In *Manufacturing the Bespoke: Making and Prototyping Architecture (AD Reader)*, herausgegeben von Bob Sheil, 78–87. Chichester: John Wiley & Sons, 2012.
- Bonwetsch, Tobias, Ralph Bärtschi, und Matthias Helmreich. „BrickDesign: A software for planing robotically controlled non-standard brick assemblies.“ In *RobArch 2012: Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design*, herausgegeben von Sigrid Brell-Cokcan und Johannes Braumann, 102–109. Wien: Springer, 2013.
- Brockhaus. Die Enzyklopädie in 24 Bänden.* 20., überarb. und aktualisierte Aufl., Bd. 2 Aq–Bec. Leipzig/Mannheim: Brockhaus, 1996.
- Brockhaus. Die Enzyklopädie in 24 Bänden.* 20., überarb. und aktualisierte Aufl., Bd. 24 Weli–Zz. Leipzig/Mannheim: Brockhaus, 1999.
- Broy, Manfred, und Otto Spaniol, Hg. *VDI Lexikon: Informatik und Kommunikationstechnik.* 2., erw. und Neubearb. Aufl., Berlin/Heidelberg: Springer, 1999.
- Carpo, Mario. *The Alphabet and the Algorithm.* Cambridge, Mass.: MIT Press, 2011.
- Carpo, Mario. *Alphabet und Algorithmus.* Herausgegeben von Jörg H. Gleiter. Übersetzung: Jan Bovelet und Jörg H. Gleiter. Bielefeld: transcript, 2012.
- Departement Architektur der ETH Zürich, Hg. *Jahrbuch/Yearbook 2004: Lehre und Forschung/Teaching and Research.* Zürich: gta, 2004.
- DIN IEC 60050-351. Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik (IEC 60050-351:2006).* Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Juni 2009.
- Dotzler, Bernhard, und Friedrich Kittler, Hg. *Alan Turing: Intelligence Service.* Berlin: Brinkmann & Bose, 1987.
- Duden online, <http://www.duden.de> (abgerufen am 11.08.2014)
- Dunn, Nick. *Digital Fabrication in Architecture.* London: Laurence King Publishing Ltd., 2012.
- Engelberger, Joseph F. „Historical Perspective and Role in Automation.“ In *Handbook of Industrial Robotics.* 2. Aufl., herausgegeben von Shimon Y. Nof, 3–10. New York/Chichester/Weinheim/Brisbane/Singapore/Toronto: John Wiley & Sons, 1999.
- Feringa, Jelle, und Asbjørn Søndergaard. „Fabricating Architectural Volume: Stereotomic Investigations in Robotic Craft.“ In *Fabricate: Negotiating Design & Making*, herausgegeben von Fabio Gramazio, Matthias Kohler und Silke Langenberg, 76–83. Zürich: gta, 2014.
- Fischer, Peter, und Peter Hofer. *Lexikon der Informatik.* 15. überarbeitete Aufl., Berlin/Heidelberg: Springer, 2011.

## Volker Helm

- Fritz, Oliver. „Programmieren statt zeichnen? Vom Einfluss digitaler Technologie auf den architektonischen Entwurf.“ *Archithese*, Nr. 4 (2002): 14–19.
- Fritz, Oliver. „Bauen mit Computern: Digitale Technologien in der Vorfabrikation.“ *Archithese*, Nr. 2 (2003): 46–51.
- Gershenfeld, Neil. *FAB: The Coming Revolution on Your Desktop – from Personal Computers to Personal Fabrication*. New York: Basic Books, 2005.
- Gleiter, Jörg H. *Architekturtheorie heute*. Bielefeld: transcript, 2008.
- Gramazio, Fabio, und Matthias Kohler. *Digital Materiality in Architecture*. Baden: Lars Müller Publishers, 2008.
- Gramazio, Fabio, und Matthias Kohler. „Die Digitale Materialität der Architektur.“ *Arch+198/199*, Vol. 43 Haus der Zukunft (2010): 42–43.
- Gramazio, Fabio, und Matthias Kohler. „Biegen statt Brechen: Digitaler Holzbau.“ *Baunetzwoche #162*, (19. Februar 2010): 13–17; [http://www.baunetz.de/dl/727165/baunetzwoche\\_162\\_2010.pdf](http://www.baunetz.de/dl/727165/baunetzwoche_162_2010.pdf) (abgerufen am 11.08.2014).
- Gramazio, Fabio, Matthias Kohler, und Jan Willmann. *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture*. Zürich: Park Books, 2014.
- Gramazio, Fabio, Matthias Kohler, und Silke Langenberg, Hg. *Fabricate: Negotiating Design & Making*. Zürich: gta, 2014.
- Gramelsberger, Gabriele. „Story Telling with Code.“ In *Code: Zwischen Operation und Narration*, herausgegeben von Andrea Gleininger und Georg Vrachliotis, 29–40. Basel: Birkhäuser, 2010.
- Hägele, Martin, und Timo Schäfer. „Definitionen.“ In *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*, herausgegeben von Hans-Jürgen Gevatter und Ulrich Grünhaupt, 739–741. Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 2006.
- Han, Chang-soo. „Human-Robot Cooperation Technology: An Ideal Midway Solution Heading Toward The Future Of Robotics And Automation In Construction.“ In *Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC. Seoul 29. Juni – 2. Juli 2011)*, 13–18. IAARC, 2011; <http://www.iaarc.org/publications/fulltext/K3.pdf> (abgerufen am 11.08.2014).
- Harel, David, und Yishai Feldman. *Algorithmik: Die Kunst des Rechnens*. Übersetzung: Micaela Krieger-Hauwede. Berlin/Heidelberg: Springer, 2006.
- Hehl, Walter. *Trends in der Informationstechnologie: Von der Nanotechnologie zu virtuellen Welten*. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2008.

## In-situ-Fabrikation

- Helm, Volker, Selen Ercan, Fabio Gramazio, und Matthias Kohler. „Mobile Robotic Fabrication on Construction Sites: DimRob.“ In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System* (Vilamoura 7.–12. Oktober 2012), 4335–4341; <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6385617> (abgerufen am 11.08.2014).
- Helm, Volker, Selen Ercan, Fabio Gramazio, und Matthias Kohler. „In-Situ Robotic Construction: Extending the Digital Fabrication Chain in Architecture.“ In *Synthetic Digital Ecologies: Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*. San Francisco 18.–21. Oktober 2012), 169–176. San Francisco, 2012.
- Helm, Volker, Jan Willmann, Fabio Gramazio, und Matthias Kohler. „In-Situ Robotic Fabrication: Advanced Digital Manufacturing Beyond the Laboratory.“ In *Springer Tracts in Advanced Robotics 94: Gearing Up and Accelerating Cross-fertilization between Academic and Industrial Robotics Research in Europe – Technology Transfer Experiments from the ECHORD Project*, herausgegeben von Florian Röhrbein, Germano Veiga und Ciro Natale, 63–83. Cham/Schweiz: Springer International Publishing, 2014.
- Helm, Volker. „In-situ Fabrication: Mobile robotic units on construction sites.“ *Architectural Design (AD) Made by Robots: Challenging Architecture at a Larger Scale* (John Wiley & Sons), Vol. 84, Nr. 3 (2014): 100–107.
- Helms, Hans G. „Von der Lochkarte in den Cyberspace: Zu den gesellschaftlichen Auswirkungen der Computerentwicklung.“ *Thesis. Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar*, Nr. 1 (1997): 78–85.
- Herbert, Gilbert. *The Dream of the Factory-Made House: Walter Gropius and Konrad Wachsmann*. Cambridge, Mass./London: MIT Press, 1984.
- Hesse, Stefan, und Gerhard Schnell. *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation. Funktion – Ausführung – Anwendung*. 5. Aufl., Wiesbaden: Vieweg + Teubner/Springer Fachmedien, 2011.
- Hodges, Andrew. *Alan Turing: The Enigma*. London: Vintage, 2012.
- Horáková, Jana. „Looking Backward at the Robot.“ In *Research and Education in Robotics – EUROBOT 2011: Poceedings – International Conference*, (Prag 15.–17. Juni 2011), herausgegeben von David Obdržálek und Achim Gottscheber, 1–9. Berlin/Heidelberg: Springer, 2011.
- Hovestadt, Ludger. *Jenseits des Rasters – Architektur und Informationstechnologie: Anwendungen einer digitalen Architektonik / Beyond the Grid – Architecture and Information Technology: Applications of a Digital Architectonic*. Basel/Boston/Berlin: Birkhäuser, 2010.
- Howe, A. Scott. „Designing for Automated Construction.“ *Automation in Construction*, Nr. 9 (2000): 259–276.

## Volker Helm

- Husty, Manfred, Adolf Karger, Hans Sachs, und Waldemar Steinhilper. *Kinematik und Roboter*. Berlin/Heidelberg: Springer, 1997.
- IFR. International Federation of Robotics. „History of Industrial Robots: From the first installation until today.“ *Milestones of Technology and Commercialization*, 2012;  
[http://www.ifr.org/uploads/media/History\\_of\\_Industrial\\_Robots\\_online\\_brochure\\_by\\_IFR\\_2012.pdf](http://www.ifr.org/uploads/media/History_of_Industrial_Robots_online_brochure_by_IFR_2012.pdf) (abgerufen am 11.08.2014).
- Isermann, Rolf. *Mechatronische Systeme*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 2008.
- Knoll, Alois, und Thomas Christaller. *Robotik*. Frankfurt am Main: Fischer Taschenbuch, 2003.
- Kohler, Matthias, Fabio Gramazio, und Jan Willmann. „Die Operationalität von Daten und Material im digitalen Zeitalter.“ In *Positionen zur Zukunft des Bauens: Methoden, Ziele, Ausblicke*, herausgegeben von DETAIL – Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 6–19. München: DETAIL, 2011.
- Kohler, Matthias. „Aerial Architecture.“ *Log 25, Reclaim Resilience // .....R<sup>2</sup>*, (2012): 23–30.
- Kolarevic, Branko. „Digital Production.“ In *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, herausgegeben von Branko Kolarevic, 30–55. New York: Spon Press, 2003.
- Laarman, Joris, Saša Jokić, Petr Novikov, Luis E. Fraguada, und Areti Markopoulou. „Anti-Gravity Additive Manufacturing.“ In *Fabricate: Negotiating Design & Making*, herausgegeben von Fabio Gramazio, Matthias Kohler und Silke Langenberg, 192–197. Zürich: gta, 2014.
- Langenberg, Silke, Hg. *Das Marburger Bausystem: Offenheit als Prinzip*. Sulgen: Niggli, 2013.
- Liggemeyer, Peter. *Software-Qualität: Testen, Analysieren und Verifizieren von Software*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2009.
- Maeda, J. „Development and Application of the SMART System.“ In *Proceedings of the 11th international symposium on automation and robotics in construction* (ISARC. Brighton 24.–26. Mai 1994), herausgegeben von Denis A. Chamberlain, 457–464. Amsterdam/London/New York/Tokyo: Elsevier, 1994.
- Marwedel, Peter. *Eingebettete Systeme*. Übersetzung von Lars Wehmeyer. Berlin/Heidelberg: Springer, 2008.
- Meier, Karlheinz. „Computer nach dem Vorbild des Gehirns?“ *Ruperto Carola* 1/2007 (Universität Heidelberg);  
<http://www.uni-heidelberg.de/presse/ruca/ruca07-1/vorbild.html> (abgerufen am 11.08.2014).

## In-situ-Fabrikation

- Menges, Achim, Hg. „Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design.“ *Architectural Design (AD)*, Vol. 82, Nr. 2 (2012) [Themenheft].
- Negroponte, Nicholas. *Soft Architecture Machines*. Cambridge, Mass./London: MIT Press, 1975.
- Oesterle, Silvan, Axel Vansteenkiste, und Ammar Mirjan. „Zero Waste Free-Form Formwork.“ In *International Conference on Flexible Formwork (ICFF)*. Bath 27.–29. Juni 2012), 258–267. Bath, 2012;  
<http://people.bath.ac.uk/jjo20/icff/ICFF2012/Proceedings.html> (abgerufen am 11.08.2014).
- Piller, Frank Thomas. *Mass Customization: Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2006.
- Pine II, B. Joseph. „Mass Customizing Products and Services.“ *Strategy & Leadership* Vol. 21, Nr. 4 (1993): 6–55.
- Prado, Marshall, Moritz Dörstelmann, Tobias Schwinn, Achim Menges, und Jan Knippers. „Core-Less Filament Winding: Robotically Fabricated Fiber Composite Building Components.“ In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014*, herausgegeben von Wes McGee und Monica Ponce de Leon, 275–289. Cham/Schweiz: Springer International Publishing, 2014.
- Pritschow, G., J. Kurz, Th. Fessele und F. Scheurer. „Robotic On-Site Construction Of Masonry.“ In *Proceedings of the 15th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. München 31. März – 1. April 1998), 55–64. Magdeburg: Univ., Baumaschinentechnik, ISARC, 1998.
- Rammert, Werner, und Ingo Schulz-Schaeffer. „Technik und Handeln. Wenn soziales Handeln sich auf menschliches Verhalten und technische Abläufe verteilt.“ In *Können Maschinen handeln? Soziologische Beiträge zum Verhältnis von Mensch und Technik*, herausgegeben von Werner Rammert und Ingo Schulz-Schaeffer, 11–64. Frankfurt/Main: Campus, 2002.
- Rammert, Werner. *Technik-Handeln-Wissen: Zu einer pragmatistischen Technik- und Sozialtheorie*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2007.
- Roddeck, Werner. *Einführung in die Mechatronik*. 3., überarb. und ergänzte Aufl. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2006.
- Ropohl, Günter. *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*. Karlsruhe: Universitätsverlag, 2009.
- Schindler, Christoph, und Fabian Scheurer. „Neue Formen und neue Wertschöpfung: Digitale Produktionsketten für den Holzbau.“ In *Internationale Konferenz zur Automation in der Holzwirtschaft* (Biel 12.–13. Oktober 2006). Biel: Berner Fachhochsch., Architektur, Holz und Bau, 2006;  
[http://www.hsb.bfh.ch/NR/rdonlyres/F9D91C9E-66F4-460B-A207-3E4EF9A752EE/9522/Digitale\\_Ketten\\_Scheurerer.pdf](http://www.hsb.bfh.ch/NR/rdonlyres/F9D91C9E-66F4-460B-A207-3E4EF9A752EE/9522/Digitale_Ketten_Scheurerer.pdf) (abgerufen am 11.08.2014).

- Schindler, Christoph. *Ein architektonisches Periodisierungsmodell anhand fertigungstechnischer Kriterien, dargestellt am Beispiel des Holzbaus*. Dissertation ETH Nr. 18605, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2009.
- Schmidt, Hartwig. „Häuser aus Beton – Der Beginn einer neuen Bauweise.“ In *Häuser aus Beton: Vom Stampfbeton zum Grosstafelbau*, herausgegeben von Uta Hassler und Hartwig Schmidt, 12–26. Tübingen/Berlin: Ernst Wasmuth, 2004.
- Schumacher, Patrik. „Parametrismus – Der neue International Style.“ *Arch+ 195, Istanbul wird grün* (2009): 106–113.
- Springer Gabler Verlag, Hg. *Gabler Wirtschaftslexikon*, <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/> (abgerufen am 11.08.2014).
- Taylor, Mark, Sam Wamuziri, und Ian Smith. „Automated Construction in Japan.“ *Proceedings of the Institution of Civil Engineers (ICE)*, Vol. 156 (2003): 34–41.
- Trogemann, Georg, und Jochen Viehoff. *Code@Art: Eine elementare Einführung in die Programmierung als künstlerische Praktik*. Wien/New York: Springer, 2005.
- Trogemann, Georg, Hg. *Code und Material: Exkursionen ins Undingliche*. Wien/New York: Springer, 2010.
- Trogemann, Georg. „Code und Maschine.“ In *Code: Zwischen Operation und Narration*, herausgegeben von Andrea Gleininger und Georg Vrachliotis, 41–54. Basel: Birkhäuser, 2010.
- Tschätsch, Heinz, und Jochen Dietrich. *Praxis der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008.
- Ueno, T. „A Japanese view on the role of automation and robotics in next generation construction.“ In *Proceedings of the 11th International Symposium On Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. Brighton 24.–26. Mai 1994), herausgegeben von Denis A. Chamberlain, 633–640. Amsterdam/London/New York/Tokyo: Elsevier, 1994.
- Verein Deutscher Ingenieure, Hg. *VDI 2860. Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*. Düsseldorf: VDI, Mai 1990.
- Vester, Heinz-Günter. *Kompendium der Soziologie I: Grundbegriffe*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009.
- Wallaschek, Jörg. „Sensoren und Aktoren.“ In *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*, herausgegeben von Waldemar Steinhilper und Bernd Sauer, 665–706. Berlin/Heidelberg: Springer, 2008.

## In-situ-Fabrikation

- Weiser, Mark. „The computer for the 21th century.“ *Scientific American*, Vol. 265, Nr. 3 (1991): 94–104.
- Wiener, Norbert. *Cybernetics: or the Control and Communication in the Animal and the Machine*. 2. Aufl., Cambridge, Mass.: MIT Press, 1961.
- Willmann, Jan, Fabio Gramazio, und Matthias Kohler. „Roboterbasiertes Bauen, Architektur und Digitale Fabrikation.“ *Deutsche Bauzeitschrift*, Vol. 60, Nr. 11 Parametrisches Bauen: Eine andere Art zu denken! (2012): 56–59.
- Witt, Gerd, Hg. *Taschenbuch der Fertigungstechnik*. München/Wien: Carl Hanser, 2006.
- Yamazaki, Yusuke, und Junichiro Maeda. „The SMART system: an integrated application of automation and information technology in production process.“ *Computers in Industry*, Nr. 35 (1998): 87–99.
- Zilch, Konrad, Claus Jürgen Diederichs, und Rolf Katzenbach, Hg. *Handbuch für Bauingenieure: Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit – Fachwissen in einer Hand*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 2001.

## 7.2 Publikationen zur In-situ-Fabrikation

Publikationen, die während der Bearbeitung der Dissertation vom Autor zum Thema der vorliegenden Arbeit erstellt wurden:

Helm, Volker, Selen Ercan, Fabio Gramazio, und Matthias Kohler. „Mobile Robotic Fabrication on Construction Sites: DimRob.“ In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (Vilamoura 7.–12. Oktober 2012), 4335–4341; <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6385617> (abgerufen am 11.08.2014).

Helm, Volker, Selen Ercan, Fabio Gramazio, und Matthias Kohler. „In-Situ Robotic Construction: Extending the Digital Fabrication Chain in Architecture.“ In *Synthetic Digital Ecologies: Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*. San Francisco 18.–21. Oktober 2012), 169–176. San Francisco, 2012.

Helm, Volker, Jan Willmann, Fabio Gramazio, und Matthias Kohler. „In-Situ Robotic Fabrication: Advanced Digital Manufacturing Beyond the Laboratory.“ In *Springer Tracts in Advanced Robotics 94: Gearing Up and Accelerating Cross-fertilization between Academic and Industrial Robotics Research in Europe – Technology Transfer Experiments from the ECHORD Project*, herausgegeben von Florian Röhrbein, Germano Veiga und Ciro Natale, 63–83. Cham/Schweiz: Springer International Publishing, 2014.

Helm, Volker. „In-situ Fabrication: Mobile robotic units on construction sites.“ In *Architectural Design (AD) Made by Robots: Challenging Architecture at a Larger Scale* (John Wiley & Sons), Vol. 84, Nr. 3 (2014): 100–107.



### 7.3 Benutzte Internetseiten

Alle Internetseiten wurden zuletzt abgerufen am 11.08.2014.

ABB Asea Brown Boveri Ltd, <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-4600>

ABB Asea Brown Boveri Ltd, RobotStudio, <http://new.abb.com/products/robotics/de/robotstudio>

Adidas AG, <http://www.adidas.com/us/content/miadidas/>

Autonomous Systems Lab (ASL), ETH Zürich, <http://www.asl.ethz.ch/index>

Baumer Electric AG, <http://www.baumer.com/ch-en/products/distance-measurement/photoelectric-sensors/>

Emporis GmbH, <http://www.emporis.com/building/the-juroku-bank-ltd-head-office-nagoya-japan>

Emporis GmbH, <http://www.emporis.com/building/pwcbuilding-singapore-singapore>

EUREKA PROJECT 1083 BRONCO, <http://www.eurekanetwork.org/project/-/id/1083>

European Commission – Research & Innovation – FP7, [http://ec.europa.eu/research/fp7/index\\_en.cfm](http://ec.europa.eu/research/fp7/index_en.cfm)

Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme (IAIS), [http://www.iais.fraunhofer.de/cognitive\\_robotics.html](http://www.iais.fraunhofer.de/cognitive_robotics.html)

Hans Hundegger Maschinenbau GmbH, <http://www.hundeggerusa.com>

Herzog & de Meuron Architekten Basel Ltd., Projektteam Messe Basel – Neubau, <http://www.herzogdeuron.com/index/projects/complete-works/201-225/213-messe-basel-new-hall.html>

Husqvarna Schweiz AG, <http://www.husqvarna.com/ch/de/products/robotic-mowers/husqvarna-robotic-mowers-for-homeowners/>

International Federation of Robotics (IFR), [http://www.ifr.org/uploads/media/History\\_of\\_Industrial\\_Robots\\_online\\_brochure\\_by\\_IFR\\_2012.pdf](http://www.ifr.org/uploads/media/History_of_Industrial_Robots_online_brochure_by_IFR_2012.pdf)

IFR Statistical Department, <http://www.worldrobotics.org>

Institute of Robotics and Intelligent Systems (IRIS), ETH Zürich, <http://www.iris.ethz.ch/>

J.Mayer.H und Partner. Architekten, <http://www.jmayerh.de/19-0-Metropol-Parasol.html>

Keller Systeme AG, <http://www.keller-systeme.ch/>

Kerkstoel 2000+ NV, <http://www.kerkstoel2000.be/en/floors/wide-slabs/production-process/>

Kiva Systems, <http://www.kivasystems.com/solutions/>

Lab3 – Laboratory for Experimental Computer Science, Academy of Media Arts Cologne, <http://interface.khm.de/index.php/art/projects/photofeedback/>

## Volker Helm

Lehrstuhl für Baurealisierung und Baurobotik, TU München, Fakultät für Architektur,  
[http://www.ar.tum.de/fakultaet/personen/professoren/thomas\\_bock/](http://www.ar.tum.de/fakultaet/personen/professoren/thomas_bock/)

Maeda Mini Cranes, <http://www.maedaminicranes.co.uk/>

Massachusetts Institute of Technology (MIT) Media Lab,  
<http://www.media.mit.edu/about/background>

MCH Group AG, <http://www.mch-group.com/>

Michael Hansmeyer. Computational Architecture, <http://www.michael-hansmeyer.com/html/solids/p6.html>

Nike Inc., [http://www.nike.com/de/de\\_de/c/nikeid](http://www.nike.com/de/de_de/c/nikeid)

Obayashi Corporation, [http://www.obayashi.co.jp/uploads/File/ar\\_97.pdf](http://www.obayashi.co.jp/uploads/File/ar_97.pdf)

Obayashi Corporation, <http://www.obayashi.co.jp/press/news20010725>

ODICO Formwork Robotics, <http://www.formworks.dk/>

OpenCV SourceForge, <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/>

Professur für Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich, Departement  
Architektur, <http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch>

Professur für Computer Aided Architectural Design, ETH Zürich, Departement  
Architektur, <http://www.caad.arch.ethz.ch/blog/>

Raffaello D'Andrea. Dynamic Works; <http://raffaello.name/projects/robotic-chair/>

redbloc Ziegelfertigteilsysteme Gesellschaft m.b.H., <http://www.redbloc.at/>

Robert McNeel & Associates – Rhinoceros, <http://www.rhino3d.com/>

ROBmade by Keller AG Ziegeleien, <http://www.robmade.com/de/home/>

RoboticsLab, Universidad Carlos III, Madrid,  
<http://roboticslab.uc3m.es/roboticslab/content/eu-rocco-project-2-1992-1996-0>

Schunk GmbH & Co. KG, <http://mobile.schunk-microsite.com/de/produkte/produkte/servoelektrische-5-finger-greifhand-svh.html>

Schweizer Kommission für Technologie und Innovation (KTI),  
<http://www.kti.admin.ch/>

Sick AG, <https://www.mysick.com/saqqara/pdf.aspx?id=im0037513>

Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI), <http://www.vdi.de/technik/richtlinien/faq/>

Weckenmann Anlagentechnik GmbH & Co. KG, <http://www.weckenmann.com/de>

Weinmann Holzbausystemtechnik GmbH, <http://www.weinmann-partner.com>

Zimmer GmbH, vormals Sommer-automatic GmbH, <http://www.sommer-automatic.com/produkte-komponenten-systeme/komponenten/greifer/pneumatisch/2-backen-parallelgreifer.html>

## 7.4 Tabellen- und Abbildungsnachweis

Alle Bilder, Grafiken und Tabellen, die hier nicht gesondert aufgeführt sind, entstammen folgender Quelle: © *Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich*

### Tabellennachweis

Tabelle 1: © Bachmann Engineering AG, 2010..... 125

### Abbildungsnachweis

Abbildung 3: © David Hahlbrock, 2010..... 14

Abbildung 4: © World Robotics, 2013, entnommen aus:  
<http://www.worldrobotics.org/index.php?id=downloads> (abgerufen am 11.08.2014) 15

Abbildung 5: © IFR Statistical Department, 2013, entnommen aus:  
<http://www.worldrobotics.org/index.php?id=downloads> (abgerufen am 11.08.2014) 16

Abbildung 6a und b: © Weckenmann Anlagentechnik GmbH & Co. KG,  
entnommen aus: <http://www.weckenmann.com/de/maschinen-und-schalungen/maschinen-und-komponenten/schalungsroboter/> (abgerufen am 11.08.2014)..... 19

Abbildung 8: © Hans Hundegger Maschinenbau GmbH, entnommen aus:  
<http://www.hundeggerusa.com> (11.08.2014)..... 21

Abbildung 9a und b: © Odico Formwork Robotics, 2012..... 22

Abbildung 11: © Weinmann Holzbausystemtechnik GmbH, entnommen aus:  
<http://www.weinmann-partner.com> (abgerufen am 11.08.2014) ..... 26

Abbildung 12a und b: © Obayashi Corporation, 1997, entnommen aus:  
[http://www.obayashi.co.jp/uploads/File/ar\\_97.pdf](http://www.obayashi.co.jp/uploads/File/ar_97.pdf) (12a) und:  
<http://www.obayashi.co.jp/press/news20010725> (12b) (abgerufen am 11.08.2014) .. 28

Abbildung 15: © Takenaka Corporation, 1986, entnommen aus: Balaguer, Carlos,  
und Mohamed Abderrahim. „Trends in Robotics and Automation in Construction.“  
*In Robotics and Automation in Construction*, herausgegeben von Carlos Balaguer  
und Mohamed Abderrahim, 1-20. InTech, 2008;  
<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/5555.pdf> (abgerufen am 11.08.2014) ..... 32

Abbildung 16: © Eugenio Andrés Puente/RoboticsLab, Universidad Carlos III,  
Madrid, 1996, entnommen aus: <http://roboticslab.uc3m.es/roboticslab/content/eurocco-project-2-1992-1996-0> (abgerufen am 11.08.2014)..... 32

Abbildung 17: © Michael Hansmeyer, 2008, entnommen aus: <http://www.michael-hansmeyer.com/html/solids/p6.html> (abgerufen am 11.08.2014) ..... 41

Abbildung 19: Cincinnati Hydrotel von John T. Parsons, 1952,  
Fotograf unbekannt, entnommen aus: <http://www.practicalmachinist.com/vb/cnc-machining/1955-chicago-machine-tool-show-dawn-nc-120114/> (abgerufen am 11.08.2014)..... 49

## Volker Helm

Abbildung 20: Industrieroboter Unimate, entwickelt von George Devol und Joseph Engelberger, im Einsatz bei General Motors, 1961, Fotograf unbekannt, entnommen aus: <a href="http://www.computerhistory.org/revolution/artificial-intelligence-robotics/13/292/1272">http://www.computerhistory.org/revolution/artificial-intelligence-robotics/13/292/1272</a> (abgerufen am 11.08.2014).....	52
Abbildung 26: © Volker Helm und Andreas Schürch, 2003 .....	73
Abbildung 27a und b: © Volker Helm und Andreas Schürch, 2003 .....	74
Abbildung 28: © MCH Group Ltd., 2013, entnommen aus: <a href="http://www.mch-group.com/">http://www.mch-group.com/</a> (abgerufen am 11.08.2014).....	76
Abbildung 29 und Abbildung 30: © Herzog & de Meuron Basel Ltd., 2012 .....	78
Abbildung 31: © Herzog & de Meuron Basel Ltd., 2012.....	79
Abbildung 32 und Abbildung 33: © Herzog & de Meuron Basel Ltd., 2008.....	80
Abbildung 34: © MCH Group Ltd., 2013, entnommen aus: <a href="http://www.mch-group.com/">http://www.mch-group.com/</a> (abgerufen am 11.08.2014).....	81
Abbildung 66: © ABB Asea Brown Boveri Ltd, 2012, entnommen aus: <a href="http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-4600">http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-4600</a> (abgerufen am 11.08.2014).....	127

Der Verfasser hat sich intensiv bemüht, alle Inhaber von Abbildungsrechten ausfindig zu machen. Personen und Institutionen, die möglicherweise nicht erreicht wurden und Rechte an verwendeten Abbildungen beanspruchen, werden gebeten, sich nachträglich mit dem Verfasser in Verbindung zu setzen.

## 7.5 Projektverzeichnis

Im Projektverzeichnis werden die für die vorliegende Dissertation wichtigen Projekte und deren beteiligten Personen in der Reihenfolge der Kapitel aufgeführt. An den Projekten *ESG-Pavillon*, *Automatic Freeform Production*, *Fassadenprogrammierung der Messe Basel*, *Flexbrick*, *ECHORD: dimRob*, *Stratifications*, *The Endless Wall* und *Die fragile Struktur* war der Autor maßgeblich beteiligt.

### Kapitel 1.4 *Stand der Praxis und Forschung*

#### **Fassade Weingut Gantenbein – Nichtstandardisierte Mauerwerksfassade**

Forschungs- und Bauprojekt

Fläsch, 2006

*Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich*

Mitarbeiter: Tobias Bonwetsch (Projektleitung), Daniel Abraha, Stephan Achermann, Christoph Junk, Michael Knauß, Andri Lüscher, Michael Lyrenmann, Silvan Oesterle, Martin Tann

*In Zusammenarbeit mit:* Bearth & Deplazes Architekten, Chur und Gramazio & Kohler Architekten, Zürich

*Auftraggeber:* Martha und Daniel Gantenbein

*Ausgewählte Experten:* Jürg Buchli (Baustatik), Dr. Nebosja Mojsilovic und Markus Baumann, IBK ETH Zürich (Belastungstests)

*Industriepartner:* Keller AG Ziegeleien

<http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/52.html>

(abgerufen am 20.10.2014)

#### **TailorCrete – Massgeschneiderte Betonstrukturen**

Forschungsprojekt (7. Forschungsrahmenprogramm der EU)

ETH Zürich, 2009–2013

*Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich*

Mitarbeiter: Silvan Oesterle (Projektleitung), Tobias Bonwetsch, Thomas Cadalbert, Andrea Kondziela, Ammar Mirjan, Daniel Rohlek, Axel Vansteenkiste, Stella Azariadi, Samuel Bernier-Lavigne, Noah Bühler, Dominik Ganghofer, Petrus Aejmelaeus-Lindström

*In Kooperation mit:* Danish Technological Institute (Koordination), Chalmers University of Technology, University of Southern Denmark, Czech Technical University, Paschal Danmark A/S, SUPERPOOL, Gibotech A/S, designtoproduction, Grace Bauprodukte GmbH, Dragados, Aalborg Portland A/S, NV Bekaert SA, MT Højgaard A/S

*Industriepartner:* Holcim Schweiz AG

Volker Helm

*Ausgewählte Experten:* Walt+Galmarini AG

*Sponsoren:* Fischer Rista AG, Jäggi+Hafter AG

<http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/164.html>

(abgerufen am 20.10.2014)

### **BrickDesign – Gestaltungssoftware für eine grosse Menge diskreter Elemente**

Forschungsprojekt (Förderagentur für Innovation, KTI)

ETH Zürich, 2011–2012

*Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich*

Mitarbeiter: Ralph Bärtschi (Projektleitung), Tobias Bonwetsch, Matthias Helmreich, Philipp Hübner

*Industriepartner:* ROB Technologies AG, Keller AG Ziegeleien

<http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/210.html>

(abgerufen am 20.10.2014)

### **Structural Oscillations**

Forschungs- und Ausstellungsprojekt

ETH Zürich, 2008

*Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich*

Mitarbeiter: Michael Knauß (Projektleitung), Ralph Bärtschi, Gregor Bieri, Tobias Bonwetsch, Michael Bühler, Nadine Jerchau, Michael Lyrenmann, Hannes Oswald, Lukas Pauer

*In Kooperation mit:* Reto Geiser (Kurator)

*Auftraggeber:* Bundesamt für Kultur (BAK), Schweiz

*Sponsoren:* Keller AG Ziegeleien, Kuka Schweiz AG, Sika Schweiz AG

<http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/142.html>

(abgerufen am 20.10.2014)

## **Kapitel 2.3 Algorithmen und Material**

### **Die programmierte Säule**

Lehrprojekt

ETH Zürich, 2009–2010

*Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich*

Mitarbeiter: Michael Knauß (Projektleitung Phase 2), Ralph Bärtschi, Jennifer Furstenu, Lorenz Lachauer, Michael Lyrenmann

*Studenten:* Sebastian Cramer, Jari Fischer, Benjamin Heller, Pierre Levy, Claudio Meletta, Stephanie Monney, Luka Piskorec, Florian Strohmaier, Thomas Summermatter, Rainer Vock

## In-situ-Fabrikation

*In Zusammenarbeit mit:* Prof. Dr. Philippe Block (Block Research Group, ETH Zürich)

*Industriepartner:* Keller AG Ziegeleien

<http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/lehre/175.html>

(abgerufen am 20.10.2014)

### Kapitel 2.5 *Die Steuerung und Regelung maschineller Bauprozesse*

#### **Rubble Aggregations**

Forschungsprojekt

ETH Zürich, 2013–

*Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich*

Mitarbeiter: Sven Rickhoff

#### **Prozedurale Landschaften**

Lehrprojekt

ETH Zürich, 2011

*Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich*

Mitarbeiter: Michael Knauß (Projektleitung), Ralph Bärtschi, Axel Vansteenkiste, Dominik Weber

*Studenten:* Tobias Abegg, Jonathan Banz, Mihir Bedekar, Daria Blaschkiewitz, Simon Cheung, Dhara Dhara Sushil Surana, Hernan Garcia, Kaspar Helfrich, Pascal Hendrickx, Leyla Ilman, Malte Kloes, Jennifer Koschack, Caspar Lohner, Jitesh Mewada, Lukas Pauer, Sven Rickhoff, Martin Tessarz, Ho Kan Wong

*In Zusammenarbeit mit:* Prof. Christophe Girot (Professur für Landschaftsarchitektur, ETH Zürich), Yael Girot (Atelier Girot)

*Ausgewählte Experten:* Prof. Dr. Robert Flatt (Institut für Baustoffe, ETH Zürich)

*Sponsoren:* Sika Schweiz AG

<http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/lehre/208.html>

(abgerufen am 20.10.2014)

### Kapitel 3.1 *Die konventionelle digitale Prozesskette*

#### **ESG-Pavillon (Endless Space Generated by Sections)**

Thesis Nachdiplomstudium CAAD – Prof. Dr. Ludger Hovestadt

ETH Zürich, 2003

*Betreuung:* Odilo Schoch, Christoph Schindler

*Verfasser:* Sonja Becker, Pia Fricker, Volker Helm, Rooshank Mehta, Dennis Müller, Kai Rüdener, Andreas Schürch, Dieter Segerer, Marcin Wojcik

Kapitel 3.2 *Individuelle Massenproduktion*

**Automatic Freeform Production**

Thesis Nachdiplomstudium CAAD – Prof. Dr. Ludger Hovestadt

ETH Zürich, 2003

*Betreuung:* Odilo Schoch

*Verfasser:* Volker Helm, Andreas Schürch

Kapitel 3.3 *Verwendung parametrischer Werkzeuge in Großprojekten*

**Fassadenprogrammierung der Messe Basel**

Basel, 2010–2013

*Herzog & de Meuron Architekten Basel Ltd.*

Das Projekt „Messe Basel – Neubau“, entworfen von Herzog & de Meuron Architekten Basel Ltd., wurde 2013 in Basel unter der Leitung (Partners) von Jacques Herzog, Pierre de Meuron, Stefan Marbach (Partner in Charge) und Wolfgang Hardt fertiggestellt. Die Parametrisierung der Fassade und die Erstellung der digitalen Werkzeuge, wie sie in diesem Kapitel vorgestellt werden, erfolgten im Rahmen der Digital Technology Group von Volker Helm und Steffen Riegas

Das vollständige Projektteam kann unter folgender Internetadresse abgerufen werden: <http://www.herzogdemeuron.com/index/projects/complete-works/201-225/213-messe-basel-new-hall.html> (abgerufen am 11.08.2014)

Kapitel 4.3 *Experimente I – Vorstudien zur In-situ-Fabrikation*

**Flexbrick – Maschinell produziertes Fassadensystem aus Mauerwerk**

Forschungsprojekt (Förderagentur für Innovation, KTI)

ETH Zürich, 2008–2010

*Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich*

Mitarbeiter: Volker Helm (Projektleitung Phase 2), Markus Giera (Projektleitung Phase 1), Ralph Bärtschi, Tobias Bonwetsch, Michael Lyrenmann, Chang Zhang

*Industriepartner:* Keller AG Ziegeleien

*Beratung:* EMPA – Dübendorf, Professur für Bauphysik – ETH Zürich.

<http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/152.html>

(abgerufen am 20.10.2014)

Kapitel 4.3.1 *Experimentaufbau*

**R-O-B – Mobile Fabrikationsanlage**

Forschungsprojekt

ETH Zürich, 2007–2008



## In-situ-Fabrikation

*Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich*

Mitarbeiter: Michael Lyrenmann (Projektleitung), Tobias Bonwetsch, Ralph Bärtschi

*Ausgewählte Experten:* Viola Zimmermann

*Ausgewählte Unternehmer:* Bachmann Engineering AG

*Modellbau:* Christoph Junk

<http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/135.html>

(abgerufen am 20.10.2014)

### **Pike Loop – Installation im öffentlichen Raum**

Ausstellungs- und Forschungsprojekt

New York, 2009

*Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich*

Mitarbeiter: Michael Knauß (Projektleitung), Brett Albert, Ralph Bärtschi, Gabriel Cuéllar, Markus Giera, Léonard Kocan, Michael Lyrenmann, Marc Pancera, Tom Stewart, Kirsten Weiss

*Ausgewählte Experten:* Buro Happold Consulting Engineers, P.C.

*Auftraggeber:* Storefront for Art and Architecture in conjunction with the New York City Department of Transportation's Urban Art Program

*Sponsoren:* ETH Zürich, Departement Architektur; Keller AG Ziegeleien; Consulate General of Switzerland in New York; Swiss International Airlines; General Shale Brick Inc.; USM Modular Furniture; Pro Helvetia; Sika Schweiz AG; Buro Happold Consulting Engineers, P.C.; Graham Foundation for Advanced Studies in the Fine Arts; New York State Council on the Arts; New York City Department of Cultural Affairs

<http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/159.html>

(abgerufen am 20.10.2014)

### Kapitel 4.4 *Experimente II – In-situ-Fabrikation*

#### **ECHORD: dimRob – In-Situ Robotic Fabrication**

Forschungsprojekt (7. Forschungsrahmenprogramm der EU)

ETH Zürich, 2011–2012

*Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich*

Mitarbeiter: Volker Helm (Projektleitung), Ralph Bärtschi, Tobias Bonwetsch, Selen Ercan, Ryan Luke Johns, Michael Lyrenmann, Dominik Weber

*Industriepartner:* Bachmann Engineering AG, ABB Schweiz AG

<http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/198.html>

(abgerufen am 20.10.2014)

#### Kapitel 4.4.2 *Toleranzen und Scanprozesse*

##### **Stratifications**

Ausstellungs- und Forschungsprojekt

London, Fabricate 2011

*Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich*

Mitarbeiter: Andrea Kondziela (Projektleitung), Volker Helm, Ralph Bärtschi, Dominik Weber

<http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/206.html>

(abgerufen am 20.10.2014)

#### Kapitel 4.4.3 *Mensch-Maschine-Interaktion*

##### **The Endless Wall**

Ausstellungs- und Forschungsprojekt

ETH Zürich, Scientifica 2011

*Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich*

Mitarbeiter: Andrea Kondziela (Projektleitung), Ralph Bärtschi, Volker Helm, Ryan Luke Johns, Dominik Weber

<http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/216.html>

(abgerufen am 20.10.2014)

#### Kapitel 4.4.4 *Lokalisation und Mobilität*

##### **Die fragile Struktur**

ETH Zürich, 2012

Lehrprojekt- und Forschungsprojekt

*Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich*

Mitarbeiter: Luka Piskorec (Projektleitung), Selen Ercan, Thomas Cadalbert, Volker Helm

*Studenten:* Petrus Aejmelaesus-Lindström, Leyla Ilman, David Jenny, Michi Keller, Beat Lüdi

*Sponsoren:* Schilliger Holz AG

<http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/lehre/225.html>

(abgerufen am 20.10.2014)

## 7.6 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt allen Menschen, die mich bei der Erstellung der vorliegenden Dissertation unterstützt haben:

*Prof. Dr. Georg Trogemann*

*Prof. Matthias Kohler*

*Prof. Fabio Gramazio*

*Prof. Dr. Silke Langenberg*

*Dr. Jan Sebastian Willmann*

*Dr. Kai Strehlke*

Des Weiteren möchte ich den folgenden Institutionen und Unternehmen danken, die ebenfalls maßgeblich zur Realisation dieser Dissertation beigetragen haben:

*Professur für Architektur und Digitale Fabrikation der ETH Zürich*

*Lab3 – Labor für experimentelle Informatik an der Kunsthochschule für Medien, Köln*

*Herzog & de Meuron Basel Ltd.*

*ABB Schweiz AG – Industrie- und Gebäudeautomation in Baden*

*Bachmann Engineering AG in Zofingen*

*Keller AG Ziegeleien in Pfungen*

*Lehrstuhl für Robotics and Embedded Systems der Technischen Universität München*

## 7.7 Curriculum Vitae in Deutsch

Nach seinem Architekturstudium an der Universität Siegen (D) spezialisierte sich Volker Helm im Rahmen eines Master of Advanced Studies bei der Professur Ludger Hovestadt (ETH Zürich) auf den Bereich CAAD. Der computergestützte architektonische Entwurf und die automatisierte Produktion waren die Kernthemen dieses Studiums. Im Rahmen seiner Thesis entwarf er eine über das Internet ansteuerbare Schalungsmaschine, die individuell konfigurierte Freiformen nachbilden kann.

Während seiner anschließenden sechsjährigen Tätigkeit im Basler Architekturbüro Herzog & de Meuron lag sein Arbeitsschwerpunkt in der Entwicklung, Programmierung und Realisierung komplexer Geometrien. Hierbei wirkte er an vielen international renommierten Projekten mit wie dem Nationalstadion in Peking. Er leitete bürointerne Seminare und evaluierte computergesteuerte Fertigungsmaschinen.

Seit 2010 ist Volker Helm wissenschaftlicher Mitarbeiter der ETH Zürich an der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation der Professoren Fabio Gramazio und Matthias Kohler (Gramazio & Kohler). In seiner Forschung beschäftigt er sich mit der algorithmischen Beschreibung architektonischer Bauteile und deren roboterbasierten Produktion. 2013 übernahm er die Forschungs-koordination an diesem Lehrstuhl.

Im Jahr 2011 begann er sein Doktorat bei Prof. Dr. Georg Trogemann an der Kunsthochschule für Medien in Köln im Fachbereich der Experimentellen Informatik.

Im Rahmen seiner akademischen Tätigkeit publiziert Volker Helm wissenschaftliche Beiträge, betreut Studien- und Forschungsarbeiten und hält Vorträge an verschiedenen Universitäten und Fachhochschulen.

## 7.8 Curriculum Vitae in English

After successfully completing his studies in Architecture at the University of Siegen (Germany), Volker Helm specialised in CAAD as part of a Master of Advanced Studies under the supervision of Professor Ludger Hovestadt (ETH Zurich). In particular, his studies focused on computer-aided architectural design and automated production. His thesis included the development of a formwork machine, which can be controlled via Internet and is capable of reproducing configured free-form shapes.

He subsequently worked for six years at the Herzog & de Meuron architectural office in Basel specialising in the development, programming and realisation of complex geometries. During this time, he contributed to numerous internationally renowned projects such as the National Stadium in Beijing. In addition, he supervised internal seminars and evaluated computer-controlled production machines.

Since 2010, Volker Helm has been working with Professor Fabio Gramazio and Professor Matthias Kohler as a Research Associate at the ETH Zurich within the Department of Architecture and Digital Fabrication. His research focuses on the algorithmic description of architectural construction elements and their robot-based production. Since 2013 he has been responsible for coordinating the research in this department.

In 2011, he started his doctoral studies with Prof. Dr. Georg Trogemann in the Department of Experimental Informatics at the Academy of Media Arts in Cologne.

As part of his academic work, Volker Helm publishes scientific papers, supervises studies and research, and lectures at various universities and colleges.

### **7.9 Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel *In-situ-Fabrikation – Neue Potenziale roboterbasierter Bauprozesse auf der Baustelle* selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe; aus fremden Quellen entnommene Passagen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft einzeln nachgewiesen.

Ferner versichere ich, weder früher noch gleichzeitig ein Promotionsverfahren bei einer anderen Hochschule beantragt zu haben.

Name: Volker Helm

Unterschrift: \_\_\_\_\_

Ort / Datum: \_\_\_\_\_