

Zur Erhaltung des nicht Haltbaren

SILKE LANGENBERG

ZUSAMMENFASSUNG

Die Art, wie Architektur entworfen und materialisiert wird, hat sich in den vergangenen Jahren gewandelt. Nachdem infolge der Entwicklung digitaler Entwurfswerkzeuge (Computer Aided Design/ CAD) zunächst der Planungsprozess beeinflusst wurde, gewinnen zunehmend auch digitale Fabrikationstechniken (Computer Aided Manufacturing/ CAM) in der Architektur an Bedeutung. Führende Forschungseinrichtungen und Unternehmen haben bereits erfolgreich computergesteuerte Maschinen und Roboter in der Vorfertigung oder auf der Baustelle integriert, um spezialisierte oder variierende Aufgaben durchzuführen.

Mit Blick auf laufende Projekte und den Fluss von Fördermitteln scheint es nur eine Frage der Zeit, dass sich die neuen Techniken in der Architektur etablieren. Eine Auseinandersetzung mit dem Thema der Alterung, Haltbarkeit und Reparaturfähigkeit digital hergestellter Konstruktionen und der Möglichkeit des Ersatzes schadhafter Teile wird damit unausweichlich.

Die Methoden der Bauforschung erscheinen nur ansatzweise geeignet, die ausgeführten Objekte ganzheitlich zu erfassen, denn die digitalen Prozesse sind recht komplex. Mit ihrer Hilfe erstellte Konstruktionen und Bauten werden ohne Fachwissen und deutlichen Materialverlust kaum zu repa-

rieren sein. Aus konservatorischer Sicht stellt sich schon bald die Frage nach der Erhaltung des Originals und dem Wert theoretisch beliebig reproduzierbarer Bauten und Konstruktionen. Längerfristig wird die digitale Architektur sehr wahrscheinlich zu einer Herausforderung im denkmalpflegerischen Diskurs – denn jenseits aller konservatorischen Probleme widerspricht vor allem ihre Prozesshaftigkeit grundsätzlichen Prinzipien der materiellen Erhaltung von Originalsubstanz.

Digital entworfene Architektur

Neben der Nutzung des Rechners als reines Zeichenwerkzeug zur Planerstellung haben sich in den letzten zwei Jahrzehnten vor allem die Möglichkeiten des parametrischen Designs auf die Architektur und gestalterische Formensprache ausgewirkt. Mithilfe verschiedener Programme können nicht nur fließende Formen und komplexe dreidimensionale Körper generiert, sondern auch miteinander verschnitten, verzerrt, rotiert oder anderweitig modifiziert werden. Die erzeugten Geometrien finden ihre Begründung in der unterschiedlichen Gewichtung funktionaler, gestalterischer, nutzungsbedingter oder materieller Einflussgrößen und -faktoren.

Während in der Planungsphase digital entworfener Architektur schon lange eine große Bandbreite an neuen Möglichkeiten Anwendung findet, erfolgt die Ausführung der Gebäude meist konventionell. Die frühen europäischen Bauten von Frank Gehry beispielsweise, wie das Guggenheim-Museum in Bilbao (Abb. 1) oder der neue Zollhof im Düsseldorfer Medienhafen, haben rein konstruktiv nur wenig mit ihrer Gestaltung zu tun. Technische Lösungen zur Herstellung der komplexen Bauteile und freien Formen sind von der Bauindustrie erst zu entwickeln gewesen.¹

Gegen Ende des 20. Jahrhunderts finden die ersten digital entworfenen Bauten allgemein große Beachtung und werden zum Vorbild für eine neue dekonstruktivistische Formensprache. In der Folge entstehen zahllose, den städtischen Kontext



Abb. 1: Guggenheim Museum in Bilbao, 1997, Frank O. Gehry

nur wenig berücksichtigende Solitärbauten, deren spektakuläre architektonische Gestalt helfen soll, Bauherren oder Unternehmen ein fortschrittliches Image zu geben, Stadtquartiere aufzuwerten oder ganze Städte nach dem Vorbild von Bilbao zu beleben.² Mit einer bisherigen Lebensdauer von knapp zwanzig Jahren sind die ältesten dieser Objekte noch immer relativ jung, dennoch stellen viele infolge baukonstruktiver Sonderlösungen oder Schwachstellen sowie mangelnder Reparaturfähigkeit bereits ein Problem dar. Neben grundsätzlichen Fragen bezüglich ihrer materiellen Haltbarkeit wird aber auch ihre „Einzigartigkeit“ zu diskutieren sein.

Die freien, Anfang der 1990er Jahre eher ungewöhnlichen Formen der ersten digital entworfenen Bauten und die Verwendung hochwertiger, häufig auch hochglänzender Fassadenmaterialien tragen zum Wiedererkennungswert der Objekte bei. Durch die vielfache, zum Teil unbeholfene Nachahmung in den folgenden Jahrzehnten, aber auch die Reproduktion erfolgreicher Entwurfsideen durch die ursprünglichen Verfasser, ist dieser Wert mittlerweile deutlich geschwächt. Irgendwann stellt sich zwangsläufig die Frage nach der Originalität eines gestalterischen Konzeptes oder Bauwerkes, von dem es zahllose Kopien gibt: An jedem Ort vielleicht einzigartig werden vermeintliche Alleinstellungsmerkmale in einem größeren Kontext betrachtet zweifelhaft (Abb. 2).

Unter konservatorischen Gesichtspunkten bereiten die digital entworfenen Bauten in zweierlei Hinsicht Probleme. Auf der einen Seite kann bis heute keine Sicherheit der digitalen, dreidimensionalen Planungsdaten garantiert werden, so dass sämtliche Unterlagen kontinuierlich umgespeichert werden müssen.³ Als weitere Möglichkeit der dauerhaften Dokumentation bleibt meist nur der physische, in der Regel zweidimensionale Ausdruck, wobei viele Informationen zwangsläufig verloren gehen. Auf der anderen Seite zeigen die Bauten ähnliche konstruktive Schäden wie die High-Tech-Architektur der späten 1970er und 1980er Jahre: kaum erprobte Konstruktionsarten und wenig dauerhafte Materialien verlangen nach einem kontinuierlichen Austausch. Infolgedessen ist der Wartungsaufwand unverhältnismäßig hoch, die Energiebilanz entsprechend schlecht.

Ein Merkmal digitaler Architektur ist lange ihre Neu- und Andersartigkeit – aufgrund des Einsatzes digitaler Entwurfstechniken gilt sie als modern, fortschrittlich und zukunftsweisend. Einen gewis-



Abb. 2: Bildausschnitte verschiedener Bauten von Frank O. Gehry



Abb. 3: Baustelle des Opernhauses in Guangzhou, 2010, Zaha Hadid

sen Teil ihrer Popularität verdankt sie sicher auch dem „Spektakel“, dass um ihre Planung und Errichtung veranstaltet wird. Inwieweit sich dieses Image mit ihrer Ausführung deckt und ob das Spektakuläre Bestand hat, wenn es zu schnell und schlecht altert, wird kaum thematisiert. Verhältnismäßig spät bemängeln Kritiker, dass die parametrisch entworfenen Bauten nur wenig mit ihrer konstruktiven und bautechnischen Herstellung zu tun haben (Abb. 3).⁴ In der Folge entwickelt sich ein eigener Zweig an Spezialisten, welche bei der schlüssigen Umsetzung digitaler Entwürfe ansetzen.

Transfer von digitalen Daten und Wissen

Um parametrisch generierte Formen konsequent materialisieren zu können, sollten konstruktions-technische und baubetriebliche Faktoren von Anfang an in der Planung berücksichtigt sein. Aufgrund des Zeit- und Kostendrucks in der Entwurfsphase ist



Abb. 4: Digital fabriziertes Bauteil für die Errichtung des Centre Pompidou in Metz

das jedoch häufig nicht der Fall, so dass den komplexen geometrischen Objekten erst nachträglich ein gewisses Ordnungsprinzip zugrunde gelegt wird, um eine überschaubare Anzahl unterschiedlicher Bauteile zu erhalten. Diese können anschließend produziert und auf der Baustelle wieder zu einer komplexen Großform zusammengesetzt werden (Abb. 4). Die Vorteile serieller und industrieller Fertigungstechniken sind auf diese Weise bis zu einem gewissen Grad nutzbar, für einen schlüssigen digitalen Arbeitsablauf (Workflow) von der Planung bis zur Ausführung wären aber vor allem auch digitale Fabrikationstechniken zu integrieren. Ein Problem sind dabei häufig die Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Programmen, mit denen geplant wird und welche die Maschine letztlich steuern. In der Regel ist eine enge Zusammenarbeit mit den Herstellern notwendig. Darüber hinaus arbeiten Spezialisten im Bereich der Programmierung an der Übersetzung von Planungsdaten in Befehle zur Steuerung digitaler Maschinen (G-code), da derartige Kenntnisse und Fähigkeiten bei Architekten keineswegs zur Grundausbildung gehören und in den Planungsbüros nur selten vorhanden sind.⁵

Durch die Einbeziehung von Spezialisten im Bereich der Programmierung bei gleichzeitiger Berücksichtigung herstellungsspezifischen Fachwissens hat die Logik der Ausführung von parametrisch designten Bauten in den letzten Jahren deutlich zugenommen – mit ihr auch das notwendige Fachwissen für einen späteren Umgang mit den Gebäuden. Nicht selten ist das Wissen um Konstruktion und Herstellungsprozess nur bei einem sehr begrenzten Personenkreis verfügbar, darüber hinaus unzureichend und vor allem zu wenig dauerhaft dokumentiert.

Infolge von zunehmender Komplexität der ausgeführten Bauten, unzureichendem Wissenstransfer sowie unsicherer Dokumentation von Programmier- und Prozessdaten sind die Bauten im Fall einer notwendigen Instandsetzung problematisch. Programme, Datenträger und Speichermedien, mit denen ursprünglich gearbeitet wurde, sind schon wenige Jahre später veraltet und ohne größeren Aufwand nicht mehr zu lesen. Am ausgeführten Bauwerk selbst ist die Logik der Fügung häufig nicht erkennbar. Auch wenn die klassische Bauforschung durch die frühe Berücksichtigung und Weiterentwicklung digitaler Messtechniken vergleichsweise gut vorbereitet scheint, werden ihre Methoden bei den sehr komplexen digital erzeugten Formen und optimierten Konstruktionen vermutlich an ihre Grenzen stoßen. Der Einsatz digitaler Messtechniken ist unumgänglich, wobei diese baukonstruktive Zusammenhänge bekanntlich nicht abbilden können. Auf längere Sicht wird in der Bauforschung auch Wissen um neuere, digitale Konstruktionstechniken notwendig sein. Darüber hinaus ist bei den freien, häufig mehrfach gekrümmten und verschnittenen Formen der ausgeführten Bauwerke die digital zu erfassende Datenmenge sehr groß – infolgedessen auch der Aufwand, sie nachträglich zu reduzieren und lesbar aufzubereiten.⁶

Digitale Maschinen und Fügeprinzipien

Mit der fortschreitenden Entwicklung digitaler Fabrikationsmaschinen kommt zu Beginn des neuen Jahrtausends der Wunsch auf, diese auch verstärkt im Bereich der Architektur zu nutzen – sowohl zur konsequenten digitalen Umsetzung parametrisch entworfener Objekte, als auch zur Entwicklung einer vollkommen neuen, eher prozess-orientierten Formensprache. Computergesteuerte Maschinen (Computer Numerical Control / CNC) sind zu diesem Zeitpunkt bereits in anderen Industriezweigen wie beispielsweise der Automobilbranche fest etabliert. Designer nutzen spätestens seit Mitte der 1980er Jahre die Möglichkeiten des „Rapid Prototyping“ zur Formfindung.⁷ Auch in der Architektur erfolgt der Einsatz digitaler Fabrikationsmaschinen zunächst im Bereich des Modellbaus: Digital gezeichnete Pläne von Fassaden beispielsweise werden direkt an die produzierende Maschine – in der Regel einen Laser oder eine Fräse – gesendet, um sie aus flächigen Materialien herzustellen. Anders als im Design bleibt der Modellbau in der Architektur relativ lange auf den zweidimensionalen Bereich beschränkt. Die

Fügung der einzelnen Bauteile erfolgt anschließend rein manuell. Der Grund hierfür liegt vermutlich in der unterschiedlichen Arbeitsweise der verschiedenen Disziplinen, denn anders als Architekten sind es die Designer gewohnt mit Freiformen im dreidimensionalen Bereich zu arbeiten.

Wie zuvor das CAD durchläuft auch die computergestützte Herstellung CAM im Bereich der Architektur eine Phase der Konsolidierung, bevor ihr Potenzial für den gestalterischen Entwurf, die baukonstruktive Ausführung und die Fügung von Bauteilen entdeckt wird. Zunächst ist der Einsatz digitaler Fertigungsverfahren auf kleinere Elemente der Fassade beschränkt, wie beispielsweise Brüstungselemente, Balkongeländer und Verkleidungsplatten, in welche variierende Muster gelasert, gefräst oder gestanzt werden. Darüber hinaus werden die Techniken vor allem im Holzbau eingesetzt, da traditionelle Holzverbindungen vergleichsweise einfach gefräst werden können, anstatt sie handwerklich herzustellen. Durch die Möglichkeit der digitalen Bearbeitung von Platten, die in die Schalung einlegt werden, nimmt schließlich auch der Einfluss im Bereich des Betonbaus zu.⁸ Das Herstellen von Reliefs und komplexen geometrischen Formen aus Beton wird damit sowohl einfacher als auch kostengünstiger.

Neben den subtraktiven und formativen Verfahren⁹ scheinen in den letzten Jahren vor allem additive Verfahren ins Zentrum des Interesses gerückt zu sein – allen voran der 3D-Druck, welcher mit Auslaufen der Lasersintering-Patente im Jahr 2014 einen weiteren Innovationsschub erfahren hat.¹⁰ Auch wenn das Drucken ganzer Bauteile bislang noch eine Ausnahmeerscheinung darstellt, können die Verfahren für bestimmte Anwendungsbereiche in der Architektur, wie beispielsweise die Herstellung von Ersatzteilen, durchaus sinnvoll sein: Im Gegensatz zur industriellen Fertigung ist es möglich, auch kleinere Stückzahlen und individuell angepasste Bauteile wirtschaftlich zu produzieren. Inwieweit sich die digitale Fabrikation auch auf die architektonische Formensprache auswirkt oder ob sie längerfristig nur genutzt wird, um aufwendige handwerkliche Techniken durch günstigere digitale Verfahren zu ersetzen, wird sich zeigen.

Digital fabrizierte Architektur

Versuche, auf Grundlage digitaler Herstellungsprozesse eine vollkommen neue, bis dahin so kaum mögliche architektonische Gestalt zu entwickeln,

zeigen sich erstmals mit der Programmierung eines Industrieroboters zum Ausführen mehrfach gekrümmter Mauerwerkswände im Jahr 2006.¹¹ Die Architekten haben hierzu einen Standardindustrieroboter selbst umprogrammiert und das zum Greifen und Absetzen der Ziegelsteine notwendige Werkzeug entwickelt. Nachdem im Rahmen eines Forschungs- und Lehrprojektes verschiedene Wandelemente erfolgreich hergestellt wurden, ist die Technik zur Gestaltung und Ausführung einer Fassade erstmals an einem Bauwerk angewendet worden (Abb. 5). Die als Brise Soleil eingesetzten Wandelemente sind mithilfe des Roboters vorgefertigt und anschließend segmentweise verbaut.¹²



Abb. 5: Weingut Gantenbein in Fläsch (CH) von Bearth & Deplazes, Fassade von Gramazio & Kohler

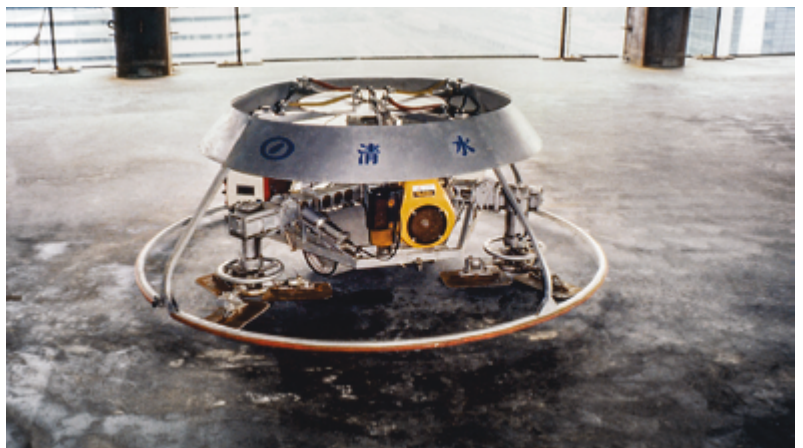


Abb. 6: Roboter zum Estrichglätten von Shimizu Corporation, Kawasaki 1987

Versuche, Roboter zum Mauern beziehungsweise Versetzen größerer Steine zu verwenden, gab es zu diesem Zeitpunkt bereits. Schon Mitte der 1990er Jahre wird in Karlsruhe der Mauerwerksroboter ROCCO präsentiert.¹³ Hierbei handelt es sich um einen „Single Task Construction Robot“, der dazu programmiert ist ein und dieselbe Auf-

gabe auszuführen und in erster Linie menschliche Arbeitskraft zu ersetzen. Einen gestalterischen Mehrwert durch den Einsatz der neuen Technik zu erlangen ist weder beabsichtigt noch vorgesehen. Vergleichbare Roboter sind auch in Japan schon gegen Ende der 1980er Jahre zum Glätten von Beton und Estrich sowie zum Anstreichen entwickelt worden (Abb. 6).¹⁴

Nach erfolgreichem Einsatz des Industrieroboters in der Vorfertigung kommt der Wunsch auf,



Abb. 7: Forschungsprojekt Smart Dynamic Casting, ETH Zürich



Abb. 8: ICD/ITKE Forschungspavillon 2012, Universität Stuttgart

ihn entsprechend den japanischen Vorbildern auch direkt auf der Baustelle agieren zu lassen. Eine erste Weiterentwicklung ist die robotergesteuerte Vorfertigung von Bauteilen direkt auf dem Bauplatz als eine Art Feldfabrikation. Durch den Einsatz vor Ort entfällt der Transport schwerer Bauteile über große Strecken. In einem nächsten Entwicklungsschritt werden die Bauteile vom Roboter schließlich in situ – also direkt an der finalen Stelle – platziert. Ausgestattet mit Fahrwerk und entsprechender Sensorik ist es möglich ihn mobil agieren zu lassen.¹⁵ Im Vergleich zu anderen digitalen Fabrikationstechniken bietet die Robotik den Vorteil, dass die ausführende Maschine nicht auf einen einzigen Herstellungsprozess beschränkt ist. Je nach Endwerkzeug kann der Roboterarm verschiedene Tätigkeiten ausüben. Projekte reichen vom Mauern und Schichten, über kontinuierliche formative Prozesse¹⁶ (Abb. 7), bis hin zum Weben von Glasfasern¹⁷ (Abb. 8) und Biegen von Bewehrungseisen.¹⁸

Neben den Projekten im Bereich der Baurobotik haben sich in den letzten Jahren auch die Versuche gehäuft, Häuser nach dem Prinzip des 3D-Druckers zu bauen. Sie knüpfen zum Teil an japanische Ideen aus den 1980er Jahren an, als Hochhäuser in engen stadträumlichen Situationen unter Zuhilfenahme robotischer Prozesse errichtet wurden. Hierzu sind seinerzeit größere Krananlagen auf dem Baugrundstück installiert worden, die schrittweise mit der Baustelle in die Höhe wuchsen.¹⁹ Unter ihnen konnten in einem kontrollierten Umfeld dann die einzelnen Gewerke mithilfe unterschiedlicher Techniken sowohl handwerklich als auch maschinell ausgeführt werden. Die ersten Versuche Häuser dreidimensional zu drucken arbeiten nach einem ähnlichen Prinzip: Kranbahnen bauen das Material – in der Regel einen Betonwerkstoff – der Grundrissform folgend schichtweise auf.²⁰ Andere Projekte drucken eher kleinere Bauteile, die anschließend vor Ort montiert werden (Abb. 9). Im Jahr 2015 wurde schließlich ein Projekt vorgestellt, das versucht mithilfe eines Industrieroboters eine Brücke „zu drucken“, die einen Kanal in Amsterdam überspannen soll (Abb. 10). Hierzu wird Stahl in einem kontinuierlichen Prozess punktweise geschweißt. Erste kleinere Prototypen sind bereits erfolgreich produziert worden.²¹

Der zunehmende Einsatz digitaler Fabrikationstechniken in der Architektur verlangt auf längere Sicht eine Auseinandersetzung mit Fragen der Alterung, Haltbarkeit und Reparaturfähigkeit.²² Auch



Abb. 9: Im 3D-Druck Verfahren hergestelltes Haus



Abb. 10: Brückenprojekt des Startups MX3D, Design von Joris Laarmann

wenn die meisten der neu entwickelten Konstruktionsweisen sich noch in der Erprobungsphase befinden, müsste langsam damit begonnen werden, nicht nur den Prozess der Montage (Assembling) zu lösen, sondern auch der späteren Zerlegung von Bauteilen (Disassembling). Viele digitale Prozesse sind derzeit nur mithilfe von Klebern im Bauwesen einsetzbar und arbeiten nach dem Prinzip der Schichtung. Gedruckte Konstruktionen sind in der Regel monolithisch. Fehlerhafte Konstruktionspunkte können daher später kaum zerstörungsfrei erreicht werden. Im Fall einer notwendigen Reparatur können häufig nur handwerkliche Techniken angewendet werden. Hier scheinen grundlegende Forschungsarbeiten im Bereich digitaler Fügeverfahren und -prinzipien notwendig.

Grenzen und Chancen des Digitalen

Bei vielen der parametrisch entworfenen, als auch den derzeit mithilfe computergesteuerter Maschinen errichteten Objekte handelt es sich um Versuchsbauten neuartiger Gestaltungsprinzipien oder Konstruktionstechniken. Als solche werden zahlreiche Objekte zu einem Thema für die Denkmalpflege. Die zu Beginn des digitalen Zeitalters parametrisch entworfenen Bauten sind dabei vor allem aus baukulturellen, städtebaulichen und architekturhistorischen Gründen interessant. Aufgrund ihrer in der Regel eher traditionellen Errichtung werden sie vergleichsweise einfach zu bewahren und auch zu reparieren sein. Die digital fabrizierten Bauten dagegen fallen meist in den Bereich konstruktiver und bautechnischer Innovationen und stellen sowohl aus konservatorischen, infolge ihrer Prozesshaftigkeit aber vor allem auch denkmaltheoretischen Gründen eine Herausforderung dar. Die Erhaltung einer Idee und die des ausgeführten Objektes muss möglicherweise gegeneinander abgewogen werden. Der immaterielle Wert eines digital fabrizierten Bauwerkes ist unter Umständen höher als der materielle Wert seiner Originalsubstanz.

Theoretisch ist digital fabrizierte Architektur reproduzierbar. Ein digitaler Herstellungsprozess kann von seinem Grundsatz her jederzeit identisch wiederholt werden, vorausgesetzt die Daten, Maschinen und verwendeten Materialien sind noch verfügbar. Schadhafte Originalbauteile könnten also nachproduziert und ausgewechselt werden, sofern der Prozess ausreichend dokumentiert und der Austausch konstruktiv möglich ist. In der Realität gestaltet sich die Reproduktion eines schadhaften

Bauteils häufig schwieriger, denn digitale Design- und Produktionsprozesse sind meist hochspezialisiert und das Wissen um die Konstruktionen nur bei einem begrenzten Personenkreis verfügbar. Gleichzeitig ist das Problem der langfristigen Datensicherung und des Veraltens von Systemen nicht zu unterschätzen – und viele Schäden treten am Bauwerk naturgemäß erst nach einigen Jahren oder sogar Jahrzehnten auf. In den meisten Fällen wird die Reproduktion eines digital fabrizierten Bauteils am Ende einen erheblich größeren Aufwand erfordern, als für die Herstellung des Originals ursprünglich notwendig war.

Aus konservatorischer Sicht ist der Austausch eines schadhaften Bauteils anstelle seiner Reparatur kaum als Alternative zu bezeichnen, sondern stellt vielmehr die letzte Möglichkeit zur Erhaltung eines größeren Gefüges dar. Das Original geht in seinem ursprünglichen Zustand unwiederbringlich verloren. Zukünftig könnte sich hier allerdings die Frage stellen, wie mit Konstruktionen umgegangen werden soll, die den Austausch grundsätzlich vorsehen. In Japan gibt es bereits Inspektions- und Reparaturroboter, die automatisiert Fassaden abklopfen und lose Teile kontinuierlich durch baugleiche ersetzen.²³ In diesem Fall wäre zu klären, ob das Originalbauteil schützenswert ist, der Steuerungscode, der auf einen bestimmten Prozess spezialisierte Roboter oder das Grundkonzept des kontinuierlichen Austauschs. Gegenwärtige Denkmaltheorien und Schutzkriterien scheinen für den Umgang mit solchen Objekten nur teilweise geeignet.

Aufgrund ihres insgesamt relativ geringen Anteils am Gesamtbestand stellt die digitale Architektur derzeit noch kein Problem dar. Gleichzeitig lässt die Weiterentwicklung digitaler Bauaufnahme- und Reparaturmethoden neue Möglichkeiten im Umgang mit den Objekten erwarten. Erfahrungen mit den digital fabrizierten Konstruktionen und ausgeführten Bauten gibt es aufgrund ihres Alters jedoch bislang kaum und die Frage nach ihrer Alterung, Haltbarkeit und Reparaturfähigkeit muss gestellt werden. Die im Bereich der digitalen Fabrikation tätigen Architekten, Forschungsinstitutionen und Unternehmen sind bisher nur wenig für das Thema der langfristigen Erhaltung ihrer Bauten sensibilisiert. Aufgabe der Denkmalpflege ist es, bereits heute auf die zu erwartenden Probleme im Umgang mit den Gebäuden aufmerksam zu machen und sich auch selbst den Herausforderungen der digitalen Architektur zu stellen.

Abbildungsnachweis

- | | | | |
|---|---|----|---|
| 1 | Copyright: Phillip Maiwald (Nikopol) | 7 | Copyright: Gramazio Kohler Research, ETH Zürich |
| 2 | Copyright Einzelbilder: Google | 8 | Copyright: ICD/ITKE Forschungspavillon 2012, ©ICD/ITKE Universität Stuttgart |
| 3 | Copyright: Frank Kaltenbach | 9 | Copyright: WinSun Decoration Design Engineering Co. / Shanghai, www.3Ders.org |
| 4 | Copyright: Design-To-Production, Zürich | 10 | Copyright: Joris Laarmann / MX3D |
| 5 | Copyright: Ralph Feiner | | |
| 6 | Copyright: Thomas Bock | | |

Anmerkungen

- | | | | |
|----|---|----|--|
| 1 | Bock, Thomas / Linner, Thomas: Customized Automation and Robotics in Prefabrication of Concrete Elements, in: New Perspective in Industrialization in Construction – A State-of-the-Art Report, ed. by Gerhard Grimscheid and Frits Scheublin, Zurich 2010, S. 281–298. | 12 | Liechtenstein, Claude: Weinkellerei Gantenbein, in: Spielwitz & Klarheit, Schweizer Architektur, Grafik und Design 1950–2006, Baden 2006, 275–277. |
| 2 | The Bilbao Effect, in: The Economist, 21.12.2013. www.economist.com/news/special-report/21591708-if-you-build-it-will-they-come-bilbao-effect (09.02.2017). | 13 | Roboter. Heinzelmänner zum Mond, in: Der Spiegel 5/1996, S. 146–149. |
| 3 | Bei Foster & Partners in London beispielsweise sind auf einem Rechner alle Versionen des Programms Autodesk installiert, damit auch ältere Planunterlagen lesbar bleiben. Nach Aussage von Robert und Francis Aish am 13.09.2016 in Zürich. | 14 | Bock, Thomas / Langenberg, Silke: Changing Building Sites. Industrialisation and Automation of the Building Process, in: AD Made by Robots. Challenging Architecture at a Larger Scale, edited by Fabio Gramazio and Matthias Kohler, London 2014, 88–99. |
| 4 | Sheil, Bob / Glynn, Ruairi (Eds.): Fabricate: Making Digitale Architecture, London 2011. | 15 | Helm, Volker: In-situ-Fabrikation. Diss. Köln, 2014. |
| 5 | Das Unternehmen designtoproduction beispielsweise ist führend im Bereich der Gebäudedatenmodellierung, dem Schließen der Prozesskette zwischen Idee und Fabrikation. www.designtoproduction.com (09.02.2017). | 16 | Lloret Fritschi, Ena: Smart Dynamic Casting. A digital fabrication method for non-standard concrete structures, Diss. Zurich 2016. |
| 6 | Zum Aufwand der Datenreduzierung siehe Langenberg, Silke / Irmeler, Bernhard / Sauerbier, Martin: Angemessen messen – best demonstrated practice, in: Von Handaufmass bis Hightech III. 3D in der historischen Bauforschung, hg. v. Katja Heine, Klaus Rheidt, Frank Heinze und Alexandra Reidel, Darmstadt 2011, S. 142–150, Abb.11, S. 149. | 17 | Knippers, Jan / Menges, Achim: Carbon und Glasfaser – vom Roboter gewickelt, in: Deutsches Ingenieurblatt, H. 5., Berlin, 2013, S. 12–14. |
| 7 | Gebhard, Andreas: Rapid Prototyping. Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung. 2. Aufl. München 2000. | 18 | Projekt Mesh Mould Metal, ETH Zürich, 2015–2018. http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/316.html (09.02.2017). |
| 8 | Willmann, Jan / Gramazio, Fabio / Kohler, Matthias: Schalungen digital formen, in: TEC21, H. 35 (Betonexperimente), 2013, S. 28–35. | 19 | Bock, Thomas: Automatisierte Hochbaustellen, in: ibr. Informationen Bau-Rationalisierung, Jg. 41, H. 1, 2012, S. 21–26. |
| 9 | Subtraktive Verfahren nehmen Material weg (z.B. Lasern oder Fräsen), formative Verfahren deformieren Material (z.B. Tiefziehen), additive Verfahren bauen Material auf (z.B. 3D-Druck). | 20 | Das bekannteste Verfahren zum 3D-Druck von Häusern ist von Behrokh Khoshnevis an der University of Southern California (USC) entwickelt worden, www.contourcrafting.org (09.02.2017). |
| 10 | Dornath, Andreas: Patente laufen aus. Wird 2014 das Jahr des 3D-Drucks? In: golem.de , IT-News für Profis, 23.07.2013, www.golem.de/news/patente-laufen-aus-wird-2014-das-jahr-des-3D-laserdrucks-1307-100550.html (09.02.2017). | 21 | Das niederländische Startup MX3D arbeitet in Kooperation mit Autodesk und dem Unternehmen Heihmans an dem Projekt. Das Design der Brücke stammt von Joris Laarman. http://mx3d.com/projects/bridge/ (09.02.2017). |
| 11 | Gramazio Kohler Research, ETH Zürich: Die programmierte Wand, Diplomwahlfach 2006, www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/lehre/81.html (09.02.2017). | 22 | Langenberg, Silke: Die digitale Herausforderung. Alterung, Reparaturfähigkeit und theoretische Reproduzierbarkeit digital fabrizierter Architektur, in: <i>archithese</i> , Eine Schwäche für Materialität, H. 3, 2013, S. 84–85. |
| | | 23 | Bock, Thomas / Linner, Thomas: The Cambridge Handbooks in Construction Robotics. Elementary Technologies and Single-Task Construction Robots, New York 2016. |