

Komplexität bauen

Eine digitale Produktionskette ermöglichte die Umsetzung von Futuropolis

von Christoph Schindler und Fabian Scheurer, ETH Zürich

Komplexität als Zeitwille

Mies van der Rohe hat einmal gesagt, Baukunst sei raumgefasster Zeitwille¹. So wie während der Industrialisierung Sachlichkeit und Zweckmässigkeit als Forderungen der Zeit an die Architektur erkannt wurden, scheint es sich heute mit der Komplexität zu verhalten: Die architektonische Tendenz, die seit den 60er Jahren bis heute in allen Strömungen der Architektur zu beobachten ist, ist eine Zunahme von Komplexität und Vielfältigkeit als Antwort auf die vereinheitlichenden Doktrinen der Moderne². In der zeitgenössischen Architektur ist das Bedürfnis von Bauherren und Planern nach organischen, freien Formen grösser als jemals zuvor. Die Forderung nach mehr Komplexität ist der Zeitwille der post-modernen Architektur.

Gleichzeitig wurde in den letzten Jahren das Milieu für die Entwicklung komplexer Form durch technische Innovationen auf der Planungs- und Fertigungsebene entscheidend verbessert. Den Planern haben in den 90er Jahren fortschrittliche und erschwingliche 3D-Zeichenprogramme einen alten Traum erfüllt: 3D-Programme sind für jedermann zu moderaten Kosten erhältlich und damit ist der Entwurf einer komplexen Form beinahe für jedermann möglich geworden. Formen, die vor wenigen Jahrzehnten noch aufwändig in handwerklichen Modellen entwickelt wurden, können heute dank der digitalen Zeichenwerkzeuge deutlich schneller und genauer dargestellt werden. Ein unregelmässiges Gebäude ist beinahe so schnell entworfen wie eine regelmässige Struktur.

Ähnliches geschieht auf der Fertigungsebene: Das in der Industrialisierung geborene Prinzip der Massenproduktion wurde in den späten 90er Jahren durch die "Mass Customization"³ ergänzt: Die Erstellung individueller Produkte ist im Informationszeitalter zu vergleichbaren Kosten einer Massenfertigung möglich. Moderne Fertigungstechnologien erlauben eine "one-of-a-kind"-Produktion mit dem Aufwand einer Serienproduktion. Die Gebäude der Moderne wurden so geplant, dass sie aus einer Reihung gleicher Teile zusammengesetzt werden konnten. Diese Doktrin verliert ihre Gültigkeit. Die reinen Produktionskosten von regelmässigen Architekturen aus identischen Teilen und unregelmässigen Architekturen aus individuellen Teilen sind vergleichbar geworden.

¹ Ludwig Mies van der Rohe: Baukunst und Zeitwille! In: Der Querschnitt, 4.1924, H. 1, S. 31-32

² vgl. Robert Venturi: Complexity and Contradiction in Architecture, Museum of Modern Art, New York 1966.

³ vgl. Frank Thomas Piller: Mass Customization. 2. Aufl., Gabler, Wiesbaden 2001.

Die digitale Kette: vom Formdesign zum Prozessdesign

Der Gesamtaufwand für ein komplexes Architekturprojekt ist jedoch gegenwärtig noch deutlich grösser als bei einem regelmässigen Bau. Dies liegt an der fehlenden Verbindung zwischen digitalen Entwurfswerkzeugen und digitalen Fertigungsmaschinen. In der Regel wird die Ausführungsplanung der Einzelteile Stück für Stück von Hand vorgenommen. Der Planungsaufwand steigt mit der Anzahl unterschiedlicher Bauteile, und damit auch das Planungsrisiko: Bei Projektänderungen auf der Entwurfsebene müssen alle Bauteile einzeln an die neuen Vorgaben angepasst werden.

Wie können Planer mit diesem fehlenden Glied in der Kette zwischen digitalen Entwurfswerkzeugen und digitalen Fertigungsmaschinen umgehen? Wäre es denkbar, dieses Glied einzufügen und den gesamten Planungsprozess zu einer durchgängigen "digitalen Kette"⁴ zu machen, bei der eine Änderung eines Planungsparameters die Änderung sämtlicher Ausführungsdetails zur Folge hat? Könnten dadurch komplexe Formen wirtschaftlich realisierbar und geometrisch beherrschbar werden?

Wie müsste eine solche digitale Kette aussehen? Um Informationen vom einen Ende an das andere Ende der Kette zu bringen ist ein unterbrechungsfreier digitaler Prozess vom Entwurf (Struktur und Formfindung) über die Konstruktion (Detaillierung) zur Produktion (CNC-Fertigung) notwendig. Die einzelnen Kettenglieder sind programmierte Einheiten, die über universelle digitale Schnittstellen miteinander verbunden sind. Die Ausführungsplanung wäre kein Abarbeiten von ähnlichen Details mehr, sondern die Entwicklung einer algorithmisch automatisierten, intelligenten Prozesskette. Dadurch können nicht nur komplexe Formen wirtschaftlich gebaut werden, sondern es entstehen gleichzeitig aus den Merkmalen der Maschinen rückwirkend neue Konstruktionsansätze für den Entwurf. Der architektonische Planungsprozess verschiebt sich dabei vom Formdesign zu einem Prozessdesign, das Entwurf und Fertigung in gegenseitiger Beeinflussung aneinander koppelt.⁵

Futuropolis als Modell zeitgenössischen Bauens

In einer engen Kooperation des Studio Libeskind in New York, der Forschungsgruppe designtoproduction an der Professur für CAAD der ETH Zürich und der Schreinerei Bach in Heiden konnte eine solche modellhafte digitale Kette zur Bewältigung einer höchst komplexen Aufgabenstellung entwickelt werden.

Der aus 98 Türmen bestehende Entwurf von Daniel Libeskind für die Startwoche 2005 der Universität St. Gallen stellte ungeheure Anforderungen an die Fertigung: Der Entwurf war ein so kompliziertes 3D-Puzzle, dass er mit den Möglichkeiten einer handwerklichen oder industriellen Produktion weder gezeichnet noch gebaut werden konnte. Die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Türmen waren zeichnerisch nicht zu lösen. Das Kernproblem waren die mehreren tausend unterschiedlichen Teile des Entwurfs. Niemand war bereit, das Risiko der Fertigung innerhalb der gegebenen Zeit- und Budgetvorgaben auf sich zu nehmen. Die auf Massenproduktion ausgerichteten, industriellen Fertigungsprozesse waren für den komplexen Entwurf von Daniel Libeskind nicht mehr adäquat. Es war Zeit für einen Paradigmenwechsel.

Gemeinsam mit der ETH Zürich und der Bach Heiden AG wurde für den Libeskind-Entwurf ein durchgehender digitaler Planungs- und Fertigungsprozess massgeschneidert. Für die

⁴ vgl. Ludger Hovestadt: Digital chain - from form design to process design. In: Dirk Hebel, Jörg Stollmann (Hrsg.): Inventioneering Architecture, gta-Verlag, Zürich 2005, S. 14

⁵ vgl. Stephen Kieran, James Timberlake: Refabricating Architecture, McGraw-Hill, New York 2004.

ETH Zürich war die Zusammenarbeit mit Daniel Libeskind eine einzigartige Gelegenheit, die aktuelle Forschung über digitale Prozessketten in der Praxis zu erproben. Seit 2000 forscht dort an der Professur für CAAD von Prof. Dr. Ludger Hovestadt ein interdisziplinäres Team aus Architekten und Informatikern, wie mit computergestützten Prozessen das Bauen weiterentwickelt werden kann. 2005 formierte sich dort die Forschungsgruppe "designtoproduction", die sich explizit mit der Verknüpfung von Entwurf und Produktion befasst. Das Ziel war klar definiert: Die Prozesskette sollte die Umsetzung des Entwurfs mit dem Aufwand einer Serienfertigung ermöglichen.

Zunächst erarbeitete designtoproduction gemeinsam mit der Schreinerei Bach Heiden AG unter statischen und gestalterischen Gesichtspunkten verschiedene Vorschläge für die Materialisierung. Die Wahl des Architekten fiel schliesslich auf stabverleimte Birkenholzplatten. Für die Fertigung selbst wurde eine 5-Achs-Fräse ausgewählt. Die Tischgrösse, die Werkzeuge und die Arbeitsabläufe wurden analysiert und in die Prozessplanung einbezogen.

Anschliessend wurden die Entwurfsdetails entsprechend den Vorgaben aus der Fertigung optimiert. Die Anzahl unterschiedlicher Details wurde auf lediglich elf verschiedene Verbindungen reduziert. Als Verbindung wurden durchgängig Schwalbenschwänze aus Aluminium eingeplant. Eine besondere Herausforderung war dabei die Idee des Architekten, die einzelnen Türme voneinander unabhängig aufstellen zu können.

Um die einzelnen Teile ermitteln zu können, musste die Entwurfsmethodik Daniel Libeskind's in einen Computercode übertragen werden. Mit Hilfe des CAD-Systems Vectorworks⁶ wurde ein parametrisiertes Computermodell der gesamten Struktur programmiert, um die Standfestigkeit der einzelnen Türme zu verifizieren und die exakten geometrischen Beschreibungen für sämtliche Einzelteile automatisch generieren zu können. Dabei wurden in den Entwurf noch zusätzliche Teile eingearbeitet, um die Stabilität der einzelnen Türme gewährleisten zu können.

Die entstandenen 2164 Teile wurden automatisch nummeriert und zu Fertigungsbahnen zusammengefasst. Die Steuerungscode für die computergestützte Produktion wurden automatisch erzeugt und jede der 628 Bahnen wurde bei der Firma Bach in drei Arbeitsgängen auf der 5-Achs-CNC-Fräse aus Birkenstabilholzplatten gefertigt.⁷

Die 98 zwischen 0.2 und 3.8 Meter hohen Türme wurden manuell zusammengebaut. Für jeden Turm stellte designtoproduction eine genaue Bauanleitung bereit. Bei der Montage war die automatisch generierte Nummerierung der Teile eine enorme Erleichterung. Die gesamte Struktur besteht aus 360 Quadratmetern stabverleimten Birkenholzplatten mit 32 Millimeter Materialstärke, insgesamt also fast 11.5 Kubikmeter Holz mit einem Gesamtgewicht von über sieben Tonnen. Die Bauzeit der Struktur betrug durch die optimierte Vorplanung lediglich zwei Wochen.

In einer abschliessenden Betrachtung kristallisierten sich für das Projekt vier wesentliche Verbesserungen gegenüber einer industriellen Ausführungsplanung mit manueller Maschinenprogrammierung heraus:

⁶ vgl. Michelle Ervin: Vectorscript and parametric modeling technology bring Daniel Libeskind's Futuropolis to life, Vectorworks Case Studies, <http://www.nemetschek.net/news/casestudies.php>, Columbia 2005

⁷ vgl. Fabian Scheurer, Christoph Schindler, Markus Braach: From Design to Production - Three Complex Structures Materialised in Wood. In: Generative Art 2005. Proceedings of the 6th International Conference. Hrsg. Celestino Soddu. Milan, 2005.

Wirtschaftlichkeit

Mit Hilfe von Programmier- und parametrisierten Bauteilen wird eine Variantenfertigung ohne zusätzlichen Zeit- und Kostenaufwand möglich. Konstruktionen aus individuellen Bauteilen, die bisher nur mit hohem Kostenaufwand realisierbar waren, werden wirtschaftlich interessant. Üblicherweise muss jedes einzelne Bauteil, das ein Holzbau- betrieb als Datei erhält, für die Verarbeitung auf den CNC-Maschinen vorbereitet werden: Arbeitsabläufe und Werkzeuge müssen für jedes einzelne Teil bestimmt werden. Diese sich wiederholenden, ähnlichen aber nicht gleichen Vorgänge hat designtoproduction mit Algorithmen automatisiert. Gleichzeitig gibt es keinen "Risikofaktor" mehr. Mit dem Risikofaktor wird in den Betrieben zusätzlicher Planungsaufwand durch Entwurfsänderungen, Fehler etc. abgedeckt. Die Kostenaufschlüsselung des Projekts zeigt ein erhebliches Einsparpotential. Die Kosten der Schreinerei konnten um erstaunliche 76% gesenkt werden⁸. Die Gegenofferten weltweit angefragter Betriebe bestätigen die von Bach Heiden erstellte Hochrechnung für eine "händische" Produktion.

Planungsflexibilität

Wenn eine digitale Prozesskette einmal programmiert ist, können die numerischen Parameter des Projekts jederzeit geändert werden. Da die Codes für die Maschinensteuerung automatisch geschrieben werden, dauert eine komplette Überarbeitung der Ausführungsplanung nur wenige Minuten bis Stunden. Bei Libeskind's Futuropolis mussten beispielsweise die Abmessungen sämtlicher 2164 Einzelteile angepasst werden, nachdem das bestellte Material mit einer Stärke von 32 anstatt 30mm geliefert wurde. In einer herkömmlichen, zeichnerisch bearbeiteten Ausführungsplanung hätte dieser Vorfall zwei Wochen vor der Eröffnung das Ende des gesamten Projekts bedeutet. In der automatisierten Ausführungsplanung konnte der Parameter "Materialstärke" geändert werden und innerhalb weniger Stunden lagen die angepassten Maschinencodes für sämtliche Einzelteile vor. Durch diese Planungsflexibilität konnten die Einzelteile unmittelbar vor der Eröffnung "just-in-time" gefertigt und direkt von der Fräse zur Eröffnung in die Tonhalle St. Gallen transportiert werden. Eine arbeitsintensive Zwischenlagerung an einem dritten Ort war nicht notwendig.

Qualitätssicherung

In einer digitalen Prozesskette passieren keine Flüchtigkeitsfehler bei einzelnen Teilen. Da alle Bauteile mit den gleichen Programmen bearbeitet werden, sind entweder alle Teile richtig oder keines. Auch dieses Merkmal der digitalen Kette trat in der Praxis in Erscheinung: Wenige Tage vor der Ausstellungseröffnung wurde bei der Montage ein falscher Winkel an den Teilen festgestellt. Binnen kürzester Zeit konnte man herausfinden, welche anderen Teile von diesem Fehler betroffen waren und lieferte einige Stunden später sämtliche Maschinencodes für die korrigierten Bauteile.

Verfeinerung

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden das Ornament und das Detail aus der Architektur verbannt. Industrialisierung, Massenproduktion und aufwendige Detaillierung schienen inkompatibel. Heute können die Qualitäten handwerklicher Detaillierung (Einmaligkeit, Präzision, Diversität) mit computergesteuerten Entwurfsprozessen und CNC-Maschinen

⁸ vgl. Heinrich Wettstein: Unmögliches wird plötzlich bezahlbar. In: Schreinerzeitung 2/2006, Hrsg. VSSM Verband Schweizerischer Schreinermeister- und Möbelfabrikanten, Zürich 2006

in die Fertigung integriert werden: Eine digitale Produktionskette bietet die Möglichkeit zur Verfeinerung der Ausführung durch Details, die durch die Programmierung alle unterschiedlich sein können und durch die CNC-Fertigung eine dem Handwerk unbekanntere Präzision erreichen. Bei Libeskind's Futuropolis wurde ein Detail aus dem Möbelbau wiederentdeckt, das seit der Industrialisierung nur noch bei hochwertigen Einzelanfertigungen zum Einsatz kam: der Schwalbenschwanz. Durch den Einsatz von Schwalbenschwänzen können frisch verleimte Teile ohne Schraubzwingen in Position gehalten werden. Aus dieser produktionstechnischen Vorgabe entwickelte sich ein Detail, das für die Erscheinung prägend war. Bei Futuropolis wurden tausende von Aluminiumschwalbenschwänzen eingesetzt, die durch den schrägen Anschnitt neue, verzogene Geometrien bekamen.

Christoph Schindler (Architekt) und Fabian Scheurer (Informatiker) sind Doktoranden bei Prof. Dr. Ludger Hovestadt an der Professur für CAAD der ETH Zürich. Seit 2005 beraten sie dort mit der "designtoproduction"-Gruppe Planer bei der Umsetzung komplexer Geometrien. Die Arbeit von designtoproduction und Bach Heiden für Futuropolis wurde 2005 mit dem "holz21"-Förderpreis des BUWAL (Schweizerisches Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) ausgezeichnet.

Entwurf

Daniel Libeskind, New York
Projektarchitekt: Thore Garbers
www.daniel-libeskind.com

Ausführungsplanung und Programmierung

caad.designtoproduction.com,
Professur für CAAD, Prof. Dr. Ludger Hovestadt, ETH Zürich
Fabian Scheurer, Christoph Schindler, Markus Braach
www.designtoproduction.com

CNC-Production

Bach Heiden AG, Heiden
www.bach-heiden.com