

Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 139 (2013)
Heft: 35: Betonexperimente

Artikel: Schalungen digital formen
Autor: Willmann, Jan / Gramazio, Fabio / Kohler, Matthias
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-349278>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

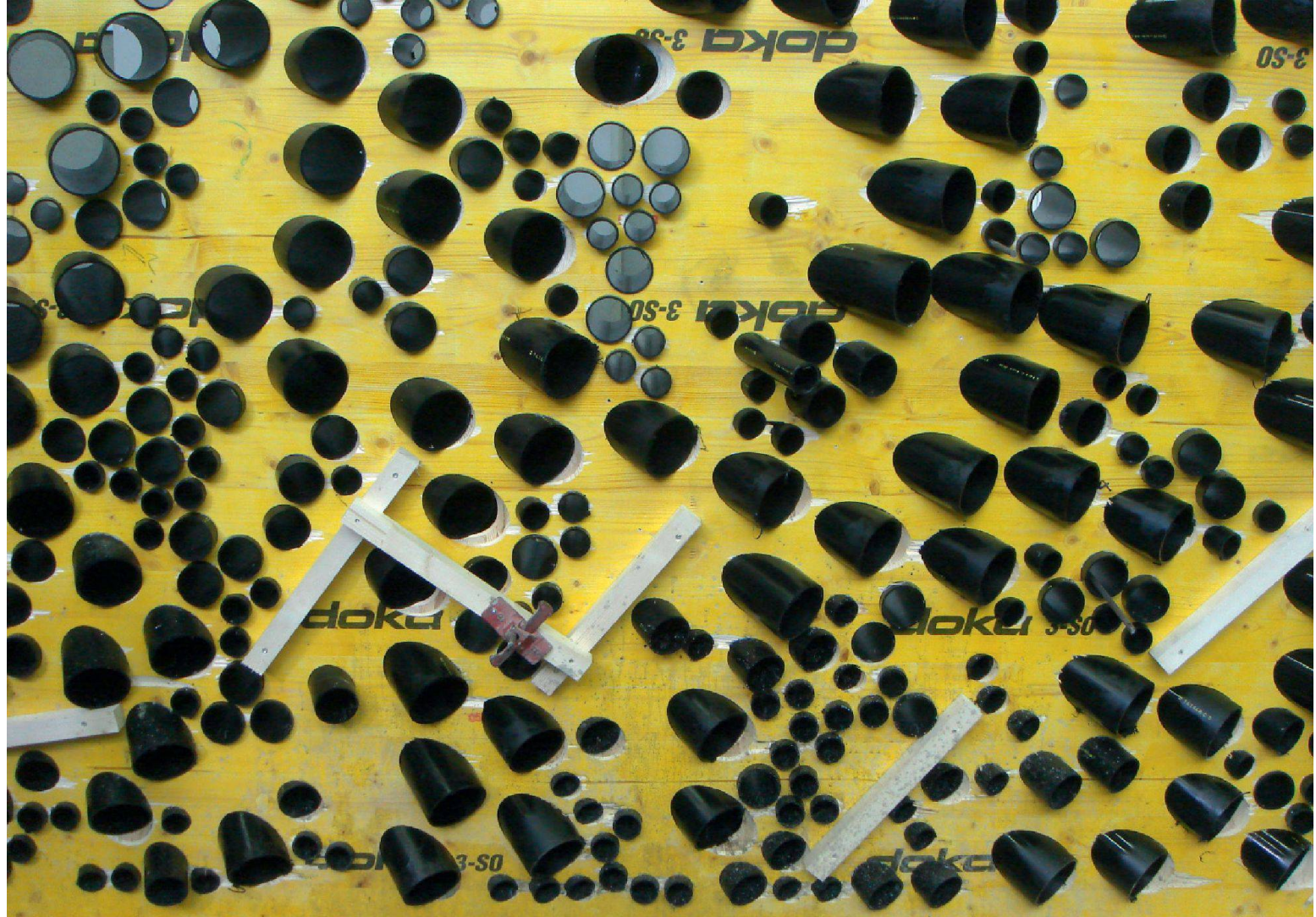
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 03.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



01

SCHALUNGEN DIGITAL FORMEN

Seit 2005 werden an der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation von Fabio Gramazio und Matthias Kohler an der ETH Zürich die Möglichkeiten digitaler Entwurfs- und Produktionsmethoden ausgelotet. Im folgenden Beitrag stellen die Architekten fünf Forschungs- und Installationsprojekte, in denen verschiedene unorthodoxe Fabrikationsverfahren für Betonprodukte entwickelt wurden, und eine praktische Anwendung digital fabrizierter Schalungen für die Herstellung ornamentaler Deckenelemente vor.

Titelbild

Detailaufnahme einer Platte des lichtreflektierenden Betons «BlingCrete» (vgl. S. 43) mit auf Beton applizierten Mikroglasskugeln, Grösse 40 × 30 × 2 cm. (Foto: Boris Trenkel)

Heute erfüllt sich in der Architektur die Synthese von Daten und Material. Durch das Wechselspiel zwischen digitalen und materiellen Prozessen beim Entwerfen und Bauen treffen zwei scheinbar separate Welten aufeinander. Von da an lassen sich Daten und Material nicht mehr nur als Ergänzung, sondern als konstruktiv bedingter und somit wesentlicher Ausdruck der Architektur im digitalen Zeitalter interpretieren.¹

Die gezeigten Projekte verdeutlichen, dass architektonische Materialität durch digitale Fabrikationsprozesse keineswegs relativiert wird, sondern sich als zentrales Motiv zwischen Entwurf und Herstellung, zwischen Programmierung und Konstruktion etabliert. Der Einsatz digitaler Werkzeuge erschöpft sich nicht in der reinen Gestaltung oder Optimierung der Fabrizierbarkeit einzelner Bauteile. Vielmehr ist er unmittelbar den jeweiligen Materialeigenschaften angepasst. Das manifestiert sich im Betonbau auf exemplarische Weise und eröffnet ein weites Spannungsfeld zwischen Material, Information und Plastizität. Dabei

01 Für die Herstellung der «perforierten Wand» von 2006 fräste ein Roboter Löcher in die Schalung. In diese wurden vor dem Betonieren passgenaue Leerrohre gesteckt. (Foto: Gramazio & Kohler, ETH Zürich)

02–03 Die vorfabrizierten Betonelemente aus Weisszement spiegeln die Präzision und den hohen Informationsgrad der digitalen Fabrikation der Installation «Interference Cube» von 2003 wider. (Foto 02: Gramazio & Kohler, ETH Zürich; Foto 03: Roman Keller)

gilt es, fernab von industrieller Einheitlichkeit oder formaler Vordergründigkeit eine materielle Vielfalt zu ermöglichen, um neue Ordnungen in der Architektur zu entdecken. So gelingt die Erforschung und Aufnahme der neuesten digitalen Technologien in den Gehalt der Architektur; gleichzeitig wird es möglich, diese architektonisch nutzbar zu machen und ästhetisch, konstruktiv und räumlich aufeinander zu beziehen.

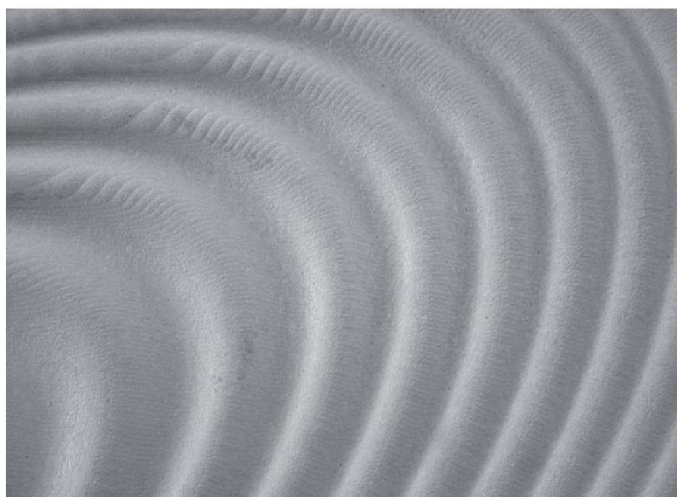
Ziel der Forschung ist die Entwicklung computergestützter Entwurfs- und Fabrikationsverfahren sowie die Untersuchung roboterbasierter Materialprozesse. So wird es möglich, neuartige räumliche und funktionale Konfigurationen effizient und präzise zu fabrizieren. Dabei ist nicht allein der Entwurf einer architektonischen Form entscheidend, sondern ebenso der Entwurf eines Herstellungsprozesses. Dieser liefert die Grundlagen sowohl für die materielle Organisation eines Bauteils als auch für dessen Ausführung. Diese Reichhaltigkeit zielt auf das tatsächliche Potenzial des Materials ab und könnte zu völlig neuen Ausdrucks- und Bedeutungsformen des Bauens im digitalen Zeitalter führen.

FREI FORMBAR UND EFFIZIENT

Beton rückt dabei zunehmend in den Mittelpunkt der digitalen Fabrikation. Er ist ein wichtiger Baustoff, der sich im 20. Jahrhundert aufgrund seiner konstruktiven Leistungsfähigkeit und seiner vielfältigen Einsatzmöglichkeiten in der Architektur etabliert hat. Beton lässt sich in eine Vielzahl von Formen bringen, dadurch können Betonbauteile in unterschiedlichen Massstäben unter Integration vielfältiger funktionaler und ästhetischer Anforderungen realisiert werden. Der Schalungsprozess ist eine zentrale Grundlage, um die beinahe unbegrenzte Formbarkeit des Betons ausschöpfen zu können. Die Herstellung individuell geformter Schalungen verursacht bis zu 60% der Kosten von Betonbauteilen – und gerade bei Unikaten entsteht viel Abfall, denn in den meisten Fällen wird die Schalung nach dem Ausschalen weggeworfen. Umgekehrt ermöglicht erst die freie Formgebung einen optimalen Einsatz von Beton, was im heutigen Bewusstsein begrenzter materieller Ressourcen eine nicht unerhebliche Erkenntnis ist. So werden effiziente und flexible Herstellungsverfahren im Lauf der Zeit zunehmend an Bedeutung gewinnen – jedoch nicht nur, um Ressourcen zu schonen, sondern ebenso, um die entwerferischen und konstruktiven Freiheitsgrade zu erhöhen.²

AM ANFANG WAR DER WÜRFEL

Fabio Gramazio und Matthias Kohler befassen sich in Praxis, Lehre und Forschung seit Längerem mit diesem Thema.³ Einen ersten Ansatz zeigte ihre 2003 im Rahmen der Swiss Art Awards realisierte architektonische Installation «Interference Cube».⁴ Als prototypische Raumeinheit wurde ein Würfel gewählt, bei dem fünf Seiten aus vorfabrizierten Beton-



02



03



04

elementen aus Weisszement bestanden. Hergestellt wurden die individuellen Wandelemente mithilfe von fünf CNC-gefrästen, hochaufgelösten Schalungsmatrizen, die in eine standardisierte Schalung eingelegt werden konnten. Die Wände bildeten auf den Innenseiten ein imaginäres räumliches Kräftefeld ab, das mittels Programmierung ein kontinuierliches, eckübergreifendes Oberflächenrelief auf der Geometrie des Würfels zeichnete. In der Installation wurden die Raumbegrenzungen zu «Rezeptoren», es entstand ein Wechselspiel zwischen den dreidimensionalen Mustern im Inneren und ihrer rhythmischen Ausbreitung über mehrere Raumeinheiten hinweg. Auf diese Weise erschien der Beton für den Betrachter flüssig, und die Schwere der Betonelemente schien sich aufzulösen (Abb. 02–03). Im Projekt «Interference Cube» erhielt die digitale Veredelung im Betonbau eine grosse Bedeutung. Durch sie wurde der Baustoff plastisch, stofflich und differenziert. Er vereinte dabei die Logik des Digitalen und des Materiellen – sowohl in der Herstellung als auch im Ausdruck.⁵

04 Die «perforierten Wände» lassen sich in unterschiedlichen Variationen herstellen und demonstrieren die neuartige Transparenz digital hergestellter Betonbauteile.

05–07 Im 2011 durchgeführten Projekt «Prozedurale Landschaften» liess sich der roboterbasierte Herstellungsprozess wieder verwendbarer Schalungen sowohl durch das Streuen von losem Sand als auch durch das Verdichten von tonartigen Materialien realisieren. **08** Abgegossenes Betonelement im architektonischen Massstab.

09 Das Projekt «Prozedurale Landschaften» erlaubt durch den digitalen Fabrikationsprozess eine Vielzahl geometrischer und konstruktiver Anpassungen.

(Fotos: Gramazio & Kohler, ETH Zürich)



05



06



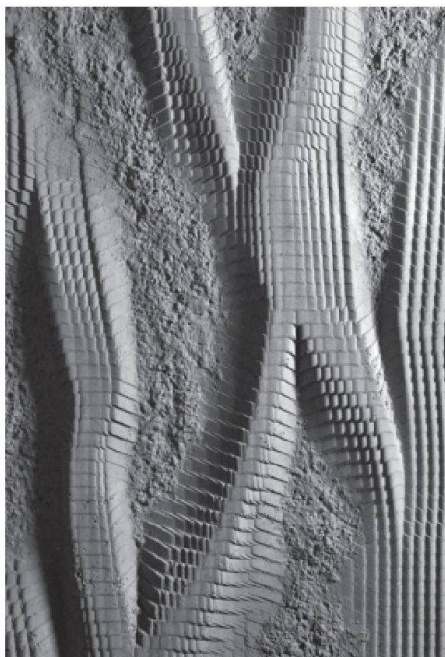
07

DIGITALE PERFORATION

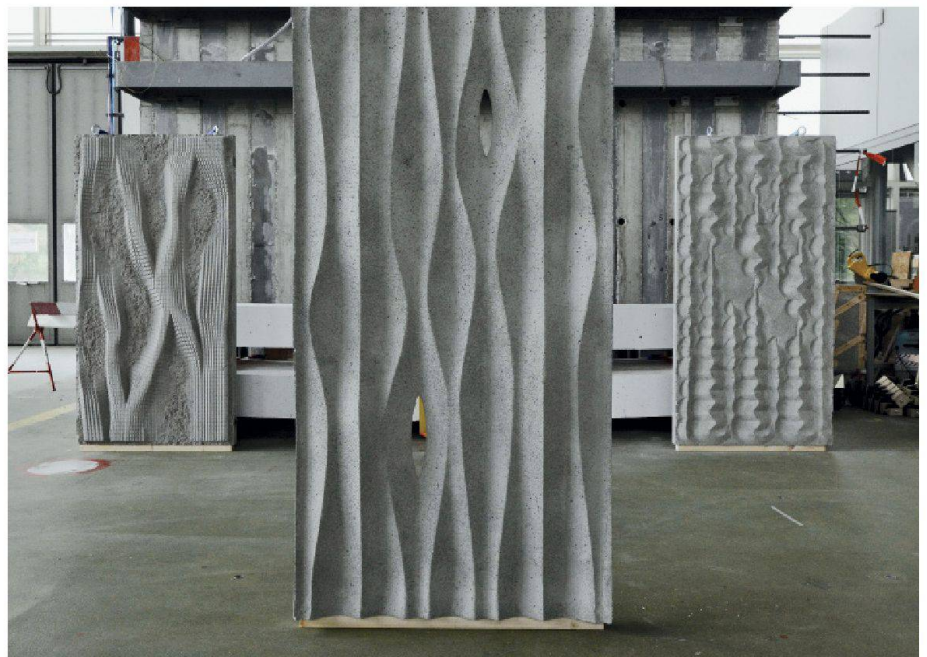
Das Projekt «Die perforierte Wand» von 2006 führte den Ansatz des «Interference Cube» weiter.⁶ Hier erzeugte ein Industrieroboter unterschiedliche Perforationen in Schalungselementen, die wiederum die Grundlage für geometrisch differenzierte Betonelemente im Massstab 1:1 bildeten. Vier Parameter definierten die individuellen Löcher: Position auf der Wandfläche, Durchstosswinkel, Rotation um den Lochmittelpunkt und Lochdurchmesser (vgl. Titelbild, Abb. 01). Global wirkende Anziehungs- und Abstossungskräfte steuerten die Verteilung der Löcher. Ein dynamisches System sorgte dafür, dass sich die Löcher nicht überlappen. Der Durchstosswinkel der Lochdurchmesser wurde dagegen über die Farbwerte einer digitalen Bilddatei definiert. Die «perforierten Wände» demonstrierten dabei nicht nur das Potenzial effizienter roboterbasierter Herstellungsprozesse, sondern auch eine neuartige Tiefe und Transparenz von digital hergestellten Betonbauteilen (Abb. 04). Dabei stellte der robotergestützte Fabrikationsprozess nicht nur die notwendige Präzision und Effizienz sicher, sondern erlaubte auch eine Vielzahl geometrischer Variationen und konstruktiver Anpassungen. Das Projekt zeigte, dass materialbewusste Entwurfs- und Fabrikationsverfahren eine Annäherung an die bauliche Realität im Sinne realer Massstäbe, Verfahren und Anforderungen ermöglichten. Sie waren zugleich auch eine grundlegende Voraussetzung für das Erkunden, Beschreiben und Verstehen neuartiger digitaler Herstellungsprozesse. Daher galt es, neben traditionellen Bauverfahren für Betonelemente auch gänzlich neue Verfahren und Materialaggregationen zu untersuchen.

STREUEN UND AUFBAUEN STATT FRÄSEN

Das Projekt «Prozedurale Landschaften» übertrug 2011 traditionelle Sandgussverfahren, die in der Metallgiesserei seit Jahrhunderten gebräuchlich sind, auf die Formgebung von Beton (Abb. 05–09).⁷ Nicht standardisierte Betonschalungen werden hingegen traditionell durch subtraktive Fräsprozesse aus Vollmaterial hergestellt. Mit dem Einsatz von wiederverwendbaren Sandschalungen beschritt das Projekt «Prozedurale Landschaften» ähnliche Wege wie der Metallguss. Dabei erzeugte ein Industrieroboter unterschiedliche Sandformierungen, die mit Beton abgegossen und immer wieder neu fabriziert und variiert werden konnten. Eine besondere Herausforderung für derartige robotergenerierte Gussformen war das



08



09



INNERE FASSADE BUNDESSTRAFGERICHT BELLINZONA

Die vom Zürcher Architekturbüro Gramazio & Kohler entworfenen Verkleidungen der Kuppeln des Bundesstrafgerichts in Bellinzona sind einzigartig: Plastisch, verspielt und sinnlich erinnern sie an florale Motive des 19. Jahrhunderts. Entstanden sind sie mit modernster Technologie, als Produkte des digitalen Zusammenwirkens von Entwurf, Materie und Fabrikation.

Im März 2000 nahm das Schweizervolk die Justizreform an, die unter anderem die Schaffung des Bundesstrafgerichts in Bellinzona zur Folge hatte. Diese Behörde nahm ihre Tätigkeit 2004 zunächst in provisorischen Räumlichkeiten auf, bis ihr der Kanton Tessin im Stadtzentrum ein repräsentatives älteres Gebäude mit grossem Innenhof, die «scuola di commercio», zur Verfügung stellte. Für dessen Um- und Neubau führte der Kanton Tessin im Frühjahr 2008 einen öff-

entlichen Projektwettbewerb durch. Das erst-rangierte und 2009–2013 ausgeführte Projekt umfasst als zentrale neue Elemente zwei Gerichtssäle im Innenhof in Form von Pyramidenstümpfen¹ mit Oberlicht. Die in Stahlbeton ausgeführten Säle sind innen mit vorfabrizierten ornamentalen Betonpaneelen ausgekleidet.

Die Paneele weisen die für die Akustik (Optimierung der Nachhallzeit, vgl. u.a. TEC21 11/2012) notwendige Porosität auf und bewirken durch die Wiederholung ähnlicher Grundelemente eine ornamentale Plastizität, wie man sie etwa von den floralen Motiven von William Morris² aus dem späten 19. Jahrhundert kennt.

Für die Betonpaneele wurden multiple Matrizen für drei digital gefräste Formteile hergestellt. Geometrie und Fügung der vorfabrizierten Elemente wurden einerseits dem zugrunde liegenden Schalungsprozess und andererseits dem anschliessenden Montageverfahren auf Ortbetonträgern angepasst. Vorgängig hatten die Architekten verschiedene geometrische Möglichkeiten zuerst ausprobiert und dann ihre technologische Machbarkeit systematisch untersucht. Zu Beginn des Projekts existierten erste analoge Modellstudien. Erst das digitale Zusammenwirken von Entwurf, Material und Fabrikation ermöglichte schliesslich die geometrisch komplexe und ökonomisch effiziente «Modulierung» der «inneren Fassade» des Bundesstrafgerichts.

10 Die organische Tiefenstruktur der digital fabrizierten Betonelemente für das Bundesstrafgericht in Bellinzona basiert auf der Wiederholung ähnlicher Grundelemente.

(Foto: Gramazio & Kohler, 2012)

11 Schichtenaufbau und Schnitt: Die komplexe Geometrie wurde dem Schalungsprozess und dem Montageverfahren angepasst.

(Plan: Gramazio & Kohler, 2012)

Anmerkungen

1 Diese werden häufig als Kuppeln bezeichnet. Damit wird eher ein Bezug zu Repräsentations- und Sakralbauten evociert.

2 William Morris (1834–1896) war einer der vielseitigsten und kreativsten britischen Künstler des 19. Jahrhunderts. Der Londoner war als Maler, Architekt, Designer, Dichter, Kunstgewerbler, Ingenieur und Buchdrucker erfolgreich. Er förderte die Kunstbewegung der prä-raffaelitischen Bruderschaft, die den Handwerker als Künstler sah. Später war er Mitbegründer des Arts and Crafts Movement und früherer Begründer der sozialistischen Bewegung in Grossbritannien. 1861 war er Mitgründer der Firma Morris, Marshall, Faulkner & Co., die Möbel, Wanddekorationen und Glasgemälde produzierte, in der er zeitlebens tätig blieb; Morris' Entwürfe werden noch heute unter Lizenz vertrieben. 1877 gründete er die Society for the Protection of Ancient Buildings, eine Vorläuferin des National Trust. Ab 1878 entwarf und produzierte er sowohl handgeknüpfte als auch maschinell gewebte Teppiche, häufig mit floralen Motiven.

AM BAU BETEILIGTE (AUSZUG)

Bauherrschaft: Bundesamt für Bauten und Logistik BBL

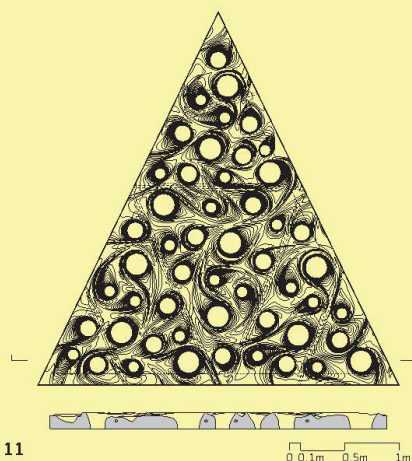
Gestaltung innere Fassade: Gramazio & Kohler, Zürich, in Zusammenarbeit mit CDL Bearth & Deplazes AG, Durisch + Nollì Architetti Sagl, Mitarbeiter: Sarah Schneider (Projektleitung)

Baustatik: Jürg Buchli, Conzett Bronzini Gartmann AG

Akustik Säle: PD Dr. Dorothea Baumann mit Lanfranchi Ingénierie Informatique et Acoustique

Matrizenherstellung: NOE Schaltechnik GmbH

Elementbau: TGM prefabbricati S.A.



11

12 Schalungstechnik mit Wachselementen zur nachhaltigen Herstellung individuell geformter Betonelemente.

(Grafik: Gramazio & Kohler, ETH Zürich)

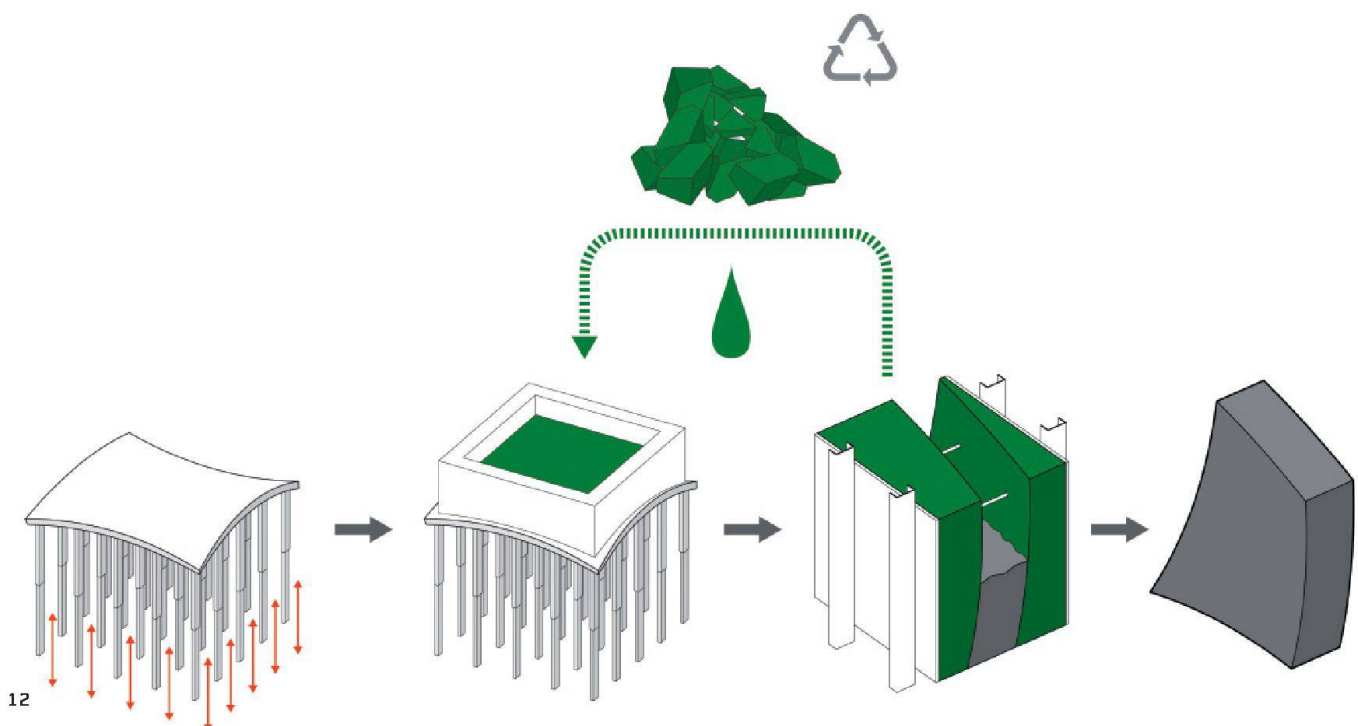
Eigenverhalten von granulösem Material wie Sand, weil es durch das Streuen und Verdichten nicht vollständig vorhersehbare Aggregationen einnahm (Abb. 05–07).⁸

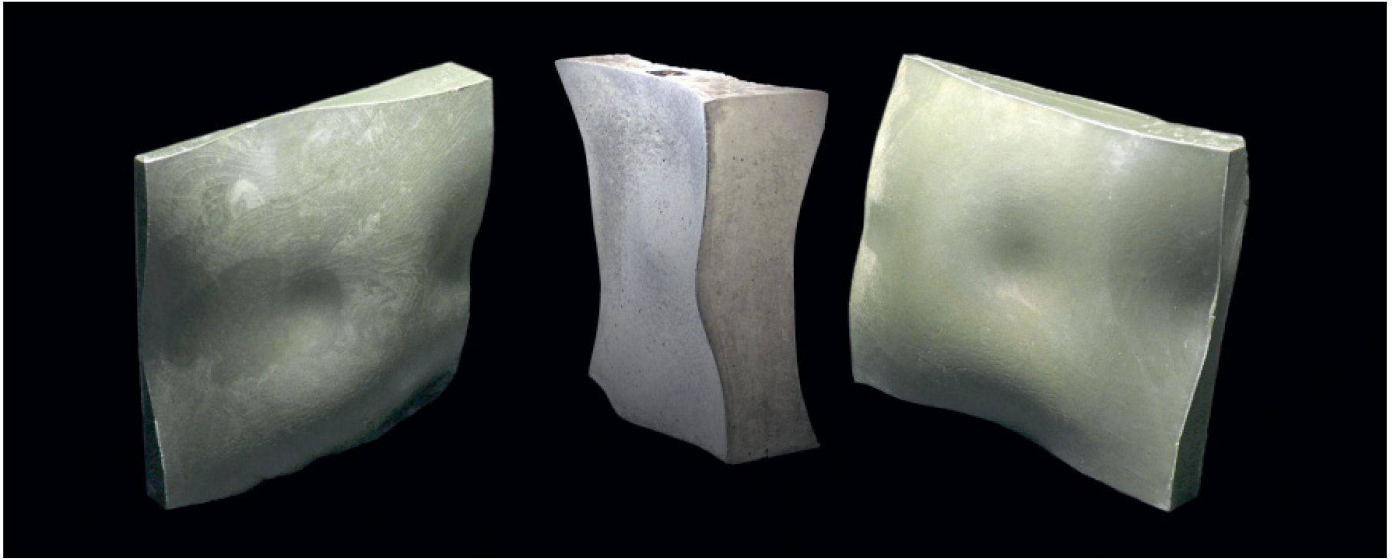
Nach dem Auftragen des Sands durch den Roboter wurde eine Trennschicht aus Silikon aufgesprüht, die das Einsickern des Betons in den (offenporigen) Sand verhinderte, das spätere Ausschalen erleichterte und vor allem den Sand in Form hielt. Die geometrischen Möglichkeiten waren naturgemäss limitiert und beispielsweise auf flache Kurvaturen beschränkt. Aus diesem Grund wurde im gleichen Projekt zudem «Formsand» (Tonsand, der ursprünglich aus dem Maschinen- bzw. Formenbau stammt) eingesetzt. Dieser Sand lässt sich durch Stampfen mit dem Roboter sehr stark verdichten und behält seine Form auch während des Abgiessens; die Trennschicht konnte in dieser Variante entfallen.

Der mit Sensortechnik ausgestattete Industrieroboter ermöglichte es, die entstehenden Formationen während des Fabrikationsprozesses zu kontrollieren und zu gestalten. Bereits vorhandene Schüttkegel wurden gescannt und die Messdaten für weitere Masseanhäufungen ausgelesen, sodass Sandmenge, Bewegungsgeschwindigkeit und Fallhöhe von neuen Sandaggregationen gezielt angepasst werden konnten. Damit befasste sich das Projekt mit materiellem Eigenverhalten und brachte dieses in einen Zusammenhang mit digitalen Entwurfs- und Fabrikationsprozessen. Die Auswirkungen lassen sich – im Unterschied zur experimentellen Forschung der 1970er-Jahre⁹ – in der vollen physischen Komplexität untersuchen und reproduzieren. Sie eröffneten andererseits auch die Möglichkeit, diese in unterschiedlichen Massstäben und architektonischen Anwendungen zu interpretieren (Abb. 08–09).

WACHS ANSTELLE VON SAND

Einen ähnlichen Weg geht das gegenwärtig laufende, mit dem Global Holcim Innovation Award ausgezeichnete EU-Forschungsprojekt «TailorCrete».¹⁰ Auch hier steht ein material-effizientes Fabrikationsverfahren für frei geformte Ortbetonbauteile im Vordergrund. Grundlage dafür sind digital produzierte Wachsschalungen, die immer wieder eingeschmolzen und neu auf der Baustelle verwendet werden können. Die nahezu abfallfreie Schalungstechnik basiert auf einem Formtisch, der durch einen Industrieroboter justiert werden kann.





13

13 Die digital fabrizierten Wachselemente können nach dem Ausschalen eingeschmolzen und für den nächsten Fabrikationszyklus verwendet werden.

(Foto: Gramazio & Kohler, ETH Zürich)

14 Roboterassistiertes Gleitbauverfahren ohne zusätzliche Schalung. (Foto: Christian Breitler)

Darauf wird das erhitzte Wachs in einen Rahmen gegossen. Nach dem Aushärten können die individuell geformten Wachselemente in eine herkömmliche Schalung eingelegt und für die Erzeugung von Ortbetonbauteilen mit komplexer Geometrie verwendet werden (Abb. 12).¹¹

Derartige Herstellungsprozesse, die vor der Verfügbarkeit digitaler Fabrikationstechniken kaum machbar waren oder sinnvoll gewesen wären, lassen sich mit dem Roboter heute ressourceneffizient realisieren. Vorgelagert sind Untersuchungen der Wachseigenschaften wie Schrumpfungs- und Verformungsverhalten oder Druckfestigkeit und die Entwicklung digitaler Planungswerkzeuge und produktionsspezifischer Abläufe. Die Innovation von «Tailor-Crete» besteht darin, dass sich eine neue digitale Fabrikationstechnik mit konventionellen Arbeitsweisen und Werkzeugen vor Ort effizient und flexibel realisieren lässt, was das Repertoire an nachhaltigen Herstellungstechniken für Betonbauteile erweitert (Abb. 13).

OHNE SCHALUNG GEFORMT

Dabei rückt vor allem das Abstimmen der Fabrikation auf die materiellen Besonderheiten von Beton in den Mittelpunkt, um daraus zentrale Entwurfs- und Herstellungsparameter ableiten zu können. Dies zeigt das laufende Forschungsprojekt «Smart Dynamic Casting». ¹² Hier lassen sich individuell geformte Betonbauteile ohne Schalung realisieren. Eine auf den digitalen Fabrikationsprozess abgestimmte Betonmischung wird in eine rohrförmige Gleitschalung gefüllt. Sobald die eingebrachte Betonfüllung stabil genug ist, um das eigene Gewicht zu tragen, kann die Schalung sukzessive durch den Roboter nach oben gezogen werden. Zugleich werden Geometrie und Geschwindigkeit dem individuellen Härtegrad der im Rohr gerade aushärtenden Betonmasse anpasst. Auf diese Weise wird der Beton als plastische Masse in eine geometrisch differenzierte Form gezogen (Abb. 14).

Entscheidend ist, das zeitliche Materialverhalten von Beton so zu beherrschen, dass es in einem digitalen Entwurfs- und Fabrikationsprozess genutzt und umgesetzt werden kann. «Smart Dynamic Casting» operiert – im Gegensatz zu schichtenbasierten dreidimensionalen Betondruckverfahren – unmittelbar im architektonischen Massstab und wendet dabei ein genuin materielles Entwurfsverständnis an. Die entstehenden Objekte werden nicht «klassisch» entworfen, sondern entlang dem zeitlichen Materialverhalten «generiert».

MATERIAL, INFORMATION UND PLASTIZITÄT

Einen weiteren interessanten Einblick in die Praxis der Verknüpfung von materieller Plastizität und digitalen Fabrikationstechniken im Betonbau gewähren die Paneele, mit denen die Kuppeln des Bundesstrafgerichts in Bellinzona ausgekleidet sind (S. 32). An diesen Bauteilen wird deutlich, dass die digitale Fabrizierbarkeit von Beton dort ihr grösstes Potenzial



14

erhält, wo die Anzahl der Abhängigkeiten, Anforderungen und Freiheitsgrade besonders gross ist; diese Verknüpfungen sind nicht zufällig, sondern bedingen einander gegenseitig und können für architektonische Zwecke genutzt und entwickelt werden.

Dr. Jan Willmann, M. Arch. (DIST), Oberassistent, willmann@arch.ethz.ch

Fabio Gramazio, Prof., dipl. Architekt ETH SIA BSA, gramazio@arch.ethz.ch

Matthias Kohler, Prof., dipl. Architekt ETH SIA BSA, kohler@arch.ethz.ch

alle: Professur für Architektur und Digitale Fabrikation am Departement Architektur der ETH Zürich

Anmerkungen

- 1 Fabio Gramazio, Matthias Kohler: *Digital Materiality in Architecture*, Baden: Lars Müller Publishers, 2008, S. 7–11.
- 2 Tobias Bonwetsch, Fabio Gramazio, Matthias Kohler: «R-O-B. Towards a Bespoke Building Process», in Bob Sheil (Hrsg.): *Manufacturing the Bespoke Making and Prototyping Architecture*, London: Wiley, 2012, S. 78–87.
- 3 Jan Willmann, Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Silke Langenberg: «Digital by Material – Towards an Extended Material Performance in Architecture», in: *RobArch 2012 Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, Wien: Springer, 2012, S. 2–27.
- 4 Die Installation «Interference Cube» wurde 2003 von Gramazio & Kohler realisiert; Auftraggeber: BAK Bundesamt für Kultur; Industriepartner: Wey Elementbau (Elementbau), Jura Cement (Weisszement), CNC Dynamix (CNC-Fräsung).
- 5 Vgl. hierzu: Fabio Gramazio, Matthias Kohler: «A New Physis of Architecture», in: Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Raffaello D'Andrea: *Flight Assembled Architecture*, Orleans: Editions HYX, 2013, S. 102–103.
- 6 Das Projekt «Die perforierte Wand» ist ein Lehr- und Forschungsprojekt, das 2006 an der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation (Prof. Fabio Gramazio, Prof. Matthias Kohler) an der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit dem IFB, ETH Zürich, durchgeführt wurde; Mitarbeiter: Daniel Kobel (Projektleitung), Ralph Bärtschi, Michael Lyrenmann; Studenten: Sasha Cisar, Natalia Dorta, Ladina Esslinger, Philipp Eversmann, Sabrina Gehrig, Chris Keller, Florian Poppele, Stefan Rohrer, Willy Stähelin, Michael Walton, Melanie Weidmann, Lorenz Weingart, Xu Zhang; Ausgewählte Experten: Patrick Stähli (IFB), August Morf (Holzco-Doka AG), Marcel Schneider (Holcim AG); Industriepartner: Holcim AG, Holzco-Doka AG, Geberit AG.
- 7 Das Projekt «Prozedurale Landschaften» ist Teil einer 2011 an der ETH Zürich abgehaltenen Lehrveranstaltung (Projektleiter: Michael Knauss, Studenten: Tobias Abegg, Jonathan Banz, Mihir Bedekar, Daria Blaschkewitz, Simon Cheung, Dhara Dhara Sushil Surana, Felix Ernst, Herman Garcia, Caspar Helfrich, Pascal Hendrickx, Leyla Ilman, Malte Kloes, Jennifer Koschack, Caspar Lohner, Jitesh Mewada, Lukas Pauer, Sven Rickhoff, Martin Tessarz, Ho Kan Wong), die zusammen mit Prof. Christophe Girot, Institut für Landschaftsarchitektur (ILA), ETH Zürich, und Yael Girot, Atelier Girot, betreut wurde.
- 8 Matthias Kohler, Fabio Gramazio, Jan Willmann: «Die Operationalität von Daten und Material im Digitalen Zeitalter», in: *Die Zukunft des Bauens*, München: Detail – Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 2011, S. 8–17.
- 9 Vergleiche hierzu Frei Otto: *Gestaltwerdung. Zur Formentstehung in Natur, Technik und Baukunst*, Köln: Müller Verlag, 1988, S. 5 ff.
- 10 Das Projekt «TailorCrete» ist ein laufendes Forschungsprojekt im Rahmenprogramm 7 der Europäischen Gemeinschaft. Die Professur für Architektur und Digitale Fabrikation (Prof. Fabio Gramazio, Prof. Matthias Kohler), ETH Zürich, ist verantwortlich für die Entwicklung einer wiederverwendbaren Betonschalung auf Wachsbasis und für ein Softwarepaket, bestehend aus digitalen Entwurfs- und Fabrikationswerkzeugen; Mitarbeiter: Silvan Oesterle (Projektleitung), Ammar Mirjan, Daniel Rohlek, Axel Vansteenckiste, Tobias Bonwetsch, Andrea Kondziela, Samuel Bernier-Lavigne, Selen Ercan, Petrus Aejmelaeus-Lindström, Dominik Ganghofer; Ausgewählte Experten: Danish Technological Institute (Gesamtkoordinator), Chalmers University of Technology, University of Southern Denmark, Czech Technical University, El Caleyó Nuevas Tecnologías, Paschal Danmark A/S, Superpool, Giben Scandinavia A/S, DesignToProduction, Grace Bauprodukte GmbH, Dragados, Aalborg Portland A/S, NV Bekeert SA, Fischer Rista AG, Jäggi & Hafter AG, Holcim Schweiz AG, Walt & Galmarini.
- 11 Silvan Oesterle, Nick Williams, Hanno Stehling, Fabian Scheuren, Fabio Gramazio, Matthias Kohler: «A Case Study of a Collaborative Digital Workflow in the Design and Production of Formwork for «Non-Standard» Concrete Structures», in: *The International Journal of Architectural Computing, IJAC*, Volume 9, Issue 3, 2011.
- 12 «Smart Dynamic Casting» ist ein laufendes Forschungsprojekt der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation (Prof. Fabio Gramazio, Prof. Matthias Kohler), ETH Zürich, und dem Institut für Baustoffe (Prof. Robert J. Flatt, Prof. Hans Herrmann); Mitarbeiter: Ena Lloret Kristensen (Projektleitung, Ph.D.), Andreas Thoma, Ralph Bärtschi, Thomas Cadalbert, Beat Lüdi.