

Corneel Cannnaerts

Hacking Agency: Digitale Fabrikation als Entwurfsmedium

Die digitale Fabrikation verändert die Beziehung zwischen dem Entwerfen und der Herstellung in der Architekturpraxis. Der Diskurs um die Auswirkungen der digitalen Herstellungsverfahren auf Praktiken in der Architektur hebt einige positive Aspekte dieser Technologien hervor: Eine höhere Auflösung und genauere Detaillierung, die Möglichkeit, Formen zu verwirklichen, die mit traditionellen Fertigungen schwerlich realisierbar wären, oder auch den nahtlosen Übergang von Entwurfsabsichten zu materiellen Artefakten. Anstatt die Technologien einfach als solche zu verwenden oder zu betrachten, schlägt dieser Beitrag das ‚Hacking‘ als alternativen Ansatz vor. Auf der einen Seite entwickeln sich damit neue Verläufe von Entwurfsuntersuchungen, indem digitale Herstellungsverfahren über ihre vorgesehene Nutzung hinausgetrieben werden, auf der anderen Seite offenbart dies die inhärenten Anforderungen und Tendenzen gegenüber diesen Technologien. Beim Hacking geht es um mehr als um ein bloßes Aufzwingen von Ideen auf ein fabriziertes Artefakt. Es geht einher mit dem Erkennen einer Agency der Technologien selbst und eröffnet einen neuen Umgang mit ihnen. Basierend auf dem Projekt *Encoded Matter* wird in diesem Beitrag argumentiert, dass digitale Herstellungsverfahren keine neutralen und transparenten Werkzeuge sind, sondern Entwurfsmedien; somit wird das Entwurfsergebnis durch die Materialien, die besonderen Eigenschaften der Produktionsmaschinen und den alles steuernden Code beeinflusst. Mit anderen Worten: Material, Maschine und Code haben allesamt Einfluss auf den Entwurfsprozess, bedingt durch *computation* und digitale Fabrikation.

Entwerfen, Herstellen und Hacken Die Aktivitäten des Entwerfens und Herstellens von Architektur geschehen tendenziell in einem räumlichen und zeitlichen Abstand. Diese Trennung weist eine lange Geschichte auf, die auf die Entstehung der Architektur als Beruf und dessen Emanzipation von der Konstruktionspraxis hin zu einer intellektuellen freien Kunst zurückgeht.¹ Architekten und Architektinnen produzieren keine Architektur, stattdessen betreiben sie die Herstellung von Architektur durch intervenierende Medien², indem sie zum Beispiel Skizzen, Zeichnungen, Modelle oder Beschreibungen anfertigen. Im Laufe der Jahrhunderte wurden der architektonische Beruf und die Praxis durch Medien bestimmt, die von Architekten genutzt werden, wobei die Entwicklungen von Technologie, Wissenschaft und Kultur mit einfließen. Während manche Entwurfsmedien entscheidend die Architekturproduktion beeinflussen, sind andere Medien spekulative Mittel, die es dem Architekten oder der Architektin erlauben, eher abstrakte Raumkonzepte zu untersuchen und architektonische Projekte zu entwickeln, die jenseits des Reichs des Bauens liegen.

Dennoch bleibt der Bereich zwischen Entwerfen und Herstellen, die körperliche Beschäftigung mit Materialität und das Bilden von Architektur ein bedeutender Aspekt der Architekturpraxis. Architekten und Architektinnen beschäftigen sich mit Materialität und dem Herstellen anhand von Materialtests, maßstäblichen Modellen und Prototypen; auch Grundstücksbesichtigungen bleiben unverzichtbar. Entwurfsmedien können als Brückenschlag zwischen Entwerfen und Herstellen, zwischen dem Abstrakten und dem Körperlichen³ verstanden werden – und dies in beide Richtungen: Sie sind nicht nur Hilfsmittel, um Entwurfsideen zu verwirklichen oder zu konstruieren, sie werfen auch Fragen über die Herstellung und Materialität für das Verständnis der Architekten und Architektinnen auf.

Die Auswirkungen digitaler Technologien auf die Architekturpraxis kann in dieser Tradition von Entwurfsmedien und der Übernahme von Technologien verstanden werden. Die ersten Jahrzehnte der Anwendung digitaler Technologien haben vor allem die Medien zum Entwerfen beeinflusst. Frühe computergestützte Entwurfswerkzeuge wurden als digitale Versionen von altbekannten, analogen Praktiken des Skizzierens, Modellierens oder Darstellens betrachtet. Architekten und Architektinnen nutzten diese digitalen Werkzeuge oder übernahmen sie von anderen Disziplinen,

um solche Architekturen zu entwerfen, die mit analogen Mitteln undenkbar gewesen wären.⁴ Doch sie blieben im Bereich der Bilder oder wurden durch konventionelle Zeichnungen in gebaute Artefakte übersetzt. Jüngere Entwicklungen in der digitalen Fabrikation beeinflussen direkt, wie Artefakte materialisiert oder wie Informationen im Verhältnis von Entwurf und Herstellung übersetzt werden. Der Diskurs über digitale Fabrikation in der Architektur betont einige positive Auswirkungen hinsichtlich der Verwirklichung von Formen, die mit traditionellen Herstellungsverfahren und Methoden nicht realisierbar gewesen wären, dem zunehmend genaueren Auflösungs- und Detaillierungsgrad sowie der Ermöglichung von Massen Anpassungen jenseits der Standardisierung. Digitale Fabrikation ist eine Triebkraft für Konvergenz, egal ob es die Schließung der Lücke zwischen ganz verschiedenen Disziplinen⁵ bedeutet oder die Auflösung der Lücke zwischen Entwurf und Herstellung;⁶ so ergibt sich ein problemloser und ununterbrochener Übergang von Entwurfsideen zu verwirklichten Artefakten.

Dieser Beitrag betrachtet digitale Fabrikation weder als eine neutrale Technologie noch als Potenzial, die Lücke zwischen Entwurf und Herstellung zu schließen. Vielmehr regt er dazu an, digitale Fabrikation als ein Medium zu betrachten, das zur Entstehung von Entwurfsideen beiträgt. Die Untersuchung prüft, wie sich Eigenschaften von Materialien und Maschinen in Entwurfsmodellen im Rahmen digitaler Fabrikation und anderer Mittel zur Kodierung entwickeln oder wie sie sich selbst in materiellen Artefakten zeigen. Digitale Fabrikation wird als eine Reihe von Technologien betrachtet, die mit ganz bestimmten Verknüpfungen von Entwurf und Herstellung sowie von abstrakten Codes und der Materialität hergestellter Artefakte umgehen. Anstatt Technologien so zu nutzen, wie sie eigentlich gedacht sind, regt dieser Beitrag dazu an, Hacking als alternativen Ansatz zu betrachten, mit dem Grundzüge der Technologien digitaler Fabrikation enthüllt werden können. Das Hacking geht über ein bloßes Aufzwingen von Ideen auf ein fabriziertes Artefakt hinaus, indem die Agency dieser Technologien erkannt und überwunden wird.

Forschungsprojekt und Kontext Die Argumentation dieses Beitrags basiert auf dem Forschungsprojekt *Encoded Matter*, das an dem MMLab, Architekturfakultät der KU Leuven⁷ durchgeführt wurde. Das MMLab ist ein Forschungs- und Fabrikationslabor, das

die Rolle von Entwurfsmedien in der Architektur durch projektbasierte, interaktive Experimente hinterfragt. Das Projekt ist Teil meiner PhD-Forschung mit dem Titel *Negotiating Agency. Computation & Digital Fabrication as Design Media*.⁸ Diese untersucht die Agency von Material, Code und Maschine in architektonischen Entwurfsprozessen mit Hilfe von digitalen Technologien basierend auf Fallstudien aus der Entwurfspraxis und -lehre.

Das Projekt *Encoded Matter* besteht aus einer Serie von Entwurfsexperimenten, die das Potenzial sowie die Grenzen von kostengünstigen und selbstgebaute Open-Source-Produkten als spezifische Fabrikationstechnologien ergründen. Mit dem Projekt soll aufgedeckt werden, wie die Materialien, die Fabrikationsmaschinen und der Code, der diese steuert, die Materialität der fabrizierten Artefakte beeinflussen. Für das Projekt war von Bedeutung, dass die Technologie zugänglich, offen und „hackbar“ war, sowohl bezüglich der Hardware als auch der Software.

Dies offenbart bei näherer Betrachtung, wie die Fabrikationsprozesse Spuren hinterließen oder sich mit der Zeit entwickelten und wie dieser Vorgang gehackt werden könnte, um bestimmte Materialeigenschaften in den fabrizierten Artefakten zu bewirken.

Spuren und Fäden Materialien durchlaufen mehrere Transformationen bevor sie in der Architektur verwendet werden: Prozesse des Wachstums, der Sedimentation, der Synthese. Rohmaterial wird entnommen und zu Materialien, Bauteilen und Produkten für das Bauen weiterverarbeitet. Materialinformationen setzen sich während des Konstruierens fort, genau wie später durch die Nutzung, Alterung, Verwitterung oder durch Reparaturen. All diese Prozesse hinterlassen Spuren an den Materialien und den daraus konstruierten Artefakten. Das bewusste Entwerfen mit solchen Spuren weist eine lange Geschichte in der Architektur auf.⁹

Die Spuren, die wir in entworfenen Artefakten vorfinden, sind nicht nur Resultat der oben beschriebenen Prozesse, sondern auch Spuren von Materialanpassungen durch industrielle Prozesse in Form von Blechen, Trägern oder sonstigen Bauteilen. Tim Ingold argumentiert, dass die Vorstellung von Architekturen, die aus geometrischen Komponenten wie riesige Puzzles zusammgebaut sind, relativ neu ist. Er verortet die Wurzeln der Architektur in Praktiken des Webens, Korbflechtens, der Schreinerei und weiterer Handwerke. In diesen Praktiken wird Form nicht als Baukasten-

prinzip vorgegeben, sondern resultiert aus dem allmählichen Prozess des Webens von Fäden oder dem allmählichen Formen von Materialien aufbauend auf einem Verständnis für ihren bestimmten Aufbau, wie in der Stein- oder Holzbearbeitung.¹⁰

Die Verwendung von Materialien in der digitalen Fabrikation kann mithilfe der oben aufgeführten Ideen verstanden werden: In der digitalen Fabrikation verwendete Materialien neigen dazu, in hohem Maße standardisiert und industriell¹¹ zu sein – unter anderem Bleche sowie massive Materialien zum Schneiden oder Fräsen, Filament oder Pulver für zusätzliche Fertigungen – doch gefertigte Artefakte neigen dazu, äußerst spezifisch, nicht standardisiert und einmalig zu sein. Das hat somit zu noch komplexeren Teilen des Baukastens geführt, indem jeder Bestandteil einer Struktur einmalig ist und geometrisch beschrieben sowie exakt gefertigt werden kann. Prozesse digitaler Fabrikation hinterlassen ihre eigenen Spuren – Spuren durch Sägeblätter, verbrannte Kanten beim Laserschneiden oder den geschichteten Aufbau additiver Fertigung. Anstatt digitale Fabrikation für Präzision oder exakte Kopien digitaler Modelle zu verwenden, schlägt *Encoded Matter* anhand von Untersuchungen der Spuren einen alternativen Umgang mit solchen Fabrikationstechnologien vor. Für einen solchen Ansatz ist die Offenheit der Technologie entscheidend, um digitale Fabrikation als einen Prozess verstehen zu können, der sich mit der Zeit entfaltet.

Offene Technologie Das Projekt *Encoded Matter* hat von der zunehmenden Zugänglichkeit und Demokratisierung digitaler Fabrikation in der Architektur profitiert. Für die in diesem Beitrag erläuterte Forschung waren zwei Projekte besonders einflussreich: Das FabLab-Projekt, das von Neil Gershenfeld¹² am MIT initiiert wurde, zielte darauf ab, Herstellungstechnologien für Studierende, Designer und ein breites Publikum zugänglich zu machen. Dies führte zu einer größeren Beteiligung und resultierte in einem globalen Netzwerk aus FabLabs. Zum anderen war das RepRap-Projekt von großer Bedeutung, das von Adrian Boyer im Jahre 2005 an der University of Bath initiiert wurde. Der Projektname steht für „Replicating Rapid Prototypes“, ein Open-Source-3D-Drucker, der in der Lage ist, die meisten seiner eigenen Teile zu produzieren. Seitdem entstanden viele weitere preisgünstige 3D-Drucker mit Open-Source Verfahren zum selber bauen.¹³

Das MMLab wurde im Geiste des FabLab-Projekts gegründet und strebt an, den Studierenden und der Fakultät der Sint-Lucas School of Architecture digitale Fabrikationstechnologien näherzubringen. In diesem Zusammenhang habe ich 2009 eine RepRap-Maschine gebaut, die mir ein gutes Verständnis für einige der Schwierigkeiten sowie Potenziale der Technologie ermöglicht hat (Abb. 1). Das Projekt *Encoded Matter* hat von der Zugänglichkeit, Offenheit und den geringen Kosten für die Technologie profitiert. Beim Drucken habe ich mit einer Maschine auf meinem Schreibtisch gearbeitet, mit welcher der Prozess in Echtzeit erlebt werden konnte, ohne Angst zu haben, im möglichen Durcheinander Dinge zu zerbrechen. Dies war ein befreiendes Gefühl im Gegensatz zu dem Umgang mit geschlossenen Technologien, wie zum Beispiel mit teuren Maschinen, die in anderen Entwurfsuntersuchungen aus der Ferne über Online-Schnittstellen¹⁴ verwendet werden.

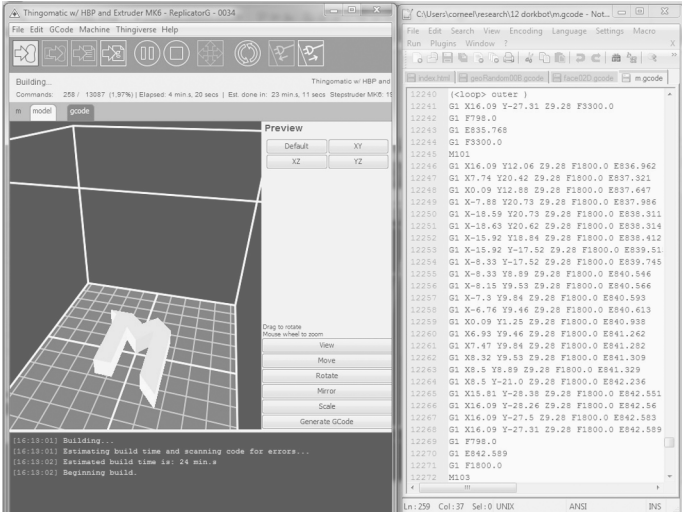
Der Drucker verwendete ein Verfahren, das „Fused Filament Fabrication“¹⁵ genannt wird: Ein thermoplastisches Filament wurde einem Extruderwerkzeugkopf zugeführt, in dem der Kunststoff geschmolzen wurde. Der Werkzeugkopf bewegte sich in x- und y-Richtung, gab Material ab und bildete eine Schicht; dann wurde die Plattform in der z-Richtung abgesenkt, woraufhin die nächste Schicht abgegeben wurde. Die Drucke wurden Faden für Faden und Schicht für Schicht aufgebaut, was in der typischen liniensbasierten und geschichteten Materialität resultierte. Die Technologie wies einige Einschränkungen und Schwierigkeiten auf. Jede Schicht musste zum Teil von der vorigen Schicht unterstützt werden, auch wenn Überhänge von bis zu 45 Grad möglich waren. Es gab einen Temperaturunterschied zwischen den bereits aufgetragenen Schichten und denen, die gerade erst gedruckt wurden. Weil das Material beim Abkühlen schrumpfte, kam es zu Verzerrungen des Drucks. Wenn sich der Werkzeugkopf über eine Lücke in dem Druck bewegte, dann wurde die Extrusion gestoppt, doch etwas Material tropfte aus der Düse nach, sodass sich an der Seite des Drucks Fäden bildeten. Der Übergang von einer digitalen Datei zu einem materiellen Druck basierte auf folgenden Schritten: Es wurde ein Entwurf modelliert, der durch eine digitale 3D-Datei generiert wurde; dieses Modell wurde mit Hilfe einer externen Software verarbeitet und die daraus resultierende Datei wurde an die Maschine gesendet und gedruckt.



1 RepRap Extruder Werkzeugkopf

Fabrikation in Raum und Zeit Das Entwerfen durch das Schreiben eines generativen Codes ist ein grundsätzlich reversibler und dynamischer Prozess, wobei Entwurfslösungen aus einem Zusammenspiel von Designer, Code und entstandenem Produkt resultieren. Damit das Ergebnis materialisiert werden kann, muss dieser dynamische Prozess angehalten und statische Dateien müssen exportiert, umgewandelt und zur Fertigung an die Maschine gesendet werden. Artefakte, die durch das Schreiben generativer Codes entworfen werden und mit der Verwendung digitaler Fabrikationsmaschinen produziert werden, sind ebenso das Ergebnis der diskreten und reversiblen Zeit des Codes wie auch des unumkehrbaren und unterbrochenen Einfrierens der Zeit von statischen Dateien und der kontinuierlichen, aber unumkehrbaren Zeit des Materialisierens und Herstellens.

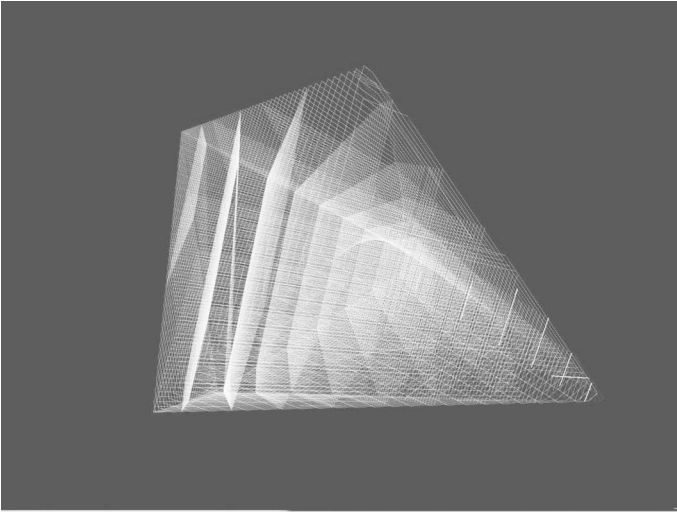
Encoded Matter begann mit einem Interesse für dieses Einfrieren der Zeit und die Transformationen zwischen den dynamischen, reversiblen Prozessen der Verwendung generativer Codes, den Prozessen der Materialisierung und dem resultierenden, statischen sowie materiellen Artefakt. Beim genauen Ablesen des Prozesses zeigt sich eine Entwurfsumgebung mit verschiedenen Ebenen kontinuierlichen Feedbacks, in der sich der Entwurf durch bestimmte diskrete, irreversible Schritte entwickelte. Entwürfe



2 ReplicatorG slicer Software

werden durch Codes generiert und anhand von Bildern am Bildschirm ausgewertet. Der resultierende Entwurf könnte entweder durch die Manipulation von Parametern indirekt beeinflusst werden oder direkt durch Anhalten der Software, die Veränderung des Algorithmus und das Neustarten der Software. Sobald dadurch ein interessanter Moment oder eine Variation erreicht wurde, musste eine statische Datei exportiert werden. Dieses ‚Mesh file‘ wurde dann von einer externen Software aufgenommen und von dieser geschnitten, woraufhin eine ‚g-Code‘-Datei vorbereitet wurde, die dann an den Drucker gesendet wurde (Abb. 2). Während die Bilder auf dem Bildschirm nur ein bestimmtes, eingeschränktes Feedback boten, war es meist nur durch die konkrete Herstellung möglich, die Ergebnisse zu bewerten.

In dem Prozess der Erstellung eines 3D-Drucks waren die ‚Mesh-‘ und ‚g-Code‘-Dateien statische und irreversible Stadien, aber sie erlaubten eine alternative Kontrolle über den Herstellungsprozess und wie er sich mit der Zeit entfaltete. Während das ‚Mesh‘ die äußere Form des Artefakts lediglich als annähernd dreieckig erfasste, codierte die ‚g-Code‘-Datei mit der Zeit den Prozess seiner Herstellung. Eine ‚g-Code‘-Datei enthielt verschiedene Arten von Befehlen: m-Codes, die maschinenspezifisch sind und zum Beispiel die Temperatur des Heizbetts und des Extruders fest-

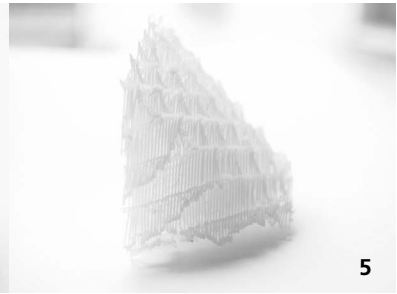
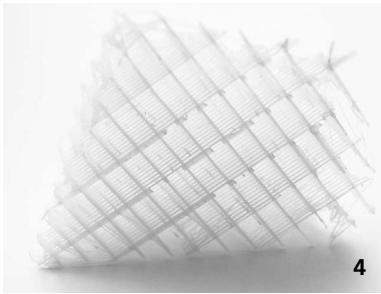


3 Benutzerdefiniertes Entwurfswerkzeug

legten; g-Codes, welche die Position des Extruders kontrollierten; F-Codes, welche die Geschwindigkeit kontrollierten und E-Codes, welche die Menge an Material kontrollierten, das ausgestoßen wird. Zusammen bieten sie Kontrolle über die Menge an hinterlegtem Material in Raum und Zeit.¹⁶

Entwurfsuntersuchung Der Ausgangspunkt des Projekts *Encoded Matter* war es, über die volumetrische Beschreibung des Artefakts als ‚Mesh‘ hinauszugehen und den g-Code direkt aus einem benutzerdefinierten Entwurfswerkzeug zu generieren, das während der Verarbeitung unter Anwendung der externen Code-Thread-Bibliothek¹⁷ geschrieben wurde. Während der Entwurfsuntersuchung wurden verschiedene Serien von Artefakten entworfen und hergestellt und so wurde je ein bestimmtes Entwurfswerkzeug für jede der Serien entwickelt. Nach einer Serie von Tests, mit denen das Konzept überprüft wurde und spielerisch verschiedene Parameter verstanden und angepasst wurden, wurde eine Serie von Materialexperimenten in der unten beschriebenen Reihenfolge ausgeführt (Abb. 3).

Serie 1: Objekte ohne Haut In der ersten Serie (Abb. 4–5) wollte ich mit den Objekten die Idee des Überspringens des ‚Mesh‘ als

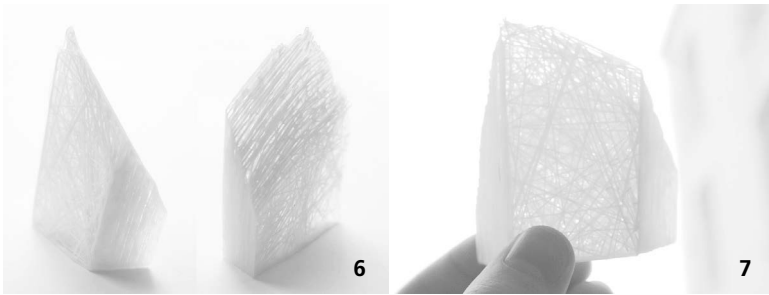


4-5 Objekte ohne Haut

Zwischenschritt ausdrücken sowie den inneren Materialaufbau des Artefakts zeigen und habe mich dafür entschieden, mehrere Objekte ohne eine Haut zu drucken. Die innere Struktur war als dreieckiges Raster entworfen, das in zwei Richtungen gedreht werden kann. Auch wenn es nicht explizit im g-Code selbst bestimmt wurde, wurde das äußere Volumen der Objekte von verschiedenen angewinkelten Ebenen zerschnitten. Somit haben sie sich mit den rotierten Rastern in unterschiedlichen Winkeln überschritten, wodurch jeder Fläche des Artefakts eine andere Textur und somit ein anderer Materialausdruck verliehen wurde. Die Struktur des Rasters der ersten Serie wurde von einem Algorithmus kontrolliert; dessen Struktur war identisch mit üblichen ‚Fill-Strukturen‘, die in ‚slicing software‘ zu finden sind. Es wurden verschiedene Drehungen und Abstände in dem Raster getestet, sodass das Raster in allen resultierenden Artefakten dieselbe Dichte aufwies, obwohl es keine Außenhaut besaß.

Serie 2: Steuerung von Dichte und Transparenz In der ersten Serie gab es keine Kollisionen von Fäden, da sie parallel zueinander verliefen und mit jeder Schicht die Richtung wechselten. In der zweiten Serie (Abb. 6–7) gab es auf jeder Schicht Linien, die sich in verschiedenen Bereichen willkürlich überkreuzten; dies führte zu einer radikal anderen Materialität, bei der die Dichte je Schicht variierte. Weil sich die Linien gelegentlich willkürlich überkreuzten, kam es zu Anhäufungen beziehungsweise zu lokalem Materialüberschuss.

Während dies zu einigen komplizierten Stücken führte, erlaubte die Zufälligkeit des Systems nicht genug Kontrolle über

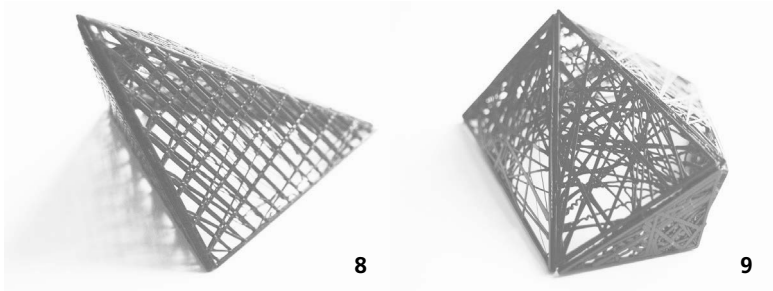


6–7 Steuerung von Dichte und Transparenz

die Materialität des Ergebnisses. Die Serie wurde weiterentwickelt, indem der Grad der Zufälligkeit abgewogen wurde, wobei ein Farbverlauf auf der Oberfläche des ‚Mesh‘ abgebildet wurde – je dunkler die Farbe, desto größer die Wahrscheinlichkeit, dass dort ein Strang beginnt. Der Algorithmus hat auch den Materialaufbau der unteren Schichten mit einbezogen. Zwar wurde die Transparenz nicht vollständig bestimmt, doch es konnten die Dichte des Materials sowie die Transparenz in Richtung einer bestimmten Dichte gelenkt werden.

Die Materialdichte und Transparenz auf dem Bildschirm abzubilden erwies sich als problematisch. Die hohe Dichte der Fäden würde sich auf dem Bildschirm zu einem einzigen farbigen Fleck verdichten. Die Dicke der Linie könnte manipuliert werden, um die Geschwindigkeit der Extrusion und somit die Menge an Material darzustellen, die aufgebaut wird. Das tatsächliche Fabrizieren war die einzige Möglichkeit, die Materialqualitäten des Ergebnisses zu testen.

Serie 3: Verschieben der Grenzen von Material und Maschine So wie alle digitalen Fabrikationsmaschinen hatte auch der Drucker¹⁸ Einschränkungen – die Größe des Drucks war limitiert, Formen mit Überständen konnten nicht gedruckt werden, er wies eine relativ geringe Geschwindigkeit auf und nur einige wenige Materialien in Form von Filament konnten verwendet werden. Die resultierenden Drucke wiesen klar Materialspuren des Druckprozesses auf – der flache Boden entsprechend des erhitzten Betts, die sichtbaren Schichten und die Spuren des Gewindeschneidens, wodurch im Modell instabile Überhänge auftraten. In der dritten Serie von



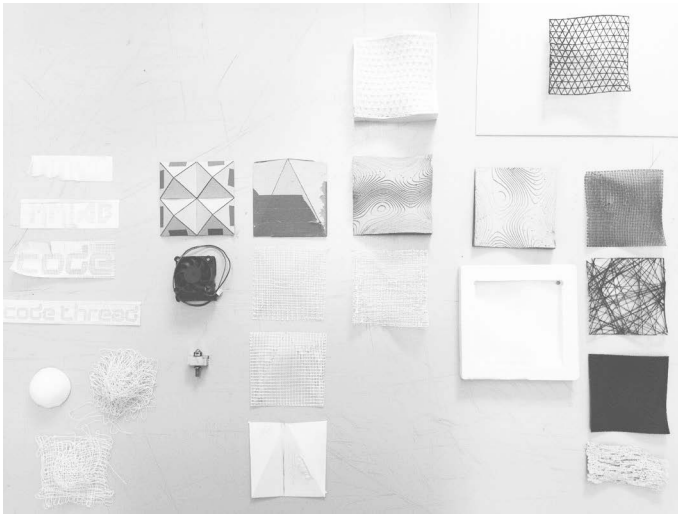
8–9 Schraffieren mit Materie

Objekten (Abb. 8–9) habe ich versucht, einige dieser Einschränkungen zu umgehen und bestimmte Merkmale der Maschine als Vorteil zu nutzen.

Anstatt ein fertiges Objekt zu drucken, habe ich mich dazu entschieden, Paneele zu drucken, die daraufhin zu größeren Objekten zusammengeführt werden können: Das digitale Modell wird dazu so groß skaliert, dass das größte Paneel gerade noch auf die Grundplatte passt. Die Paneele wurden eher flach gehalten, sodass die Druckzeit erheblich reduziert wurde. Aufgrund des erhitzten Betts bekamen die Paneele eine flache Unterseite und eine zweite, stärker ausgeprägte Seite. Beim Zusammenfügen können beide Seiten als Außenseite des Objekts verwendet werden, wodurch grundsätzlich verschiedene Artefakte in Bezug auf Material und Größe entstehen, jenseits dessen, was normalerweise mit diesen Maschinen hergestellt werden kann.

Die Algorithmen, die zum Füllen der Paneele verwendet werden, waren dieselben, die bereits für die Objekte ohne Haut sowie für die Objekte mit variierender Dichte getestet wurden. Der erste führte zu einer Schraffierung verschiedener Paneele und der zweite zu einer kontrollierten Dichte der Artefakte.

Serie 4: Eine zusätzliche halbe Dimension Ein dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem ist die Basis für den im Entwurfsexperiment verwendeten Drucker. Eine zusätzliche Einschränkung besteht darin, dass eine Kollision mit dem abgegebenen Material verhindert werden muss. Die Bewegung des Druckerkopfes kann als 2,5D betrieben werden: Die Maschine legt je eine Schicht Material ab, indem sie sich in x- und y-Richtung



10 Experimentieren mit z-Richtung

bewegt, und in z-Richtung nur, nachdem eine Schicht fertiggestellt ist. Das Resultat dieses Prozesses ist in der geschichteten Struktur des gedruckten Artefakts sichtbar.

Eine letzte Serie von Artefakten (Abb. 10) versuchte diese Einschränkung zu umgehen, indem der Werkzeugkopf während des Druckprozesses in z-Richtung bewegt wurde und nicht zwischen den einzelnen Schichten. Das Druckerbett, die eigentliche Oberfläche, auf der die erste Schicht gedruckt wird, muss im normalen Druckprozess flach, waagrecht ausgerichtet und neutral sein, sodass der Druck leicht entfernt werden kann und keine Spuren hinterlässt. Aufgrund der zusätzlichen Bewegung in z-Richtung konnte ich auf dynamischeren Oberflächen drucken. Diese Freiheit brachte eine zusätzliche Komplexität ein: Wir mussten die digitale Datei an der zu bedruckenden Materialoberfläche ausrichten, um eine Kollision des Werkzeugkopfes mit dem bereits abgelegten Material zu vermeiden.

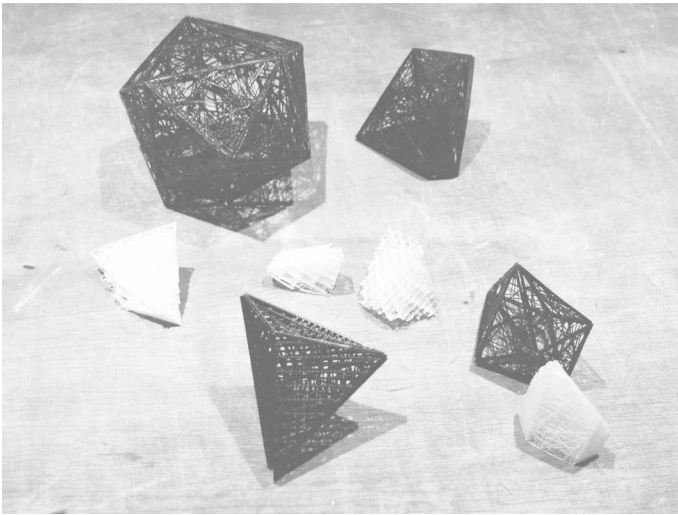
Während des Experiments wurde auf verschiedenen Oberflächen gedruckt, die durch das Schneiden von Karton und das Fräsen von Hartschaum hergestellt wurden. Die Herstellung der Formen resultierte in bestimmten Linien und Spuren: horizontale, topographische Linien im Falle des gestapelten Kartons und Spuren des Fräskopfes im Falle des gefrästen Hartschaums. Der erhitzte

Kunststoff des Druckers passte sich diesen definierten Oberflächen an, was wirkungsvoll zu einer Materialität führte, die sowohl die Spuren der Gussform als auch die oben drauf gegossenen Kunststoffäden in sich trägt.

Das Drucken auf unebenen Oberflächen erforderte eine Anpassung der Oberfläche an die Bewegungen des Druckkopfes. Wenn ein paar Zentimeter über der Oberfläche gedruckt wurde, neigte das Material dazu, spiralförmige Fäden zu bilden. Durch versehentlich falsches Ausrichten der Oberfläche mit dem Druckkopf habe ich herausgefunden, dass sich die Spiralen allmählich anhäufen und sich bei langer Dauer des Extrudierens eine Grundlage formt, unabhängig von der Oberfläche, die sich darunter befindet.

Materialverständnis durch Code Neben den materiellen Artefakten (Abb. 11) brachte jedes der Experimente auch eine passend zugeschnittene Software hervor, die beim ‚*Processing*‘ und in externen Bibliotheken geschrieben und später in Grasshopper und Rhino übersetzt wurden. Die Software ermöglichte algorithmische Untersuchungen von Form- und Fabrikationsparametern, bot ein visuelles Feedback, um die Ergebnisse zu bewerten, und verfügte über Funktionen zum Importieren und Exportieren von Dateien. Diese Entwurfswerkzeuge wurden entwickelt, während die Entwürfe vorangetrieben und die Artefakte hergestellt wurden. Durch das Entwerfen dieser Serien und die zugehörigen Algorithmen hat sich ein Verständnis für Anforderungen und Widerstände auf unterschiedlichen Ebenen entwickelt: ein computerbasiertes Verständnis für die Codes und Dateien sowie ein Verständnis für Möglichkeiten des Materials oder für Beschränkungen in der Herstellung.

Die verschiedenen Arten mit Code, Maschine und Material umzugehen sowie das verschiedene Feedback zwischen diesen und dem Designer zeigten einen gestuften und nicht-linearen Entwurfsprozess auf. Auch wenn sich das Verständnis sukzessive entwickelt hat, war es kein kontinuierlicher Prozess: Manipulationen am zugrundeliegenden Algorithmus erforderten ein Anhalten, Ändern und Neustarten des Codes, Untersuchungen der Veränderungen durch Tests an verschiedenen Parametern sowie die Steuerung des digitalen Modells – bewertet mithilfe von Bildern am Bildschirm. Sobald dies zu einem vielversprechenden Stand führte, wurde der Prozess gestoppt, ein Bild gesichert, eine Datei exportiert und der



11 Sammlung fabrizierter Artefakte

Code in der Datei in einem Texteditor geprüft, bevor er endgültig an den Drucker gesendet wurde. Der Druckprozess wurde beobachtet, wenn möglich wurde eingegriffen und ein Impuls gegeben und nach Auswertung der Ergebnisse konnte der Prozess wieder von Neuem gestartet werden.

Fazit: Hacking Agency Die Forschung, die in diesem Beitrag behandelt wurde, geht von einem Interesse an digitaler Fabrikation als spezifische Herstellungsweise aus, die zwischen dem Digitalen und dem Materiellen, zwischen dem Entwurf und der Herstellung sowie zwischen dem Abstrakten und dem Körperlichen agiert. Das im Vorigen erläuterte Projekt *Encoded Matter* untersucht genau die unterschiedlichen Schritte in der Entwicklung von einem digitalen Modell zu einem materiellen Artefakt unter Verwendung einer bestimmten digitalen Fabrikationstechnologie. Während der Umfang von *Encoded Matter* und die Größenordnung der produzierten Artefakte limitiert sein mögen, veranschaulicht die Forschung, dass ‚*computation*‘ und digitale Fabrikation keine neutralen oder transparenten Technologien sind; sie beeinflussen im Gegenteil, was entworfen und hergestellt werden kann. Die ‚*agencies*‘, die in Material und Code gefunden wurden, spielen in dem Prozess der Herstellung im Rahmen digitaler Fabrikation eine

Rolle und werden darüber hinaus von solchen *agencies* ergänzt, die in Fabrikationsmaschinen gefunden wird. Das Hacking ermöglicht diesen ‚*agencies*‘ vermittelt zu werden.

Das Material, das in den Prozessen digitaler Fabrikation in dieser Forschung verwendet wurde, ist äußerst standardisiert und industriell hergestellt; diese Kontrolle des Materials wird zusätzlich durch den Prozess digitaler Fabrikation verstärkt. Die Forschung zeigt, dass eine dem Material zugeschriebene Agency im Spiel ist. Ein materielles Artefakt herzustellen bleibt bis zu einem gewissen Grad unvorhersehbar, auch wenn dies mithilfe stark kontrollierter, mechanischer Prozesse digitaler Fabrikation geschieht. Während der Entwurfsuntersuchung bin ich auf viele Fälle solchen Materialverhaltens gestoßen, die in den Dateien oder im Fabrikationsprozess nicht vorhersehbar waren, um Beispiel die Verzerrungen, das Triefen des Filaments oder die Gebilde geschmolzenen Kunststoffes.

Ein Verständnis des Codes hilft, die Technologien zu verknüpfen, mit ihnen herumzubasteln und sie zu hacken. Digitale Technologien sind hochentwickelte, kulturelle Artefakte, die sich tendenziell schrittweise entwickeln und sukzessive auf vorigen Codes aufbauen.¹⁹ Die Geschwindigkeit, mit der sich digitale Technologien entwickeln, scheint immer schneller zu werden. Wir müssen uns lediglich anschauen, wie sich das *RepRap-Projekt* seit dessen Anfängen im Jahr 2005 sowohl qualitativ als auch quantitativ weiterentwickelt hat, genauso wie meine erste Version, die ich 2009 gebaut habe, und wo wir heute stehen: Die Anzahl an Druckern, Vertrieben und Firmen, die auf RepRap aufbauen, ist schwierig nachzuverfolgen. Bei der Suche nach Agency in diesen Technologien finden wir einen Teil von ihnen in diesen schrittweisen, kollektiv entwickelten Codes, welche die Technologien antreiben.

Die in diesen Entwurfsuntersuchungen verwendeten Fabrikationsmaschinen und die Fabrikationsprozesse, die sie ermöglichen, hinterlassen ihre eigenen Spuren in den hergestellten Artefakten: die sichtbare geschichtete Struktur sowie die Einschränkungen der Größe in beiden Drucktechnologien, der flache Boden entsprechend des erhitzten Betts, die Unmöglichkeit, Überhänge zu drucken sowie die sichtbaren Materialfäden in den Serien des *Encoded Matter*-Projekts. Die Maschinen, als vom Code gesteuerte materielle Apparate, übernehmen Aspekte und Qualitäten sowohl

vom Material, mit dem sie arbeiten, wie auch vom Code, der sie steuert. Darüber hinaus werden durch die Verwendung eines digitalen Codes als Input und entwickelter materieller Objekte als Output Spuren des Codes in der materiellen Welt sichtbar. Anstatt die Faser, die Auflösung und die sichtbaren Spuren der Technologie als Problem zu betrachten oder als etwas, das durch eine bessere, neuere Version der Technologie gelöst werden muss, können wir für und mit diesen Eigenschaften entwerfen.

Anmerkungen

- 1 Vgl. Alberto Perez-Gomez und Louise Pelletier, *Architectural Representation and the Perspective Hinge*, Cambridge, Mass. 2000 sowie Robin Evans, *The projective cast. Architecture and its Three Geometries*, Cambridge, Mass. 1995.
- 2 Kester Rattenbury, *This Is Not Architecture. Media Constructions*, London, New York 2002.
- 3 Robin Evans, „Translations from Drawing to Building“, in: Ders., *Translations from Drawing to Building and Other Essays*, London 1997.
- 4 Vgl. Greg Lynn, *Animate form*, New York 1999 und Centre Georges Pompidou (Hg.) *Architectures non standard*, Ausst.-Kat. Centre Georges Pompidou, Paris 2004.
- 5 Stephen Kieran und James Timberlake, *Refabricating Architecture. How Manufacturing Methodologies Are Poised to Transform Building Construction*, New York 2004, S. 57.
- 6 Mario Carpo, *The Alphabet and the Algorithm*, Cambridge, Mass. 2011, S. 78.
- 7 Die erste Iteration dieses Projekts wurde entwickelt in *Generator.x 3.0. From Code to Atoms*, Meisterklasse mit Marius Watz, am iMal Brüssel, 2012. Siehe: www.imal.org/nl/activity/generatorx3 [12. Mai 2015].
- 8 Corneel Canaerts, *Negotiating Agency. Computation & Digital Fabrication as Design Media*, Doctoral Thesis, RMIT Melbourne 2015, <https://researchbank.rmit.edu.au/eserv/rmit:161310> [13.05.2019].
- 9 Während viele Beispiele für Architekten und Designer mit besonderem Fokus für diese Spuren genannt werden können, verweise ich hier auf das Buch von Jonathan Hill, *Actions of Architecture. Architects and Creative Users*, New York 2003 sowie Ders., *Immaterial Architecture*, New York 2006; siehe auch: Tim Ingold, *Making*.

Anthropology, Archaeology, Art and Architecture, London, New York 2013.

- 10 Tim Ingold, *Making* (Anm. 9). S. 47f.
- 11 Es gibt Forschungen über das Scannen von natürlichen Materialien für den späteren Gebrauch mit digitaler Fabrikation, wie z. B. *The Woodchip Barn* entwickelt von der AA im Hooke Park.
Siehe: www.designandmake.aaschool.ac.uk/woodchip-barn/ [20. Juni 2016].
- 12 Neil A. Gershenfeld, *Fab. The Coming Revolution on Your Desktop, from Personal Computers to Personal Fabrication*, New York 2007.
- 13 Siehe: www.reprap.org [20. September 2015].
- 14 Siehe speziell die Nutzung von Farb-3D-Drucken für die Dazzle Lamp Prototypen. Siehe: Corneel Cannaearts, *Fabricating Material Intensities. Designing and Making Mediated by Computation*, Aarhus 2015, S. 152–161.
- 15 Die Technologie wird auch ‚*Fused Deposition Modelling*‘ genannt, doch diese Bezeichnung ist von dem Unternehmen Stratatsys geschützt, die als erstes diese Technologie entwickelt haben. Erst seit dem Auslaufen der ursprünglichen Patente für die FDM-Technologie hat der Gebrauch von 3D-Druckern zugenommen.
Siehe: www.reprap.org/wiki/Fused_filament_fabrication [24. Oktober 2015].
- 16 Für eine genaue Definition der g-Codes, siehe: www.reprap.org/wiki/G-code [26. September 2015].
- 17 Siehe: www.blog.diatom.cc/category/codethread [1. September 2014].
- 18 Mehrere Drucker wurden benutzt: Ein ‚*Makerbot*‘ und ein ‚*Ultimaker*‘.
- 19 G-Codes wurden ursprünglich vom MIT Servomechanisms Laboratory entwickelt, siehe: www.libraries.mit.edu/mithistory/research/labs/mit-servomechanisms-laboratory/ [15. März 2016].