

Christophe Barlieb

## Cybercraft: Das neue Paradigma

Die Gegebenheiten, die durch die zunehmende Annäherung von Mensch-Maschine-Materie und wissenschaftlicher Forschung entstehen, definieren neu, wie wir Dinge wahrnehmen, mit ihnen interagieren und sie herstellen. Generische Sensoren, Rechenleistung und drahtlose Netzwerktechnologien in unseren Körpern, Materialien, Häusern, Schulen und Arbeitsplätzen prägen die ‚Mainstream‘-Kultur neu. KI-Agenten (Künstliche Intelligenz) verarbeiten vernetzte Sensordaten in Echtzeit gegen bisherige, aktuelle und prognostizierte Modelle und liefern Informationen über Entscheidungen und Maßnahmen, deren Auswertung einst viel Zeit in Anspruch nahm. Diese technologischen Phänomene, kombiniert mit realen ökologischen und demographischen Veränderungen, greifen in bisher nicht vorhandener Größenordnung und Geschwindigkeit in die evolutionären Prozesse ein. Roboter, die einst ausschließlich mit der industriellen Serienmontage verbunden waren, fertigen individuelle Dinge, transportieren und montieren sie autonom. *Handcraft* und *Digitalcraft* fusionieren zu Cybercraft und vernetzen Menschen, Maschinen und Materie. Diese anhaltenden Phänomene verändern zwangsläufig die 600 Jahre alten Entwurfsmethoden der Architektur und die elf Jahrtausende alten Baupraktiken.

### Einführung

„Je mehr der Künstler über seine Kunst nachdenkt, desto mehr versucht er, den Ausdruck zu perfektionieren, mit dem er seine Bedeutung interpretieren würde, desto mehr wird er dazu gebracht, den ursprünglichen Ausdruck zu verstärken, um ihn klarer zu machen“.

Viollet-le-Duc<sup>1</sup>

Menschen, die mit digital vernetzten Sensoren, Maschinen und Materialien interagieren, definieren die Cyber-Ära. Das ‚nahtlose‘ Geflecht zwischen analogen und digitalen Medien macht diese Ära einzigartig. Verkörperte Intelligenz, die in interdisziplinärer Forschung und Praxis in der Robotik aufgeht, verändert die Art und Weise, wie wir Dinge wahrnehmen, mit ihnen interagieren und sie gestalten. Diese Fortschritte, die von kostengünstigen generischen Sensoren, Cloud Computing und Robotern angetrieben werden, definieren Theorie, rechtliche Rahmenbedingungen und Werkzeuge der Architektur neu. Aus innovativen Mensch-Maschine-Interaktionen, Sensortechnologien, künstlicher Intelligenz und Fortschritten in der Materialtechnologie entwickeln sich neue Architekturen.

Die folgenden Gedanken befassen sich mit den sogenannten Werkzeugen der Architektur, den bisherigen digitalen Praktiken auf diesem Gebiet und dem Status quo. Ein neuer Wissenshorizont zeichnet sich ab. Drei beispielhafte Praktiken des Cybercraft werden analysiert, um Annahmen über zukünftige Architektorentwurfsstrategien und die damit verbundenen Medien in ihrer Agency treffen zu können. Das erste, *Convective Apartments*, beschäftigt sich mit Meteorologie und Physiologie als Gestaltungsmedien. Während die zweite, *Mesh Mould Metal*, die In-situ-Fertigung mit Robotern untersucht. Schließlich nutzt *Adaptive Robotic Carving* maschinelles Lernen (ML) bezogen auf das Materialverhalten, um Mensch-Maschine Handlungsprozesse für die Holzverarbeitung nutzbar zu machen.

Diese Forschungsarbeiten befassen sich mit Architekturdesign, Ressourcenmanagement, autonomen Bauweisen, intelligenten Mensch-Maschine-Interaktionen, Materialverhalten sowie Fragen der analogen und digitalen Medien. Die Verhandlung der globalen und lokalen Herausforderungen des Klimawandels und des demographischen Wandels erfordert eine vertiefte Untersuchung des systemischen Netzes von Menschen, Maschinen und Materie.<sup>2</sup>

**Drei Werkzeuge** Architekten und Architektinnen vermitteln die räumliche und elementare Beschaffenheit der Architektur mittels dreier Werkzeuge aus der Renaissance.<sup>3</sup> Das erste Werkzeug ist eine schriftliche Erläuterung der architektonischen Absichten und Besonderheiten. Die zweite ist ein zweidimensionaler Satz maßstäblicher Zeichnungen, der von Projektübersichten bis hin zu detaillierten räumlichen Dimensionen und Beziehungen von Archi-

tekturelementen untereinander und zu deren Umgebung reicht. Die letzte ist eine Variation von maßstäblichen physischen Modellen, die räumliche, materielle und bauliche Eigenschaften wiedergeben. Diese drei Werkzeuge helfen Entwerfenden, zu forschen, Intentionen zu formulieren und mit Bauherren, Behörden und Auftragnehmern zu kommunizieren. Sie bilden in der Regel rechtsverbindliche Architekturdokumente.<sup>4</sup> In den letzten 60 Jahren haben sich diese etablierten Praktiken und Methoden zunehmend von analogen zu digitalen Medientechnologien gewandelt.

Neue Architekturkonstruktionen und Darstellungsmodalitäten ergaben sich aus diesem Wandel. Die heutigen digitalen Architekturmodelle beschränken sich nicht länger auf die Darstellung. Digitale Modelle sind Daten, die mit logischen Entwurfs-, Herstellungs- und Konstruktionsmethoden verknüpft sind. Die Methoden des Entwurfes auf dem Gebiet der Architektur werden durch die ‚Robotisierte Konstruktion‘ verändert.<sup>5</sup>

Autonome Architektursysteme sind in Zukunft wahrscheinlich und werden durch das Verbinden von analogem Wissen, das durch Generationen von ‚Handwerkskunst‘ gesammelt wurde, mit digitaler Sensorik-, Computer- und Bautechnologie ermöglicht.<sup>6</sup> Meines Erachtens bemerkt Chaikin zurecht, dass diese Entwicklungen zu langsam vorangehen.<sup>7</sup> Denn derzeit befassen sich nur eine Handvoll Graduierten- und Postgraduiertenprogramme kritisch mit den technologischen Veränderungen der digitalen Architektur. Dabei ist vor allem wichtig, diese Werkzeuge nicht nur als Instrumente zu lesen, sondern sie vielmehr als performative Medien zu begreifen.

**Digitale Rückblende** In den späten 1960er Jahren führten Jörg Schlaich und Rudolf Bergermann weiterführende digitale Berechnungen in die Konstruktionstechnik ein, um die anspruchsvolle Kabelnetzstruktur des Olympiastadions München zu berechnen.<sup>8</sup> Bereits Ende der 1970er Jahre wurden die digitalen Informationstechnologien zum Mainstream. Softwareentwickler lieferten digitale Versionen traditioneller Entwurfswerkzeuge für Architekten und Architektinnen, um Informationen intuitiv erstellen, bearbeiten, kopieren, einfügen und löschen zu können. Architekten konnten endlose Bibliotheken von Details, Komponenten und räumlichen Konfigurationen digital speichern, umfangreiche Stücklisten und Zeitpläne verwalten. Mit wenigen Tablet- oder Mausclicks verwan-

delten Architekten Ideen schnell in gedruckte Pläne und Gebäude. Die allgemeine Mentalität des Konstruierens von Architektur mit digitalen Medien verblieb allerdings auf dem Stand des analogen Zeichnens mit Zeichenschiene und Reißbrett.<sup>9</sup> Monges Darstellende Geometrie und Albertis Beschreibungen zur Perspektive reichten aus, um postmoderne Architekturvisionen zu entwickeln und zu vermitteln. Eine junge Architektengeneration erkannte bald, dass computergestütztes Design (CAD) eine neue Technologie war, die so nur eine alte Methode lediglich stütze.<sup>10</sup> Wenn Architektur sich weiterentwickelte, entweder aufgrund neuer Bautechnologien oder neuer Darstellungsmodalitäten, dann leistete CAD zu keinem der beiden einen Beitrag.<sup>11</sup>

Zur gleichen Zeit entwickelten Luft- und Raumfahrt-, Automobil- und Infrastrukturingenieure neue digitale Design- und Fertigungswerkzeuge und rationalisierten so die Entwicklungs- und Fertigungsprozesse. Der Architekt Frank Gehry hat die Medienpraxis der Architektur radikal beeinflusst. Anfang der 1990er Jahre führte er neue digitale Technologien und Arbeitsprozesse ein, um komplexe gekrümmte Oberflächen, deren Messdaten von Papiermodellen abgenommen wurden, zu bewerten, zu rationalisieren und herzustellen. Gehry hat Modelle digitalisiert, um ‚NURBS‘-Oberflächen parametrisch bearbeiten zu können. Schließlich gründete er ‚Gehry Technologies‘, um Werkzeuge zu entwickeln, die diese neuen konstruktiven Geometrien in der Baupraxis realisierbar machten. Aus diesem Prozess sind grundlegende Standards für die heutige ‚Building Information Modeling‘ (BIM) und ‚File-to-Factory‘-Kultur in der Architektur geschaffen worden.

Mitte der 1990er Jahre löste die Einführung des Personal Computers (PC), eines preiswerten und allgemein verfügbaren Computers, ein Wettrennen der Hard- und Software-Hersteller und -Anbieter aus. Mathematiker entwickelten und implementierten neue Algorithmen, unter anderem für ‚texture shaders‘, geometrische Bearbeitungen und ‚Computer Vision‘ (CV). Eine neue Generation experimentierte auf dem Gebiet der digitalen Medientechnologien, während einige Architekten vor möglichen Defiziten dieser Art von Architektur warnten. Risse im Architekturdiskurs, ebenso wie ‚neue Schulen‘ entstanden, die das konventionelle Designdenken herausforderten.<sup>12</sup> Computergrafik-(CG)-Tools wurden zur Indexierung von Formen in virtuellen zeitbasierten Systemen eingeführt, die ihre Umsetzung mit computergestützten numerisch

gesteuerten (CNC) Maschinen ermöglichten.<sup>13</sup> Zu dieser Zeit war die physische Erstellung dieser neuen Formen eine Herausforderung; Werkzeuge und Arbeitsabläufe mussten erst entwickelt werden.

Schließlich, etablierte sich das Internet mit der Jahrtausendwende als neuer Wissensvermittler, der es den Menschen ermöglichte, Informationen auf globaler Ebene unmittelbar zu erhalten und zu teilen. Diese Art der Netzwerkkommunikation führte zusammen mit dem Phänomen des ‚Bilbao-Effektes‘ und des ‚Starchitekten‘ zu einer Entwicklung von Abhängigkeiten in der Architektur. Peking wurde während der Zeit des wirtschaftlichen Aufschwunges und der Zeit der Vorbereitung der olympischen Spiele zu einer Heimat von internationalen Experten. Große Kapitalbeträge in Verbindung mit extremem Zeitdruck führten zur vollständigen Herausbildung und Durchsetzung der Methoden und Technologien des digitalen Entwerfens. Parametrische Entwurfswerkzeuge ermöglichten es den Arbeitsteams, während des gesamten Konstruktionsprozesses mit ‚*Smart Geometry*‘ zu arbeiten.<sup>14</sup> Die Architekten arbeiteten im Takt zwischen Asien, Europa und Nordamerika. Digitale Dateien von Plänen und Modellen waren rund um die Uhr zugänglich. Die Architekten, die vormals für ihre vermeintlich nicht realisierbaren Architekturen belächelt wurden, konnten nun rund um die Welt ihre ‚*Blobs*‘ verwirklichen. Poetische Computergrafik-Bilder wie von Philipp Schaerer gaben neue Impulse für einen weiterführenden Diskurs auf dem Gebiet der Architekturvisualisierung, während Arnold Walz‘ elegante Skriptmethoden es Stararchitekten ermöglichte, schwierige Geometrien durch systematische Vereinfachung der Komplexität zu kontrollieren. Das Credo ‚*I do it because I can*‘ ist mit der Finanzkrise 2008 schließlich zusammengebrochen. Im selben Jahr präsentierte das MoMA eine neue Generation von Architekten, Designern und Künstlern der digitalen Medien.<sup>15</sup>

In den letzten zehn Jahren gab es eine Flut in der Entwicklung von digitalen Werkzeugen und visuellen Programmierschnittstellen, die unter anderem auf Konferenzen wie „*Smart Geometry*“, „*Advances in Architectural Geometry*“ und „*Robots in Architecture*“ vorgestellt wurden.<sup>16</sup> Preiswerte digitale Modellierungstools und visuelle Programmierschnittstellen bereiteten neue Wege und knüpften Verbindungen zwischen den ‚*Design-Communities*‘.

*Status quo* Heute arbeiten Architekten und Architektinnen, die fließend in Programmiersprachen wie C++, C#, Python, Java und JS sind, auf Open-Source-Plattformen zusammen, entwickeln gemeinsam ‚Tools‘ und teilen versionskontrollierte Quellcodes, um sie offen für alle zu teilen, zu verwenden, zu klonen, zu prüfen, zu publizieren und zu verbreiten. Digitale Medientechnologien durchdringen die Architektur in einem gewaltigen Tempo, und die akademischen Lehrpläne passen sich nur langsam an.<sup>17</sup> Neue Entwurfsmethoden, die an der ETH Zürich, CITA und MIT entwickelt wurden, fordern traditionelle Praktiken heraus. Sie werden im Rahmen interdisziplinärer Forschungsprojekte in den Bereichen Fertigung, Materialverhalten und Medientechnologie erforscht. Die Anwendung dieser neuen Forschungsthemen und -modelle auf die Architektur- und Bauindustrie erfordert eine starke interdisziplinäre Zusammenarbeit.<sup>18</sup> Architektenkammern, Akkreditierungsstellen und Universitäten müssen diesen neuen Praktiken und Anforderungen entsprechend die Lehrangebote überarbeiten, um zukünftige Architekten und Architektinnen unterrichten und fördern zu können. Im Folgenden werden diese aktuellen Themen im Hinblick auf das Erfassen, Anpassen und Gestalten von Architektur im Zeitalter des Cybercraft reflektiert: *ein Raum-Zeit-Phänomen, bei dem Analog und Digital hybrid ineinandergreift, das Mensch, Maschine und Materie miteinander vernetzt.*

**Neuer Wissenshorizont** Seit den Anfängen der europäischen Moderne, die sich in Holland, Deutschland und Frankreich vor 100 Jahren entwickelt hat, haben wir nicht mehr eine so beeindruckende Bandbreite innovativer Entwurfspraktiken auf dem Gebiet der Architektur erlebt.<sup>19</sup> Architekten und Architektinnen kodieren den Raum von Ferne, kodieren Materialien und bauen Architekturen autonom auf.<sup>20</sup> Hybride analoge und digitale Medien vernetzen Menschen, Maschinen und Materialien und ermöglichen Echtzeit-Entwurfs-Prozesse. Kostengünstige Sensorik, computergestützte Bearbeitung und Fertigungstechnologien führen zur Anbindung digitaler Medien, während Sensoren, Prozessoren und Manipulatoren, die in Feedback-Schleifen integriert sind, Handlungsspielraum erzeugen.

Entstehen intelligente Multiagentensysteme? Oliver Brock argumentiert, dass Intelligenz erkennbar ist, wenn wir sie sehen. Sie ist quantifizierbar, aber wir können sie nicht definieren. Um

das Problem zu lösen, schlägt Brock vor, unter anderem Maschinenintelligenzen zu erforschen, um die menschliche Intelligenz zu erfassen.<sup>21</sup> Unsere taktilen, visuellen, akustischen, olfaktorischen und geschmacklichen Organe liefern Signale an unser Gehirn, um Phänomene wahrzunehmen. Nach der Prozessierung aktivieren bioelektrische Impulse die Muskeln und informieren unsere Umwelt. Die mathematische Modellierung dieses Prozesses ist vergeblich – wie können wir 300 Millionen Nerven, 100 Milliarden Gehirnzellen, 600 Muskeln modellieren? Ist das überhaupt notwendig? Der Mensch zeichnet sich dadurch aus, die wahrnehmbare Welt zu abstrahieren, zu simulieren, darzustellen und zu mechanisieren.

Zerstörungsfreie Sensorik ermöglicht die Erforschung des Weltraums und der oberflächennahen Geologie, die vom Niederfrequenzradar bis zum Hochfrequenzultraschall reicht. ‚*Multi-Sensing*‘ erzeugt ein Spektrum von messbaren Phänomenen. So können beispielsweise vernetzte Sensoren (Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Luftpartikel, Schalldruck, Umgebungslicht) an statischen Orten auf der Welt klimatische Ereignisse erfassen und sichtbar machen. Mit dem Wachstum der Datensätze und der Entwicklung analytischer Methoden werden zeitabhängige Algorithmen zur Erkennung von Mustern eingesetzt. Das *Earth*-Projekt ist „eine Visualisierung der globalen Wetterbedingungen, die von Supercomputern prognostiziert wird, die alle drei Stunden aktualisiert werden. Die aktuellen Schätzungen der Meeresoberfläche werden alle fünf Tage aktualisiert, während die Temperaturen der Meeresoberfläche und die Anomalie des täglichen Durchschnitts (1981-2011) täglich aktualisiert werden. Die Meereswellen werden alle drei Stunden aktualisiert, und Aurora aktualisiert alle dreißig Minuten“.<sup>22</sup> Das *Smart Citizen Kit* ist eine weitere von mehreren Open-Source-Plattformen, die allgemeine Klimadaten für Forscher und Designer bereitstellen.<sup>23</sup> Über diese Plattformen können Architekten und Architektinnen Stadt- und Landschaftsprojekte planen, die an sich entwickelnde Klimamodelle angepasst sind.

‚*Simultaneous Localization and Mapping*‘ (SLAM), ‚*Laser Detection, and Ranging*‘ (LIDAR) und Wärmesensoren vermessen den Raum lokaler Umgebungen zur Kartierung in Echtzeit. Das Ergänzen der Sensoren um das ‚*Global Positioning Systems*‘ (GPS) erhöht die Genauigkeit der Ortung. Einst für die Luft- und Raumfahrt und den militärischen Einsatz entwickelt, sind diese Tech-

nologien heute allgemein verfügbar. Sie kommen in bestehenden Fahrzeugen und Baumaschinen vor, unter anderem in Smartphones, Autos, Shuttles, Inspektionsdrohnen, Roboterkränen, Mauerrobotern.

Sensoren sammeln genaue Daten. So kann beispielsweise eine Stereokamera Tiefe, geometrische Merkmale, Farbbandbreite und aktuelle Positionen erfassen. Der endlose Datenstrom der Kamera allein ist nutzlos. Die Daten werden erst nach der Verarbeitung lesbar. Die Kombination verschiedener Datenströme von Sensoren ermöglicht es Phänomene zu visualisieren, die unsere Sinne zum Teil wahrnehmen und zum Teil auch nicht wahrnehmen können.

Sensordaten in Kombination mit Cloud Computing und intelligenten Algorithmen unterstützen KI-Systeme. Feedbackschleifen zwischen Datenerfassungstechnologien und Prozessagenten sorgen für spannende Ergebnisse mit großem Potential. Diese Paradigmen stellen herkömmliche Entwurfsmethoden in Frage, indem sie die Art und Weise, wie wir Dinge wahrnehmen, mit ihnen interagieren und sie gestalten neu definieren.

Vernetzte Computer können trainiert werden, Muster zu erkennen, die Menschen niemals in der Lage wären zu unterscheiden. ‚*Computational Agency*‘ und Anpassung sind Schlüssel zu neuen Methoden des Entwurfes. Die Anpassung ist ein Hybrid aus Computer und Kommunikation, der eine perzeptuelle Veränderung ermöglicht, die auf dem ursprünglichen sensorischen Input aufbaut. Dies wiederum führt zu entsprechenden Handlungen, die unsere Lebensräume gestalten können.

Das *Open-Source-Robot-Operating-System* (ROS) bildet das Herzstück der derzeit meisten Roboterinnovationen in der Architekturentwicklung und -fertigung.<sup>24</sup> Der ROS-Kern ist für die Kommunikation zwischen Knoten zuständig, die Dienste über das digitale TCP/IP Handshaking veröffentlichen und abonnieren. Knoten sind Hard- und Softwaresysteme, die an ROS ‚hängen‘. Robotische Vorrichtungen und Sensoren (Hardwareknoten) übertragen Daten über das ROS-Netzwerk, während Anwendungen (Softwareknoten) die Daten verwenden, um Bewegungen zu planen, Objekte zu erkennen und Entscheidungen zu treffen. Praktisch jedes Gerät und jede Software kann sich über eine kompatible C++-, C#-, Python-, Java- und/oder JS-Schnittstelle an ROS anschließen. Da ROS über TCP/IP kommuniziert, ist es möglich, Anwendungen auf zahlreichen Betriebssystemen auszuführen. Die Steuerung von Roboter-



systemen direkt über webbasierte Applikationen und interaktive grafische Benutzeroberflächen (GUIs) machen ROS zu einem vielseitigen Vermittler für mobile und flexible Anwendungen.

Kraft-Moment-Sensorik in Maschinen ermöglicht haptische Wirkungen. Menschen nutzen Druck und taktile Wahrnehmung, um zu spüren, wie die Dinge zusammenpassen. Roboter wie der SARA des DLR können ein sub-Newton Kraft-Moment messen.<sup>25</sup> Diese nachgiebigen Roboter ermöglichen eine neue Zusammenarbeit zwischen Menschen und Maschine ohne herkömmliche Roboterzellogehäuse. Menschen können physisch mit diesen Maschinen interagieren, um entweder dabei zu helfen, unvorhergesehene Bedingungen zu überwinden oder ihnen spezifische Konfigurationen zu vermitteln.

Kraft-Drehmomentsensoren, die in anpassungsfähige Roboter eingebaut sind, die hochauflösende Vektorkraftdaten über ROS publizieren, ermöglichen komplexe Montagen. In Kombination mit CV erkennen diese Maschinen Hindernisse, Teile und Ziele in kürzester Zeit. KI, die auf den entsprechenden Maschinen läuft, gibt an die Roboter Informationen zurück, die ihnen die weitere Aktion im Raum ermöglichen. Die Anpassung an sich ändernde Umgebungsbedingungen in Echtzeit bedeutet einen Paradigmenwechsel in der Fertigung. Das bedeutet, dass generische Maschinen nun mittels Datenströmen, übergreifend gefassten Aufgaben und Feedbackschleifen agieren.

Die folgenden exemplarischen Beispiele verdeutlichen die Interaktion zwischen Mensch, Maschine und Materie sowie das Lernen mittels Sensortechnologien und angepassten ML-Feedbackschleifen zur Herstellung neuer architektonischer Materialien, Elemente, Räume und Ästhetiken.

### **Drei Praxisbeispiele**

*Convective Apartments* Philippe Rahm, ein Schweizer Architekt, definiert seine Praxis als eine Mischung aus Architektur, Ingenieurwesen und Forschung. Er unterrichtet an der Nationalen Schule für Architektur in Versailles.

In seinen Experimenten bilden meteorologische und physiologische Phänomene konstruktive Mittel.<sup>26</sup> Das Projekt *Convective Apartments* nutzt das physikalische Gesetz des Luftauftriebes, um das Klima von Wohnumgebungen zu regulieren: weniger

dichte, warme Luft steigt auf, während dichtere, kalte Luft fällt. Rahm entwickelt Klimazonen, die auf menschlichen und maschinellen Aktivitäten basieren, um den Wärmeaustausch zu steuern. Er schlägt zum Beispiel die Wärmeregulierung des menschlichen Körpers durch Kleidung vor, um den Energieverbrauch in nur geringfügig und auch umgekehrt in stark frequentierten Räumen zu verringern:

„Ein intelligentes System auf Basis von Temperatursensoren, die außerhalb des Gebäudes und im öffentlichen Raum installiert sind, misst die Temperatur in Echtzeit. [...] Die Software berechnet die genaue zu ersetzende Luftmenge für jede Wohnung in Bezug auf die Anzahl der Bewohner und die durch ihre Aktivitäten erzeugte Abluftmenge, um den Energieverbrauch zu senken“.<sup>27</sup>

Diese Methode der Thermoanpassung wird durch Sensorik und räumliche Konfiguration ermöglicht. Die Decken des Gebäudes werden zu Klimazonen ‚verformt‘. Die verschiedenen Geschosshöhen, kombiniert mit Sensordaten, regeln den Luftstrom durch die Räume. Diese klimatischen Gestaltungsstrategien beziehen Nutzer und räumliche Nutzungen ein, um ihre Grundrisse zu gestalten und zu strukturieren sowie das formale Erscheinungsbild des Gebäudes zu beeinflussen. Rahm verwandelt im Wesentlichen ein physikalisches Phänomen, die Wärme, in eine visuelle, ‚thermische Landschaft‘.

Die Erforschung sinnlicher Phänomene zur Generierung von Architektur durch die Vernetzung von aktiven und passiven Sensortechnologien, die von der KI gesteuert werden, könnte zu einer wesentlichen Reduzierung des Energiebedarfs führen. Durch die Kombination verschiedener Gebäudesystemtechnologien mit erneuerbaren Baustoffen und intelligenten Bauweisen entstehen neue Formen von ‚intelligenter‘ Architektur.

In diesem Zusammenhang fordert Rahm: „Wir müssen unseren Fokus von einem rein funktionalen Ansatz auf einen sensibleren und auf unsichtbare, klimabezogene Aspekte des Raumes achten“.<sup>28</sup>

*Mesh Mould Metal* Fabio Gramazio und Matthias Kohler (GKR) von der ETH Zürich sind Pioniere bei Entwurfsmethoden der robotergestützten Architektur. Ihr erstes Roboter-Experiment zum

Mauerwerk zeigte, dass ein generischer industrieller Manipulator (Roboter) maßgefertigte architektonische Elemente herstellen konnte.<sup>29</sup> Der Roboter ist damit kein reines Serienwerkzeug mehr.

Ihre Forschungsfragen verbinden „die digitale Realität des Computers mit der physischen Realität der Architektur“<sup>30</sup> und machen das Digitale fassbar. GKR untersuchen materielle Prozesse, indem sie „Daten und Material, Programmierung und Konstruktion [...] mit der materiellen Realität gebauter Architektur verbinden“.<sup>31</sup>

Im Jahr 2012 stellte GKR *Mesh Mould* vor, das den 3D-Roboterdruck von Betonschalungen mittels thermischer Kunststoffextrusion untersucht. Im Jahr 2016 entwickelte sich die Forschung zu *Mesh Mould Metal* und dem *In situ Fabricator*-Demonstrator im *Empa NEST DFAB House 2018*. Das ‚*Mesh*‘ von GKR bezieht sich auf das interne Metallbewehrungssystem, das zur Erhöhung der Zugfestigkeit in Betontrennwänden oder tragenden Wänden verwendet wird: „Das ‚*Onboard-Sensing*‘- und Berechnungssystem des Roboters ermöglicht es, das Netz ohne externe Messgeräte zu konstruieren. Es orientiert sich am Fundament der Wand, das vor der Roboter-Konstruktion installiert und mit Markern und ‚Tags‘ versehen wird. Eine Kamera am Ende des Effektors misst die Markierungen zur Positionierung des Roboters, und zwei weitere Kameras überwachen die genaue Herstellung des Mesh“.<sup>32</sup>

Der Agent (Roboter) erscheint als die digitale Version des traditionellen Betonbauers, was jedoch nicht ganz korrekt ist. Die Innovation liegt in der Fähigkeit des Agenten, die Baustelle zu ‚meistern‘, während er die Betonstahlbewehrung in jede gewünschte Form bringt, bevor sie mit Spritzbeton besprüht wird.<sup>33</sup> GKR-Wände sind keine einfachen orthogonalen Ebenen im Raum und können nahezu jede Form annehmen.

Während der *In situ Fabricator* ein hohes Maß an Autonomie aufweist, hängt er bei der Erfüllung seiner Aufgabe von der menschlichen Interaktion ab. Die Wand ist vorberechnet, und die Baustelle muss für die Installation des Roboters vorbereitet werden. Allerdings werden ähnliche Maschinen schon bald autonom vor Ort agieren können und in der Lage sein, neue noch nicht entworfene Strukturen zu schaffen. Künstliche Intelligenz und Sensortechnologie bereiten den Weg in diese Zukunft und werden mit hoher Sicherheit einen Paradigmenwechsel in der Entwurfsmethodologie und der Konstruktionstechnik bewirken.

*Adaptive Robotic Carving* Giulio Brugnaro und Sean Hanna von der Bartlett School of Architecture, UCL, forschen und entwickeln Methoden zur Konditionierung von Holzverarbeitungssystemen durch Integration von Materialverhalten. Entwurfs- und Fertigungsabläufe vereinen Roboterfertigung, Sensorik und ML, um den Werkprozess zu gestalten. Dabei entlehnen sie Motion-Tracking-Technologien dem Film-, Entertainment- und Medizinbereich, um die Bewegungsabläufe im Handwerk digital zu erfassen. Ihr ML-Trainingszyklus reicht von der Aufnahme von Kunsthandwerkern bis hin zu autonomen Roboterbewertungen. Eine Design-Oberfläche stellt das notwendige Wissen bereit, um Prozesse durch Material- und Werkzeugeistung voranzutreiben.<sup>34</sup>

Brugnaro ‚erfindet‘ das traditionelle Holzbildhauerhandwerk neu, indem er analoge Holzmaserungen und Meißelschnitte mit digitalen Abtast- und Fertigungstechnologien zusammenfügt. Die Forschung zeigt, dass Maschinen in der Lage sind von einem ‚Meister‘ zu lernen und sich dann selbstständig weiterbilden, um neue Handlungen ausführen zu können. Diese Methode stellt klassische lineare Designstrategien in Frage, indem sie Feedbackschleifen zwischen den verschiedenen Phasen des Prozesses einführt. Der Gestalter kann die Prozesse beeinflussen, indem er die Material- und Toolleistung vorgibt, anstatt sie zu bestimmen.

**Ausblick** Cybercraft vernetzt analoge und digitale Mensch-Maschine-Interaktion, Sensorik, KI und Materialverhalten, um eine physische Architektur zu verwirklichen. Digitale Architekturmodelle beinhalten eine Vielzahl von Daten. Die gezeigten Anwendungsbeispiele verdeutlichen, dass parametrische digitale Informationsmodelle Robotersysteme und Produktionsabläufe steuern können. Die ‚nahtlose‘ Interaktion zwischen Mensch, Maschine und Material ermöglicht es, lokal angepasste, maßgefertigte Strukturen zu gestalten und diese in dezentralen Fertigungseinrichtungen sowie vor Ort herzustellen. Diese radikalen Veränderungen der Entwurfsmedien nehmen beständig zu.

Mit Blick auf die Geschichte können wir den Entwicklungsprozess der digitalen Architektur nachvollziehen. Leibniz revolutionierte die ‚moderne Welt‘ durch seine Vision und Schaffung der Grundlagen des Binärsystems und der digitalen Rechenmaschine.<sup>35</sup> Vor 100 Jahren rief Walter Gropius das Experiment *Bauhaus* ins Leben, um Architektur im Sinne der modernen Industrialisie-

nung zu gestalten. Gleichzeitig ließ Karel Čapek den Roboter in die kulturelle Perspektive der Mensch-Maschine einfließen und forderte die Industrialisierung kritisch heraus. Es hat fast 340 Jahre gedauert, bis Leibniz' *De Progressione Dyadica* und die daraus resultierenden digitalen Medientechnologien mit den physischen Realitäten der Architektur in Einklang gebracht wurden. Wenn Quantencomputer sein theoretisches Versprechen erfüllen, können wir das Binäre schließlich durch ‚Qubits‘ ersetzen.<sup>36</sup>

Wir gingen vom Handcraft zum Digitalcraft über, um zum Cybercraft zu gelangen. Das heißt, die Architektur wandelte sich vom ‚Greifbaren‘ zum ‚Virtuellen‘ zum ‚Hybriden‘ – dem ‚strukturellen‘ Material und der ästhetischen Praxis der Architektur.<sup>37</sup> Cybercraft umfasst unsere einzigartige Fähigkeit, die physische Welt mit Händen und Gedanken zu fassen und erweitert sie durch die digitalen Informationstechnologien.<sup>38</sup>

Barbara Grosz et al. vom 100 Jahre KI-Ausschuss der Stanford University glauben „die zukünftigen Beziehungen der Menschen zu Maschinen werden immer ausgeprägter, fließender und personalisierter werden, da die KI-Systeme lernen, sich an individuelle Persönlichkeiten und Ziele anzupassen. [...] Der Bereich der KI verlagert sich in Richtung des Aufbaus intelligenter Systeme, die effektiv mit Menschen zusammenarbeiten können, einschließlich kreativer Möglichkeiten zur Entwicklung interaktiver und für Menschen angepasster Wege, Roboter zu unterrichten“.<sup>39</sup> Roboter, die früher nur von hochqualifizierten Informatikern programmiert werden konnten, sind nun von interdisziplinären Teams für allgemeine Aufgaben programmierbar.

Sensorik, wie CV und ‚Force-Torque‘, vernetzt mit Robotergeräten und KI-Knoten auf ROS, können komplexe Aufgaben bewältigen. Diese Aufgaben reichen von der autonomen Endbearbeitung von Spezialoberflächen durch Scannen von Geometrien in Echtzeit bis hin zu CAD-Knoten, die ästhetische und Materialprozesse beeinflussen. Diese Methoden ermöglichen es ‚Meistern‘, die digitale Materialität physisch zu kontrollieren.<sup>40</sup>

Je mehr wir mit neuen und traditionellen Entwurfsmethoden, Materialien und Fertigungstechnologien interagieren, umso mehr bestimmen sie unsere Wahrnehmung, Interaktion mit, und Gestaltung von Dingen. Die Feedbackschleife zwischen Mensch-Maschine und Material-Lernen erzeugt eine große Variation von Anwendungsmöglichkeiten. Das Lernen mit Robotern und digital

informierten Materialien ist ein vielseitiges und bereicherndes Erlebnis. Das Alberti-Paradigma, das Architekten und Architektinnen aus der Materialität der Architektur herauslöst, steht zur Debatte.<sup>41</sup> Es ist höchste Zeit, dass Architekten und Architektinnen ihre überholte Disziplin und ihre alte Baupraxis neu definieren, indem sie sich kritisch mit diesen neuen Phänomenen befassen.

Informationsbasiertes Modellieren ermöglicht es Architekten und Architektinnen, Fertigungsprozesse von Architekturelementen zunehmend zu steuern. Durch die Entwicklung von Robotik und KI werden Architekten und Architektinnen in der Lage sein, digitale Modelle zu entwerfen, die Material-, Fertigungs- und Montageprozesse verbinden. Traditionelle Handwerksbetriebe können sich schließlich zu lokalen dezentralen Produktionsstätten weiter entwickeln, was zu nachhaltigeren Fertigungs- und Baupraktiken führt.<sup>42</sup> Diese lokalen Einrichtungen könnten teilautonom architektonische Elemente aus digitalen Dateien herstellen und an nahegelegene Baustellen liefern. Eine Herausforderung kann die robotergestützte Herstellung und Montage von Teilen vor Ort sein. Buchli et al. weisen darauf hin, dass „die Möglichkeiten bei der Lösung der Herausforderung der ‚In-situ-Fertigung‘ immens sind. Die Technologie, die diese Aufgabenstellung löst, wird effizientere Prozesse und Produkte in vielen Bereichen ermöglichen, die bisher durch aufwendige Montage und Werkzeugausrüstungen geprägt waren“.<sup>43</sup> Autonome Maschinen können schließlich unvorhergesehene Konstruktionsprobleme, bei denen Gestalter oft die Kontrolle über den Entwurf verlieren, vor Ort lösen. Architekten und Architektinnen müssen lernen, kritisch mit diesen Möglichkeiten zu experimentieren, um sensible Architekturen zu schaffen, und damit neue Gesellschaftsmodelle zu definieren.

#### Anmerkungen

- 1 Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc, *Entretiens sur l'architecture*, Paris 1863, S. 83–84.
- 2 Bruno Latour, *Das terrestrische Manifest*, Berlin 2019, S. 88–91.
- 3 Robin Evans, *The Projective Cast – Architecture in Its Three Geometries*, Cambridge 1995.
- 4 Mario Carpo, *The Alphabet and the Algorithm*, Cambridge 2011, S. 71–79.

- 5 ‚Robotisierte Konstruktion‘ bezieht sich in diesem Zusammenhang auf Autonomie und eingebettete Intelligenz, wie sie in der allgemeinen Robotik zu finden sind.
- 6 Siehe dazu David Pye, *The Nature and Art of Workmanship*, London 1968, S. 20: „Wenn ich dem Wort Handwerkskunst eine Bedeutung zuschreiben muss, möchte ich als erste Annäherung sagen, dass es sich um eine einfache Handwerkskunst mit irgendeiner Art von Technik oder Apparatur handelt, bei der die Qualität des Ergebnisses nicht vorgegeben ist, sondern von dem Urteilsvermögen, der Geschicklichkeit und der Sorgfalt abhängt, die der Hersteller während seiner Arbeit anwendet. Die wesentliche Idee ist, dass die Qualität des Ergebnisses während des Herstellungsprozesses ständig gefährdet ist; deshalb nenne ich diese Art der Verarbeitung ‚Die Verarbeitung des Risikos‘: eine ungeschliffene Phrase, aber zumindest beschreibend“.
- 7 George Chaikin, „The Computer and the Studio“, *EAAE/eCAADe International Workshop Proceedings*, Leuven 1998, S. 51–54.
- 8 „Leichte, durchsichtige, gleichermaßen schützende, wie offene Dächer überspannen den sanft modellierten Olympiapark mit Olympiastadion, Olympiahalle und Olympiaschwimmhalle. Eine Seilnetzkonstruktion aus vielen fast regelmäßigen sattelförmigen, mit Randseilen eingefassten Flächen ist an mehreren Punkten von außenstehenden Masten abgehängt, beziehungsweise von innen durch sogenannte Luftstützen getragen und nach außen abgespannt. Völlig neuartig waren die Anforderungen, die dieses Dach an die geometrische Genauigkeit, sowohl hinsichtlich des Zuschnittes als auch der Vorfertigung stellte. So kam es hier erstmals zu einem Computereinsatz in großem Stile für derartige Aufgaben und - für die spätere ‚High-Tech-Architektur‘ von besonderer Bedeutung - zu einer Wiedergeburt des Gusstahles im Bauwesen“. [www.sbp.de/projekt/dach-olympiastadion-muenchen-1972-1/](http://www.sbp.de/projekt/dach-olympiastadion-muenchen-1972-1/) [14.08.2019].
- 9 In CAD verschiedene Farben stellten unterschiedliche Liniengewichte dar; Architekten und Architektinnen wurden geschickt, ihre Zeichnungen durch Farbe zu lesen, bevor sie sie plotten – eine bizarre Aufgabe, die bis heute besteht.
- 10 Marshall McLuhan, *Understanding Media: The Extensions of Man*, London 1974.
- 11 Wie im Beitrag von Leon Batista Alberti, Philibert de L’Orme, Gaspar Monge, Walter Gropius, Frank Gehry.
- 12 Während der 1990er Jahre entstanden neue Schulen und Architekturausbildungsprogramme, wie die „Paperless Studios“ der Columbia University GSAPP, SCI-ARC, Die Angewandte und

- AA London. Ihre Kernagenda untersuchte entstehende digitale Medientechnologien als performative Medien für kreativen Ausdruck und kritische Reflexion.
- 13 Greg Lynn, *Animate Form*, New York 1999.
  - 14 „Smartgeometry (Sg) wurde 2001 als Partnerschaft zwischen Praxis, Forschung und Wissenschaft gegründet, bestehend aus Mitgliedern der weltweit führenden Architektur- und Ingenieurbüros und Bildungseinrichtungen. Für die neuen Generationen von Designern, Ingenieuren und Architekten werden Mathematik und Algorithmen so natürlich wie Stift und Bleistift. Die Sg fördert die Entstehung dieses neuen Paradigmas, in dem Digital Designer und Handwerker die Kombination von digitalen und physischen Medien intelligent nutzen können, um Projekte vom Design bis zur Produktion zu begleiten“. [www.smartgeometry.org/about/](http://www.smartgeometry.org/about/) [14.08.2019].
  - 15 Paola Antonelli, *Design and the Elastic Mind*, New York 2008.
  - 16 „Advances in Architectural Geometry (AAG) ist eine Konferenz, auf der sowohl theoretische als auch praktische Arbeiten im Zusammenhang mit neuen geometrischen Entwicklungen vorgestellt werden. Daran sind Architekten, Ingenieure, Informatiker, Mathematiker, Software- und Algorithmen-Designer und -Auftragnehmer beteiligt. Unser Ziel ist es, Forscher aus Architektur- und Ingenieurbüros, Hochschulen und der Industrie zusammenzubringen. Die AAG hat sich zu einer Referenz in Forschung und Praxis entwickelt und wird durch die direkte Beteiligung der renommiertesten Architektur- und Ingenieurbüros sowie der Forschungslabors unterstützt“. [www.architecturalgeometry.org/aag18/](http://www.architecturalgeometry.org/aag18/) [14.08.2019].
  - 17 Christophe Barlieb, „Architectonics“, in: Vera Viana, Alexandra Paio (Hg.), *Geometrias'14 New Challenges on Practice, Researching and Teaching Geometries and Drawing*, Lissabon 2014, S. 139–145.
  - 18 Horizon 2020, Building Innovation in the Extended Digital Chain, InnoChain, [www.cordis.europa.eu/project/rcn/193957/results/de](http://www.cordis.europa.eu/project/rcn/193957/results/de) [14.08.2019].
  - 19 Mies van der Rohe war auf der Suche nach architektonischen Erkenntnissen. Er nutzte grundlegend standardisierte industrielle Materialeigenschaften (Walzstahl und Glas) durch präzise, strukturelle (wie in der Grammatik) Detaillierung. Le Corbusier strebte nach einer neuen Architektur, einem ‚neuen Geist‘. Auch er ließ sich von der Technisierung und dem funktionalen Formalismus inspirieren: Boote, Flugzeuge und Autos. Das *Domino-Haus* war ein direktes Ergebnis der mit der Normung verbundenen strukturellen Klarheit und führte zu seinem berühmten Anspruch: „Das Haus ist eine Maschine zum Leben“. Die Werkzeuge, mit denen diese architektonischen ‚Modelle‘ hergestellt wurden, reichen jedoch bis in die



- Renaissance zurück. Le Corbusier ging mit *Ronchamp* neue Wege, aber die Einschränkungen der Darstellenden Geometrie begrenzten sie einigermaßen.
- 20 Jan Willmann, Philippe Block, Marco Hutter, Kendra Byrne, Tim Schork (Hg.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018*, Cham 2018. S. 9–13.
  - 21 *The Science of Intelligence*. [www.scienceofintelligence.de/about-us/our-mission/](http://www.scienceofintelligence.de/about-us/our-mission/) [14.08.2019].
  - 22 *Earth*. [www.earth.nullschool.net/](http://www.earth.nullschool.net/) [14.08.2019].
  - 23 *SmartCitizen*. [www.smartcitizen.me/kits/](http://www.smartcitizen.me/kits/) [14.08.2019].
  - 24 *ROS*. [www.ros.org](http://www.ros.org) [14.08.2019].
  - 25 *SARA*. [www.dlr.de/rm/desktopdefault.aspx/tabid-11709/#gallery/29681](http://www.dlr.de/rm/desktopdefault.aspx/tabid-11709/#gallery/29681) [14.08.2019].
  - 26 Wojciech Czaja, „Architekturtage 2019: Ein Baustoff namens Klima“, *Der Standard*, 20.05.2019, [www.derstandard.at/story/2000103499653/ein-baustoff-namens-klima](http://www.derstandard.at/story/2000103499653/ein-baustoff-namens-klima) [14.08.2019].
  - 27 Philippe Rahm, *Convective Apartments*, Hamburg 2010, [www.philipperahm.com/data/projects/convectiveapartments/](http://www.philipperahm.com/data/projects/convectiveapartments/) [14.08.2019].
  - 28 Alex Tieghi-Walker, „Philippe Rahm’s Holistic Décor in the Age of Climate Change“, PIN-UP, [www.pinupmagazine.org/articles/philippe-rahm](http://www.pinupmagazine.org/articles/philippe-rahm) [14.08.2019].
  - 29 Gramazio Kohler, *The Robotic Touch*, Zürich 2014, S. 218–131.
  - 30 Ebd., S. 9.
  - 31 Ebd., S. 15.
  - 32 Gramazio Kohler Research. [www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/324.html](http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/324.html) [14.08.2019].
  - 33 Jonas Buchli et al., „Digital in situ fabrication – Challenges and opportunities for robotic in situ fabrication in architecture, construction and beyond“, in Robert Flatt, Timothy Wangler (Hg.), *Cement and Concrete Research*, Lausanne 2018, S. 70–75.
  - 34 Giulio Brugnaro, Sean Hanna, „Adaptive Robotic Carving, Training Methods for the Integration of Material Performances in Timber Manufacturing“ in: Jan Willmann, Philippe Block, Marco Hutter, Kendra Byrne, Tim Schork (Hg.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018*, Cham 2018. S. 336–348.
  - 35 Hans Poser, „Die Schöpfung der Welt aus Null und Eins. Gottfried Wilhelm Leibniz im Porträt“, *Der Blaue Reiter – Journal für Philosophie 41 – Die Seele im Digitalen Zeitalter*, 2018, S. 96–101.
  - 36 Cade Metz, „Google Claims a Quantum Breakthrough That Could Change Computing“, *New York Times*, 23.10.2019. [www.nytimes.com](http://www.nytimes.com)

com/2019/10/23/technology/quantum-computing-google.html [23.10.2019].

- 37 Das „Strukturelle“ kann in den Formulierungen von Mies van der Rohe verstanden werden: „Dann wurde mir klar, dass es nicht Aufgabe der Architektur war, die Form zu erfinden. Ich versuchte zu verstehen, was diese Aufgabe war. Ich habe Peter Behrens gefragt, aber er konnte mir keine Antwort geben. Diese Frage stellte er nicht. Die anderen sagten: ‚Was wir bauen, ist Architektur‘, aber wir waren mit dieser Antwort nicht zufrieden.... Da wir wussten, dass es eine Frage der Wahrheit ist, versuchten wir herauszufinden, was Wahrheit wirklich ist. Wir waren sehr erfreut, die Definition der Wahrheit von St. Thomas von Aquin zu finden: ‚Adequatio intellectus et rei‘, oder wie ein moderner Philosoph es in der Sprache von heute ausdrückt: ‚Wahrheit ist die Bedeutung der Tatsache‘. Berlag war ein Mann von großer Ernsthaftigkeit, der nichts akzeptieren würde, was gefälscht war, und er war es, der sagte, dass nichts gebaut werden sollte, was nicht klar konstruiert ist. Und Berlag tat genau das. Und das in einem Ausmaß, das in Amsterdam berühmt ist. Der Beuis, war ein mittelalterlicher Charakter, ohne mittelalterlich zu sein. Er benutzte Ziegel, wie es die mittelalterlichen Menschen taten. Die Idee einer klaren Konstruktion kam mir dort als eine der Grundlagen, die wir akzeptieren sollten. Wir können leicht darüber reden, aber es ist nicht einfach, es zu tun. Es ist sehr schwierig, an dieser grundlegenden Konstruktion festzuhalten und sie dann zu einer Struktur zu erheben. Ich muss klarstellen, dass man in der englischen Sprache alles strukturiert nennt. In Europa tun wir das nicht. Wir nennen als Hütte eine Hütte und nicht eine Struktur. Nach der Struktur haben wir eine philosophische Idee. Die Struktur ist das Ganze von oben nach unten, bis ins letzte Detail mit der gleichen Idee. Das ist es, was wir Struktur nennen. (Zitat von Peter Carter in der Architektur, März 1961)“. Kenneth Frampton, *Moderne Architecture*, New York 1980, S. 161.
- 38 Otl Aicher, *Analog und Digital*, Berlin 2015, S. 21–26.
- 39 Barbara Grosz et al., *Artificial Intelligence and Life in 2030, One Hundred Year Study on Artificial Intelligence, Report of the 2015 Study Panel*, Stanford 2016, S. 6.
- 40 Dies ist ein großer Unterschied zu 3D-Drucktechnologien, die aufgrund von Materialschichten virtuelle Materialeigenschaften aufweisen. Nur bei der Materialfusion ‚*Selective Laser Sintering*‘ (SLS) kehren additive Technologien in den physikalischen Bereich der Architektur zurück. Standard 3D-Drucktechnologien können für Gießzwecke, wie z.B. Formen, nützlich sein, aber ihre Materi-

aleigenschaften sind nur für diesen Zweck geeignet. Die Idee von 3D-Druckhäusern bleibt aus zahlreichen Gründen fragwürdig, die in diesem Beitrag nicht näher erläutert werden.

- 41 Mario Carpo, *The Alphabet and the Algorithm*, Cambridge, MA. 2011, S. 44–48.
- 42 Matthias Böttger, Stefan Carsten, Ludwig Engel, *Speculations Transformations*, Zürich 2016, S. 107–108.
- 43 Buchli et al., "Digital in situ fabrication" (Anm. 33), S. 67.

