

Meta-Ton

Digitales Gestalten im Spannungsfeld von abstrakter Berechenbarkeit und materialspezifischem Erfahrungswissen

Das digitale Fertigungsverfahren Additive Manufacturing (AM) ermöglicht einen neuen Blick auf etablierte, materialbezogene Gestaltungs- und Entwurfspraktiken. In diesem Beitrag soll die Praxis mit keramischen Massen in der Auseinandersetzung zwischen manuellen und digitalen Methoden untersucht werden. Anhand des Begriffs Meta-Ton¹ wird versucht, das Zusammenspiel von Gestalter,² Werkzeug und Material, beziehungsweise der spezifischen Materialität von Ton in digitalen Prozessen zu beschreiben. Meta-Ton ist ein parametrisches Konstrukt, das Erfahrung und Können des Gestalters mit den Formgebungs- und Darstellungsmöglichkeiten der Software zusammenbringt.

Die Autoren vertreten die These, dass in der additiven Fertigung von extrudierter, plastischer Tonmasse, neben den schwer zu kontrollierenden, physikalischen Qualitäten auch besondere Potentiale für die Fabrikation verborgen sind. Diese betreffen das Zusammenspiel von Form, Fügung und Wirkung, die einer genaueren Betrachtung lohnen. Gerade bei dem handwerklich anspruchsvollen und dynamisch-zeitlich veränderlichen Werkstoff Ton werden Synergien von etablierten und innovativen Verfahren durch ein spezifisches Materialverständnis erwartet. Die rasanten technischen Entwicklungen bedürfen einer theoretischen Verortung, um dem Potential und der Komplexität der Thematik gerecht zu werden. Nicht zuletzt geht es darum, einen Beitrag zur Annäherung von Theorie und Praxis in diesem in weiten Teilen noch unerforschten Themengebiet zu leisten. In dem an der RWTH Aachen University von Dana Saez³ und Christina Klug entwickelten und durchgeführten *Seminar We Clay! Lightweight Structures*,⁴ wurde zu dieser Thematik erprobt, wie additiv gefertigte Bauteile in Keramik unter Berücksichtigung dynamischer Materialeigenschaften durch parametrische Prozessausrichtungen zu neuen Formen der Gestaltung entwickelt werden können.

¹ Der Begriff Meta Ton wurde von Prof. Dr.-Ing. Andrea Osburg (F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar) in einem Forschungsprojekt 2014 verwendet, um die Substitution verschiedener Bestandteile des Tons zu beschreiben. In diesem Beitrag soll die Materialität Ton um eine Metaebene, also eine nicht rein physikalische Eigenschaft erweitert werden. Bekannt ist der Begriff *Meta-Clay* auch aus dem erstmals 1999 veröffentlichten Buch *Animate Form* von Greg Lynn, in dem er den Begriff zur Beschreibung seiner Blob-Architekturen heranzieht.

² Der Begriff Gestalter wird hier für alle Geschlechter verwendet.

³ Dana Saez forscht am Lehrstuhl für Tragkonstruktionen, RWTH Aachen University. In ihrer künstlerischen Forschung untersucht sie das physische und expressive Potenzial verschiedener Materialien (von Textil bis Keramik) und ihre Wechselwirkungen.

⁴ *We Clay! Lightweight Structures* wurde im SS 2019 als kooperatives Seminar von den Lehrinhalten Lehrstuhl für Künstlerischer Gestaltung, RWTH Aachen University, Lehrstuhlleitung Univ. Prof. Dipl.-Ing. T.H. Schmitz und Lehrstuhl für Tragkonstruktionen, RWTH Aachen University, Lehrstuhlleitung Univ. Prof. Dr.-Ing. M. Trautz durchgeführt.

Das Ausgangsmaterial Ton und seine spezifischen Qualitäten

Die Beschreibung der spezifischen Qualitäten des Materials Ton ist notwendig, um den Transfer auf digitalisierte Verfahren anhand dieser Merkmale zu ermöglichen. Ton ist eines der ältesten Baumaterialien in der Architektur⁵. Geschichtlich wird zwischen sogenannter Grobkeramik und Feinkeramik unterschieden. Grobkeramik hat einen höheren Anteil an Schamotte und wird zum Beispiel in Form von gebrannten Ziegeln verwendet. Feinkeramik dagegen wird unter anderem im Bereich der Geschirrerstellung gebraucht⁶. Wichtig in der Handhabung ist die Qualität des Materials in Bezug auf Homogenität sowie plastischer Verarbeitbarkeit. Das Material enthält in seinem formbaren Zustand Wasser und ist nur in dieser Kombination bildsam⁷. Mit der Trocknung verringert sich das Volumen der Masse, und es kommt zur sogenannten Trockenschwindung (ca. 5–7%)⁸. Um aus dem getrockneten Scherben – so nennt man die verarbeitete, ungebrannte oder gebrannte Keramik – ein tragfähiges Baumaterial zu machen, ist es notwendig, die Kristallstruktur des Materials durch einen Brand aufzuschmelzen und so zu einer wasserunlöslichen Verbindung zu sintern⁹.

Das plastische Material wird im additiven Aufbau in Form von Tonwülsten verarbeitet. Zwei aufeinander gepresste Wülste sind ideal dafür geeignet, Lufteinschlüsse zu vermeiden. Lufteinschlüsse können während des Brandes den spröden Werkstoff sprengen¹⁰. Risse entstehen im Scherben beispielsweise, wenn der Trocknungsprozess zu schnell ausgeführt wird. Trocknet die Oberfläche schneller als der restliche Scherbenkörper, schwindet auch das Material ungleichmäßig, und es kommt zu inneren Spannungen. Ist die Beanspruchung größer als die Belastungsgrenze, reißt der Scherben aufgrund seiner Sprödigkeit¹¹. Genauso verhält es sich bei der Verbindung von ungleich dicken Tonelementen. An dem entsprechenden Fügepunkt besteht die akute Gefahr des Trockenbruchs wegen der ungleichmäßigen Trockenschwindung¹². Die Proportion des Materials verrät viel über dessen intrinsische Qualität der Trockenschwindung. Eine Tonwulst, die entlang einer x-Achse angelegt wird, wird aufgrund seiner relativen Größe in x-Achse stärker schwinden als in y-Achse und z-Achse¹³. Auch die Schamottierung der Tonmasse nimmt Einfluss auf die Schwindung. Magere Tone – also solche, die hoch schamottiert sind – verformen sich im plastischen Zustand deutlich weniger als fette Tone – also solche mit weniger Schamotteanteil¹⁴. Die Schamottierung hilft folglich dabei die Masse zu stabilisieren, nimmt aber auch Einfluss auf die Verarbeitbarkeit¹⁵. Eine höhere Schamottierung bewirkt außerdem, dass der Scherben schwerer wird und somit die Gravitation stärker Einfluss nimmt. Größere Objekte neigen dann dazu, sich ohne Stützmaterial im Brennofen zu verformen. Komplexe Plastiken oder Rotationskörper wie Schalen werden wegen der Verformungsgefahr beim Brand häufig mit Stützmaterial aus Eigenmaterial oder sogenannten Bomsen gestützt¹⁶. Stützmaterial aus Eigenmaterial verhält sich im Trocknungsprozess gleich und kann durch eine Trennschicht – zum Beispiel aus Papier – davon abgehalten werden, am plastischen Objekt haften zu bleiben.

5 Hecht 1923: 2.

6 Rada 1989: 7.

7 Hamer 1990: 259.

8 Weiß 1984: 302.

9 Hamer 1990: 51.

10 Weiß 1984: 31.

11 Hamer 1990: 275.

12 Ebd.

13 Reijnders 2016: 134.

14 Hamer 1990: 213.

15 A. a. O.: 379.

16 A. a. O.: 47.

Die beschriebenen Charakteristika und dynamischen Qualitäten kennzeichnen das Material und beeinflussen den Gestaltungsprozess maßgeblich. Dieser Prozess ist in den digitalen Anwendungen jedoch losgelöst von den materiellen Eigenschaften. Die Ton-spezifischen Qualitäten müssen berücksichtigt und gegebenenfalls simuliert werden. Da es zurzeit noch keine Softwarelösungen gibt, die dieses Problem behandeln, ist der Gestalter auf sein Know-how angewiesen.

Der digitale Gestaltungsprozess

Im digitalen Gestaltungsprozess wird ein Objekt in einen grenzenlosen Orbit projiziert. Es ist materiallos und bestimmt sich aus vordefinierten geometrischen Formen und mathematischen Berechnungen. Aus der Kombination von Formeln und deren Anwendung in digitalen Tools kann ein Objekt als spezifische Handlungsanweisung konstruiert werden. Ein Beispiel für eine 3D-Software, die einen solchen Gestaltungsprozess ermöglicht, ist das Programm *Rhinoceros 3D*. In der Version 6 ist die Anwendung *Grasshopper* implementiert. *Grasshopper* ermöglicht es, geometrische Formen zu parametrisieren. Das heißt, dass Formen über spezifische Algorithmen modelliert werden können. Einzelne Parameter lassen sich über eingebaute Slider (Abb. 1) nachjustieren. Damit wird das statische Modell über algorithmische Berechnungen zu einem generativ gestaltbaren Strukturelement.¹⁷ Die Darstellung des Programmierprozesses in *Grasshopper* zeigt, wie sehr das visuelle Feedback in den Hintergrund geraten kann (Abb. 2 und 3). Die Parametrisierung kann jedoch auch ein entscheidender Faktor weg von der Substanzlosigkeit digitaler Anwendungen hin zur Materialgerechtigkeit sein. Denn hier definierte, individuelle Qualitäten können in Form von neuen Regelwerken zu material-spezifischen Designs von der Software interpretiert werden. Solche Parameter und die damit verbundenen Regelwerke werden zurzeit nicht ausreichend berücksichtigt. Das Plugin *Karamba 3D*, das als zusätzliches Berechnungstool in *Grasshopper* installiert werden kann, bietet Rechenlösungen, die für statische Planungen von Modellen eingesetzt werden können. *Karamba* gibt Warnhinweise, wenn Materialeigenschaften zum Versagen des Bauteils führen können. Hier ist allerdings das Material Keramik nicht vordefiniert und die Interpretation der Software beschränkt sich auf eine mathematische Aufstellung. Die visuelle Darstellung spielt für die rein technischen Anwendungen eine untergeordnete Rolle, ist aber im Gestaltungsprozess notwendig und wertvoll, um als Gestalter unmittelbar auf die sichtbaren Ergebnisse reagieren und ästhetische Entscheidungen treffen zu können.

Ästhetische Entscheidungen sind nach Maria E. Reicher sinnesbasiert und verknüpfen Wahrnehmung und spontane Reaktion, haben also immer einen intuitiven, emotionalen Charakter. Sie definiert in der Tradition eines weiten Ästhetikbegriffs diesen als ein komplexes, psychisches Phänomen: „Ein ästhetisches Erlebnis besteht aus einem Wahrnehmungserlebnis und einem Gefühl. Mit anderen Worten: ein ästhetisches Erlebnis enthält immer auch eine emotionale Komponente“¹⁸. Der Neurophysiologe und Hirnforscher

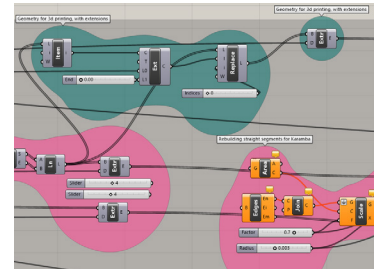


Abb. 1 Detailausschnitt aus der Grasshopper Definition zu triangulärem Stützelement von A. Vinck und G. Boronkay.

17 Vgl. Bohnacker 2019.

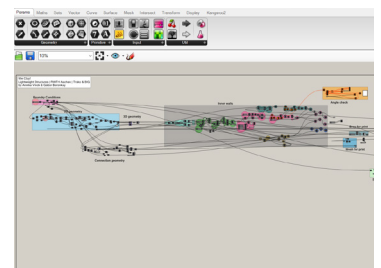


Abb. 2 Ausschnitt aus der Grasshopper Definition.

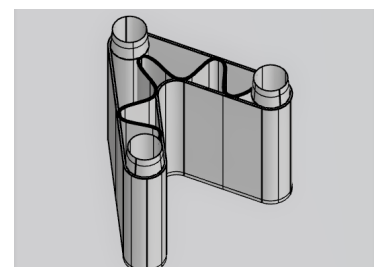


Abb. 3 Visuelles Feedback von Rhino 6 zu der Grasshopper Definition.

18 Reicher 2005: 37.

Wolf Singer sieht in der Ästhetik immer eine Kombination aus Erfahrungswissen und Wahrnehmung:

„Psychophysische und neurobiologische Studien stützen die These, dass Wahrnehmungen das Ergebnis konstruktivistischer Prozesse sind. Das Gehirn nutzt gespeichertes Wissen über die Welt, um aus den Signalen der Sinnesorgane die je wahrscheinlichste Interpretation des Vorgefundenen zu berechnen“ (Singer 2018).

Das keramische 3D-Druckverfahren

Für die Fertigung mit dem 3D-Clay-Printer muss die Objektdatei durch ein sogenanntes Slicing Tool konfiguriert werden. Dazu ist beispielsweise die Software *Cura* geeignet. Das digitale Modell wird in horizontale Layer zerlegt, deren Höhe, die Druckgeschwindigkeit und das nötige Infill (also die Füllstärke der Wandung) programmiert werden. Auch das Slicing Tool liefert keine vordefinierten Einstellungen für den Druck von plastischen Massen beziehungsweise Keramik. Für die Modellierung sowie die Druckeinstellungen wird, wie bereits erwähnt, seitens des Gestalters ein großer Erfahrungshorizont vorausgesetzt und wenige bis keine vordefinierten Hilfestellungen angeboten. Ein Beispiel: Der Entwerfer greift auf seine Erfahrungen zurück, wenn er berücksichtigt, dass eine Tonwulst entlang seiner Extrusionsachse stärker schrumpft. Verwendet der Entwerfer im extrudierten Ton-Druck-Verfahren ein quergestreiftes Infill, würde dieses dafür sorgen, dass sich das Modell in Richtung der definierten Infill-Achse verzieht und der Scherben in dieser Achse stärker schrumpft. Eine ideale Aussteifung im Ton-Druckobjekt entspricht einem Infill aus Kreisen. Da dieses aus geometrischen Gründen nur theoretisch angewandt werden kann, nutzt der Gestalter zur Prozessoptimierung, wenn er ein Infill in seinem Objekt benötigt, die Wabenstruktur beziehungsweise das Grid, die sich als weniger problematisch im Trocknungsprozess erweisen. Im Vergleich zu digitalen Fertigungsverfahren mit anderen Materialien wird deutlich, dass beim Druck von plastischen Massen wie Ton (Abb. 4) ein besonderes Augenmerk daraufgelegt werden muss, wie Material, Form und Technologie aufeinander reagieren. Aufgrund der intrinsischen Qualitäten ist das extrudierte, plastische Modell auch im perfekten, technischen Druckverfahren schwer zu kontrollieren. Ton ist ein ‚atmendes‘ Material, das aufgrund seiner Eigenschaften aber nicht nur Probleme, sondern auch besondere Möglichkeiten bietet.¹⁹

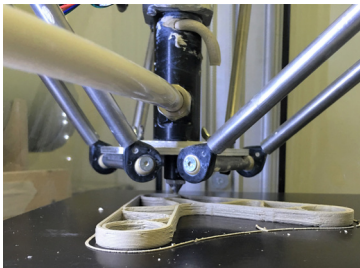


Abb. 4 Fabrikation des Triangulären Stützelements mit dem Delta WASP 2040.

¹⁹ Vgl. Cruz et al 2017: 1.

Die aufgeführten natürlichen Eigenschaften des Materials Ton und ihr Verhalten im digitalen Prozess zeigen, wie komplex und anspruchsvoll die Arbeit für den Gestalter von keramischen Elementen mit digitalen Werkzeugen ist. Vielleicht ist dies auch ein Grund, warum die Entwicklung von Hard- und Software für die Verarbeitung mit extrudierten, plastischen Massen deutlich gegenüber anderen Materialien im Rückstand ist. Obwohl das AM insgesamt eine sich rasant entwickelnde Technologie ist, wie die *Formnext 2019* in Frankfurt offenbart, wird das Verfahren der *Material Extrusion* (ME) als 3D-Druckprozess noch wenig untersucht.

Aktueller Entwicklungsstand

Nach Aussage der Messebetreiber ist die Formnext die „Weltleitmesse für *Additive Manufacturing* und die nächste Generation der intelligenten industriellen Produktion“. 2019 zeigte sie die Bandbreite an hochklassigen Techniken der additiven Fertigung, verschiedene Methoden, Maschinen und Werkstoffe sowie „ihre gesamten vor- und nachgelagerten Prozesse“²⁰. Wenige der vertretenen Hersteller bieten zurzeit Lösungen für den 3D-Druck mit plastischen Massen, wie beispielsweise Ton an. Es zeigt sich folglich: Der Entwicklungsstand ist unausgereift. Einige Beispiele, die in Reallaboren in Kooperation mit der TU Darmstadt unter dem Namen *BE-AM* entstanden sind, beschäftigen sich mit keramischen 3D-Druckverfahren und ihrer Anwendung im architektonischen Zusammenhang. Sie zeigen die Aktualität, welche in dieser neuen Technologie steckt²¹. Das Zusammenspiel von Material, Fertigung und Fügung sowie einer kennzeichnenden Ästhetik wird auf der *Formnext 2019* als Fachmesse für industrielle Fertigung nur nebensächlich thematisiert.

20 Haarbürger 2019.

21 Knaack et al 2019: 36.

Bisher beschäftigen sich überwiegend junge Forscherteams und Künstler(-gruppen) mit den Möglichkeiten des 3D-Drucks von Ton. So zum Beispiel das *European Ceramic Work Center* (EKWC) in Oisterwijk, wo traditionelle und innovative Verfahren der Keramikbearbeitung und -verarbeitung vermittelt und von Experten vor Ort unterstützt werden.²² Ein Forscherteam der Universität von Minho/ Portugal stellte kürzlich auf der *eCAADe/ Sigradi Conference 2019* in Porto erste Ergebnisse zu innovativen Lösungen im Bereich des ME-Verfahrens von Keramik für architektonische Bauelemente vor. Die Forschergruppe arbeitet an architektonischen Stützelementen, die sich an biomorphen Strukturen orientieren. In einem mehrstufigen Prozess aus Erprobung und Optimierung wurden erste Modelle erstellt und analysiert²³.

22 Vgl. Eyl 2019/6: 32.

23 Moreira et al 2019: 471.

Der Künstler Jonathan Keep sucht unter anderem mit seinem *Objekt Iceberg* von 2012 die ästhetischen Potentiale des AM-Verfahrens und auch das *Design Studio Unfold* um den Künstler Tim Knapen (u.a. die Arbeit *Potje*, 2009) beschäftigt sich mit der Frage, wie Ästhetik und digitale Fertigungstechniken zu vereinen sind. Der britische Wissenschaftler Stephen Hoskins beschreibt die digitale Fertigung als Dilemma im Gestaltungsprozess:

„Is there a craft of ‚the digital‘? And secondly, how do we reconcile the craftsperson’s tacit understanding of materials, with a process that removes the union of hand and eye normally associated with a craftsperson using a tool? Is this tacit understanding of materials, only gained by the acquisition of knowledge through practice, that is essential to the creation of any good quality artifact to which we might ascribe a high level of skill?“ (Hoskins 2013, S. 5)

Für Ihn steht die (implizite) Erfahrung und das gestalterische sowie handwerkliche Verständnis ‚vor‘ dem digitalen Prozess. Es muss aber aus Sicht der Autoren davon ausgegangen werden, dass in naher Zukunft eine digitale Entwurfs- und Gestaltungspraxis sowohl in der Ausbildung als auch im Berufs-

alltag von Architekten und Designern die Regel sein wird. Weiter beschreibt Hoskins das Problem der Entmaterialisierung als ein zweifaches:

“It presents not only a physical disconnect between the maker and the object, but also has the added disadvantage that this physical disconnect is mediated yet further through the digitalisation process. By this I mean one first draws a virtual representation on screen, which is the first disconnect, then one sends this virtual object to the printer, where there is also a physical disconnect between the creator to the object’s manufacture. Making the object twice-removed from its creator” (Hoskins 2013, S. 57).

Diese objektbezogene Wahrnehmung des Formprozesses ist für den Architekten in der Regel nur bedingt neu, da er es gewohnt ist, den Fertigungsprozess aus der Hand zu geben. Die Auseinandersetzung mit den spezifischen Materialitäten ist jedoch auch dem planenden Architekten ein besonderes Anliegen. In der Umsetzung werden oftmals Materialproben an Ort und Stelle zur Anschauung angebracht, um in letzter Instanz konkrete Entscheidungen treffen zu können.

We Clay! Lightweight Structures

Der Untersuchungsgegenstand ist schwer zu greifen, da es immer wieder notwendig ist technische – die Funktionalität betreffende – mit ästhetischen – also die Sinneswahrnehmungen betreffenden – Aspekten in Einklang zu bringen und dabei die Materialität in digitalen Prozessen nicht aus den Augen zu verlieren.

In dem Seminar *We Clay! Lightweight Structures* aus dem Sommersemester 2019 mit Masterstudierenden der Fakultät für Architektur/RWTH Aachen University wurden modulare Stützelemente in Keramik entwickelt, die ausschließlich additiv gefertigt werden konnten. Hier sollte das Zusammenspiel von aktueller Technologie sowie den Bedürfnissen des Gestalters im Entwicklungsprozess erprobt werden. Dazu wurden von teilnehmenden Studierenden unter fachkundiger Anleitung zunächst manuelle Handstücke – also Vormodelle – erstellt (Abb. 5), die den Einstieg in das Themenfeld und den Formfindungsprozess initiierten, aber gleichzeitig als Referenz für den digitalisierten Prozess dienten. Nach einer Einführung in *Grasshopper* wurden entsprechende digitale Modelle entworfen und durch wiederholte Optimierungen angepasst. In der Fabrikationsphase wurden die entstandenen digitalen Modelle anschließend nach dem ME-Verfahren in Ton gedruckt. Der verwendete 3D-Clay-Printer *Delta WASP 2040* ist in der Lage, Abmessungen von 20x20 cm Länge und 40 cm Höhe zu drucken. Aufgrund der maximalen Druckgröße wurden die Modelle im Maßstab 1:2 gefertigt. Die Druckerdüse – also der Nozzle hatte 1 mm Durchmesser. Aufgrund der Technik verwendeten die Seminarteilnehmenden speziell für den 3D-Druck entwickelte Feinkeramik. Die Technologie des *Delta WASPs* basiert auf dem Delta-spezifischen Drei-Doppelpleuelstangen-System welches auch für klassische Fi-



Abb. 5 Manuelles Handstück zu Vorentwurf
Trianguläres Stützelement.

lamentdruckverfahren eingesetzt wird. Das System ist folglich in der Lage, sehr feine Strukturen zu fertigen. Zudem müssen bei dem Druckprozess die Tonwülste stärker ‚ineinander‘ gedruckt als ‚aufeinandergeschichtet‘ werden, was wie wir später sehen werden, Einfluss auf das Druckobjekt nimmt.

Die in dem Seminar entstandenen Objekte wurden mit den Studierenden beschrieben, intensiv diskutiert und mit den manuellen Handstücken verglichen. Die Erfahrungen der Studierenden und die von den Autoren anschließende Analyse der Ergebnisse ermöglichen einen Abgleich mit dem aktuellen Forschungsstand, lassen aber aufgrund der geringen Anzahl noch keine Ableitung von Regelmäßigkeiten zu. Sie liefern lediglich wertvolle qualitative Hinweise, die die Theoriebildung unterstützen sollen. Der Geisteswissenschaftler Philip Mayring schreibt hierzu:

„Nicht der Test vorgefertigter Hypothesen, sondern das Aufdecken von Strukturen im Gegenstand steht im Vordergrund. Dazu wird [...] in den Untersuchungsgegenstand eingegriffen. Man verändert also den Gegenstand, überprüft, was dann passiert, und hofft darauf, dass man dadurch Einblicke in seine Struktur erhält“ (Mayring 2002: 59).

Der explorative Charakter dieser Untersuchung ermöglicht in einem in weiten Teilen noch unerforschten Gebiet die Thesenbildung zu überprüfen und im Wechselspiel von Theorie und Empirie zu schärfen.

Wie die nachfolgenden Beispiele aus dem Seminar zeigen, verbleibt der Keramik in weiten Teilen ihre Ausstrahlung als organisch-weiches, naturnahes Material, dass durch den digitalen Prozess an Präzision und Kontinuität gewinnt. Die Untersuchung orientiert sich an einer Fallstudie, die bei Cohen et al. als spezifisches Beispiel verstanden wird, das häufig dazu dient, ein allgemeineres Prinzip zu veranschaulichen.²⁴ Die unterschiedlichen Entwürfe entsprechen den Fällen, die in dieser Studie zusammengefasst werden.

Fallstudie und Auswertung

1. Entwurf: Trianguläres Stützelement

Anhand des von den Studierenden A. Vinck und G. Boronkay entwickelten Stützelements werden spezifische Phänomene des 3D-Drucks von Ton sichtbar. Für das trianguläre Stützmodul (Abb. 6) wurde eine Ausfachung vorgesehen, welche die umschließende Außenwand stützen und eine Verbindung zu den außen liegenden Oberflächen herstellen sollte. Das Modell wurde in Hinblick auf effizienten Einsatz von Material optimiert. Dazu wurde die Ausfachung mitmodelliert und soweit vereinfacht, dass aus einem ‚gezackten‘ Infill eine fließend gekurvte und damit leicht druckbare Membran entstand. Die Ausfachung beeinflusst jedoch auch auf ungewollte Weise das Bauteil. An Stellen, an denen die Ausfachung fehlt, hängt die außen liegende Oberfläche nach innen durch (Abb. 7). Das hat mit der Trocknung und dem damit verbundenen Schrumpfungsprozess zu tun. Auch die Tatsache, dass die Innenaussteifung quasi mit der Außenwandung verwoben ist (die Layer der Außenwand

²⁴ Originalzitat von Louis Cohen (2011). In: Research Methods in Education: "A Case study is a specific instance that is frequently designed to illustrate a more general principle" (Cohen 2011: 289).

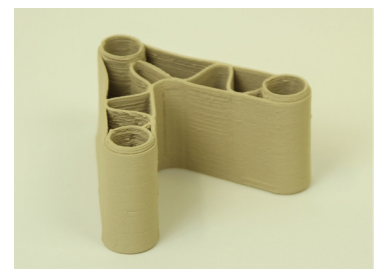


Abb. 6 Finale 3D Keramikstruktur zum Triangulären Stützelement.

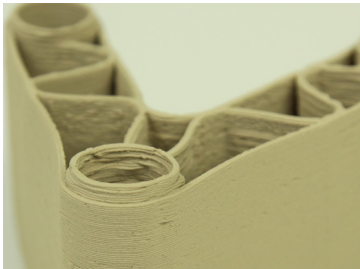


Abb. 7 Detail 3D Keramikstruktur zum Triangulären Stützelement.



Abb. 8 3D Keramikstruktur zu Gefaltetem Stützelement von I. Grahle und J. Schneider.

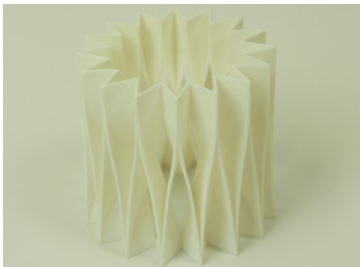


Abb. 9 3D (PLA) Filamentdruck zu Gefaltetem Stützelement.



Abb. 10 Detail 3D Keramikstruktur zu Wabenförmigem Stützelement von T. Wilkes und M. Palmén.

und die Layer der Innenausfachung liegen abwechselnd übereinander) und nicht nur anliegend sind, wird das ‚nach Innen ziehen‘ des Scherbens während des Trocknungsprozesses begünstigt (Abb. 7). Der Einfall der Wandung muss in diesem Fall nach Innen stattfinden, da die Schrumpfung immer zu dem relativen Mittelpunkt des Objekts verläuft, aber auch relativ mit der Länge, Höhe und Wandungsdicke zusammenhängt. In unserem spezifischen Druckverfahren des ‚ineinander‘ Druckens von Tonwülsten spielt auch die Materialkompression also die Höhenauswirkung – das Objekt ist etwas flacher im Vergleich zum modellierten Objekt – und die damit verbundene Schrumpfung in y-Achse eine nicht unerhebliche Rolle. An den drei Ecken der Struktur wurde jeweils ein röhrenförmiges Steckelement eingeplant, durch welches die einzelnen Module später passgenau zusammensetzbar sein sollen. Hier wurden die röhrenförmigen Stützelemente allerdings nicht als Teil der außenliegenden Oberfläche des Bauelements modelliert, sondern als separate Steckelemente hinzugezeichnet. Dadurch berühren sich die Außenlinien des Moduls – also das Surface – und die Drucklinie der Röhre als nebeneinander liegende Doppellinie (Abb. 7). Wie bereits in dem Abschnitt über die spezifischen Qualitäten des Materials beschrieben, besteht bei einer Verbindung von ungleich dicken Tonelementen die akute Gefahr des Trockenbruchs wegen der ungleichmäßigen Trockenschwindung. Warum ist hier kein Riss entstanden? Das hat unter anderem mit der Geometrie des Bauteils zu tun. Die gekurvte Linie und die Röhrenlinie ‚öffnen‘ sich in den Innenraum der Struktur hinein. Dadurch wird strukturell einer Sprengwirkung entgegengewirkt. Bei der Betrachtung der äußeren Oberfläche des Bauteils wird deutlich, dass an dieser Stelle die Wandung eine nach Innen spitz zulaufende Kerblinie erzeugt hat, sodass die gewirkten Kräfte sichtbar werden (Abb. 7). Grundsätzlich hätte es aber zu einem Aufreißen nach innen kommen können. Sicherlich hat auch der verkleinerte Maßstab hier die ‚Gefahr‘ minimiert, denn es wird lediglich von etwas mehr als einem Millimeter Materialunterschied gesprochen.

2. Entwurf: Gefaltetes Stützelement

In einem Detailausschnitt des Entwurfs von I. Grahle und J. Schneider wird deutlich, dass kurze Wandungen, die wenig bis gar nicht in der Geometrie des Modells abgestützt werden, durch den Druckverlauf des Nozzles solange hin- und her geschoben werden, bis Druckpfad und Objekt nicht mehr aufeinandertreffen. Die Geometrie des Modells war folglich im 3D-Clay-Print nicht bis zu Ende druckbar (Abb. 8). Ein gleichzeitig ausgeführter Testdruck mit Kunststoff filament (PLA) hingegen, war problemlos möglich (Abb. 9).

3. Entwurf: Wabenförmiges Stützelement

In dem Detailausschnitt des Entwurfs von T. Wilkes und M. Palmén sieht man, dass kurze Wandabschnitte ihres Stützelements durch das Vor- und Zurückfahren des Nozzles an den Enden hochgezogen wurden (Abb. 10). Die hochgezogenen Enden der Struktur verleihen dieser einen durch den Druckprozess bedingten Ausdruck, der positiv als Arbeitsspur gelesen werden kann.

4. Entwurf: Stabförmiges Stützelement

Mit den Druckproben der Teilnehmer V. Genchev und F. Xue zu ihrem stabförmigen Stützelement wird deutlich, dass kreisrunde Drucklinien ohne Infill aufgrund der benötigten Haftfläche erst ab einem bestimmten Durchmesser druckbar werden. Bei der verwendeten 1 mm Düse betrug dieser Durchmesser ungefähr 1 cm. Kreisdurchmesser < 1 cm werden durch das Eintauchen des Nozzles in die zuvor gedruckte weiche Tonmasse so weit verschoben, dass keine Verbindung zu der nächsten Druckwulst mehr hergestellt werden kann und als Ergebnis lediglich ‚hütchenförmige‘ Abbrüche entstehen (Abb. 11).

5. Alle genannten Stützenentwürfe betreffend

Bei dem verwendeten Druckverfahren mit extrudierter, plastischer Tonmasse muss die Bodenplatte glatt sein, damit die gedruckte Tonwulst durch Adhäsion daran haften kann und sich der Druck nicht verschiebt. Durch das Anhaften entsteht allerdings beim Trocknen der 3D-Druck-Objekte eine zusätzliche Verformung. Die gedruckten Stützmodule laufen von der Bodenplatte ausgehend nach oben hin zunächst stärker, dann immer schwächer konisch zu. Von unten wird das 3D-Druck-Objekt durch die Druckplatte länger feucht gehalten und kann nicht so schnell trocknen und folglich schrumpfen, so wie es der obere Teil der Struktur kann. Durch die verlangsamte Trocknung an der Bodenplatte und dem gleichzeitig auftretenden Adhäsionsphänomen werden die Tonminerale so lange auseinander gehalten, bis sie schlussendlich in der festgesetzten Geometrie erstarren. Zu vermuten ist, dass die 3D-Druck-Struktur am Boden des Stützmoduls deswegen offenerporiger und weniger druckfest ist als die übrige Struktur. Dies ist allerdings bei Druck-Belastungstest noch zu untersuchen.

Zusammenfassung und Potenziale der Fallstudie

Folgende Beobachtungen wurden bei der *ME* von 3D-Clay-Prints dokumentiert: Die Plastizität der druckbaren Masse sorgt ab bestimmten Modell-Proportionen für Verformungen. So zum Beispiel entsteht bei einer bestimmten Wandungshöhe und Länge ein Durchhang der Wandung zum relativen Objektmittelpunkt. Der Schrumpfungsprozess sorgt des Weiteren dafür, dass vor allem flächige Objekte (hier nicht weiter behandelt) durch die starke Adhäsion an der Druckplatte während des Trocknens reißen. Festzustellen sind Verformungen aufgrund von doppelten Materialstärken durch innere Spannungen. Auch das verwendete Druckverfahren nimmt in besonderem Maße Einfluss auf die Ergebnisse, indem zum Beispiel der Nozzle durch das Streifen des weichen 3D-Clay-Prints das Material in Richtung des definierten Druckpfades verschiebt. Wegen der Plastizität des Tons verringert sich die Stabilität des 3D-Drucks mit fortschreitendem Druckerfolg immer weiter. Die Druckgeschwindigkeit nimmt ebenfalls Einfluss auf den 3D-Druck und kann bei extremen Druckgeschwindigkeiten von zylindrischen Formen zu einer toridierten Oberfläche führen (hier nicht weiter behandelt). Aufgrund der Form der Druckwülste, bieten sich für den Druck besonders gekrümmte Linien und weniger kantige Formpfade an. Sternförmige Druckpfade werden zum Bei-

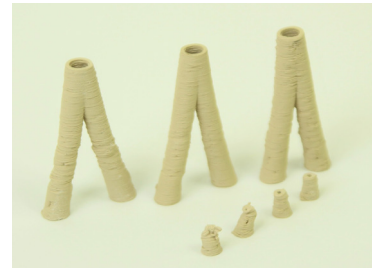


Abb. 11 Detail 3D Keramikstruktur zu Stabförmigem Stützelement von V. Genchev und F. Xue

spiel von der Druckmasse abgerundet (vgl. 2. Entwurf: Gefaltetes Stützelement). Von den Studierenden wurde angestrebt, die dargestellten Qualitäten des 3D-Clay-Prints beim Entwurf in das digitale 3D-Modell zu berücksichtigen. Nicht immer ist dies gelungen und so haben einzelne Beispiele gezeigt, wie hoch der Bedarf an Lösungen für die Transferleistung ist.

Die in der Fallstudie beschriebenen Phänomene sind der manuellen Tonverarbeitung teilweise nicht neu und werden hier in verschiedenen Verfahren bewusst eingesetzt. Denken wir nur an das Verfahren des Aufdrehens von Ton auf der Töpferscheibe. Dieser handwerkliche Prozess ist alleine durch die des Materials Ton intrinsischen Qualitäten von Kohäsion und Adhäsion möglich. In den digitalen Methoden und der additiven Fertigung sind die dargestellten Möglichkeiten und Potenziale noch nicht ausgeschöpft.

Weiterführende Studien könnten sich mit folgenden, hieran anschließenden Fragen beschäftigen: Wie können durch den bewussten Umgang mit den beschriebenen Verformungsprozessen neue Gestaltungsformen entwickelt werden? Wie können durch die beschriebenen physischen Materialveränderungen neue Bauteilsysteme, wie zum Beispiel technische Verbindungen, entwickelt werden? Wie können zum Beispiel durch Materialaufdopplungen neben einfachen Wandstärken bewusst Sollbruchstellen eingeplant werden? Können die beobachteten physikalischen Prozesse wie Adhäsion, Kohäsion und der Einfluss der 3D-Druck-Technik die Materialfestigkeit und damit die Bauteileffizienz beeinflussen? Können durch gezielte Modellierungen von Lochungen, Modell-Geometrien und -Proportionen im digitalen Entwurfsprozess Trocknungsgeschwindigkeiten innerhalb des Scherbens variiert und damit geplante Verformungen hervorgerufen werden? Und nicht zuletzt: Wie können Gestalter den intrinsischen Eigenschaften des Materials Ton entsprechende Oberflächen generieren?

Kritische Reflexion und Ausblick

In zukünftigen Studien gilt es, die Potenziale der parametrischen Programmierung in ihrem kreativen Gestaltungsspielraum weiter auszuschöpfen. Gerade die aktuelle Hardware und neue Softwareanwendungen im Bereich der generativen Gestaltung erscheinen vielversprechend für dieses Anliegen. Die Autoren wollen mit dem vorliegenden Artikel einen Beitrag dazu leisten, dass nicht ausschließlich die Industrie Möglichkeiten der Technik definiert. Es gilt, individuelle Materialmerkmale auszuloten, die in Zukunft weiter oder stärker berücksichtigt werden müssen und damit Gestalter und Gestaltungsgegenstand in ihrer Gesamtheit miteinbeziehen. Gerade planende Architekten stehen in der Verantwortung, sich mit einem ästhetischen, konstruktiven Interesse einer aktuellen und zukünftig nachhaltig gebauten Umwelt zuzuwenden. Dabei können keramische Bauteile mit ihren vielfältigen Möglichkeiten der Gestaltung in Form und Oberfläche eine zunehmende Bedeutung bekommen. Nicht zuletzt hat die Technologie einen großen Einfluss auf unsere gebaute Umwelt. In der industriellen Forschung im Bereich der additiven Fertigung von extrudierter, plastischer Tonmasse ist unter anderem das

italienische Unternehmen *WASP* führend. Nicht nur im Bereich nachhaltiger Designprodukte, sondern auch in der Bauindustrie hat sich das Unternehmen etabliert. 2018 druckten sie mit ihrem neuen *Crane WASP* ihr erstes nachhaltiges Lehmhaus²⁵. Nach Eigenaussage ist es ihr Ziel, in Zukunft ressourcenschonende Häuser zu produzieren, die aus Materialien wie Lehm und Abfallprodukten der Reisaufbereitung direkt vor Ort hergestellt werden können. Es wird von dem Unternehmen an Konzepten gearbeitet, wie Nutzer in der Lage sein werden, 3D-Modelle am Computer individuell zusammenzustellen und dann vor Ort an beliebiger Stelle selbst ausdrucken zu können. In diesem Moment wird aus der Vision WASPs auch eine ästhetische Herausforderung, die kritisch hinterfragt und überprüft werden muss. Starter-Kits und Tutorials der Technologie werden Open Source vertrieben, sodass für die breite Masse der Einstieg in die Welt des 3D-Drucks erleichtert wird. Gestaltungsfragen bleiben allerdings weitestgehend ungeklärt und richten sich derzeit lediglich an technischen Prozessen aus.

25 Zaganelli 2020, Abfragedatum 13.02.2020.

Meta-Ton

Der Umgang mit Ton im Bereich des AM stellt in der Umsetzung in digitale Modelle aufgrund seiner auf vielfältige Weise in Erscheinung tretenden dynamischen Eigenschaften eine Herausforderung dar. Bisher wird in der aktuellen Diskussion viel über den Gebrauch digitaler Werkzeuge gesprochen. Für die geeignete Verwendung dieser Werkzeuge bedarf es, wie bei der manuellen Handhabung, eines breiten Erfahrungshorizontes in praktischen Formgebungsmethoden und -verfahren.

Die Vorstellung, die Technik könne das Wissen über die Materialität selbst ausschöpfen, ist bisher lediglich eine Vision. Verformungen, Trocknungs- und Schwindungsrisse sowie materialspezifisches Setzungsverhalten bleiben dem realen Material vorbehalten und werden weder durch ein visuelles Feedback der Software, noch durch mathematische Kalkulationen sichtbar gemacht. Auch fehlen in der digitalen Umgebung Rückmeldungen zu notwendigen Proportionierungen und geometrischen Einschränkungen. Software und Maschine verstehen nicht nur das zu druckende Material nicht, sie reagieren auch nicht aufeinander, es gibt keine Rückkopplung. Denken wir nur an die hier vorgestellten Entwürfe der Studierenden, deren Ergebnisse teilweise bis gar nicht den angestrebten Modellierungen entsprechen. Hier braucht es zum einen den wissenden Umgang mit der Wirkungsmacht der verschiedenen Werkzeuge, wie ihn Carolin Stapenhorst von der Fachhochschule Erfurt beschreibt: „Die digitalen Werkzeuge können in diesen Bereichen einschränkend und verarmend wirken, sie können aber ebenso gut als Möglichkeitsraum voller Potentiale ausgeschöpft werden. Es braucht hier – wie so oft – einen wissenden Umgang“²⁶, zum anderen braucht es ein neues Materialverständnis, welches die Autoren so darstellen möchten: Meta-Ton ist die Beschreibung von tonbezogenen Materialeigenschaften und ihrer Darstellung bei digitalen Gestaltungsmethoden. Der Begriff beinhaltet funktionale sowie ästhetische Aspekte und entwickelt sich mit einem voranschreitenden

26 Stapenhorst 2017/18: 62.

Technologiestand. Damit soll zum Ausdruck gebracht werden, dass die wissenschaftliche Untersuchung einer Materialität in digitalen Prozessen auch in Zukunft in kritisch-reflektierter Art und Weise weitergeführt werden muss.

Diese Studie zeigt, dass digitales Gestalten – also die abstrakte Berechenbarkeit in Prozessen der Formgebung – immer auch einer ästhetischen Entscheidung durch den Gestalter folgen muss. Dies gilt es weiterhin empirisch zu überprüfen. Der Gestalter benötigt ein spezifisches Verständnis für die (veränderliche) Materialität Ton im digitalisierten Fertigungsprozess und muss mit dem Fehlen eines implementierten materialspezifischen Know-hows – also gleichsam einer Substanzlosigkeit des Materials – im Arbeitsprozess umgehen.

Autoren

Christina Klug studierte Architektur an der RWTH Aachen University und ist seit März 2019 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Künstlerische Gestaltung. Seitdem erforscht sie manuelle und digitale Fertigungsmethoden im Bereich Keramik. In ihrer laufenden Promotion beschäftigt sie sich mit Verformungsprozessen und deren Steuerung beim *Liquid Deposition Modeling* (LDM) von keramischen Massen.

Joost Meyer studierte Bildhauerei und Objekt Design in Aachen. Begleitet wurde dieses Studium von längeren Arbeitsaufenthalten u.a. in Harare, Simbabwe. Anschließend arbeitete er für 10 Jahre als Art Director in einem Aachener Designbüro. Von 2011 bis 2019 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Künstlerische Gestaltung (ehemals Plastische Gestaltung) der RWTH Aachen University, hier verknüpfte er seinen künstlerischen Hintergrund mit wissenschaftlichen Fragestellungen. Ende 2019 reichte er an der Fakultät für Architektur sein Promotionsgesuch mit dem Thema „Modellieren im Spannungsfeld manueller und digitaler Methoden. Vergleichende Untersuchung am Beispiel ‚Digital Me‘, einer Selbstportrait-Studie in der Plastischen Gestaltungslehre“ ein.

Quellen

Bohnacker, Hartmut / Groß, Benedikt / Laub Julia / Lazzeroni, Claudius (2019): Generative Gestaltung. Entwerfen, Programmieren, Visualisieren mit Processing. In: Karin und Bertram Schmidt-Friderichs. <http://www.generative-gestaltung.de> (Abfragedatum 29.11.2019).

Cohen, Louis (2011): Case studies. In: Cohen, Louis / Manion, Lawrence / Morrison Keith: *Research Methods in Education*. New York, S. 289–302.

Cruz, Paulo J.S. / Knaack, Ulrich / Figueiredo, Bruno / de Witte, Dennis (2017): Ceramic 3D printing. The future of brick architecture. In: *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017*. Interfaces: architecture.engineering.science 25 – 28th September 2017, Hamburg, S. 1–10

Eyl, Elisabeth (2019): Falling in love with clay. In: *Neue Keramik*. Das Europäische Kunstmagazin. Ausgabe 6/19, S. 32–35.

Haarburger, Petra und Roschkowski, Martin (2019): Formnext. Die Weltleitmesse für Additive Manufacturing und die nächste Generation der intelligenten industriellen Produktion. In: Mesago Messe Frankfurt GmbH. <https://formnext.mesago.com/events/de.html> (Abfragedatum 27.11.2019).

Hamer, Frank und Hamer Janet (1990): Lexikon der Keramik und Töpferei. Augsburg.

Hecht, Hermann (1923): Lehrbuch der Keramik. Eine Darstellung der keramischen Erzeugnisse in ihrem technischen Aufbau. Berlin.

Hoskins, Stephen (2013): 3D-printing for artists, designers and makers. London.

Knaack, Ulrich/Tessmann, Oliver/Wibranek, Bastian (2019): BE-AM | Built Environment Additive Manufacturing 2019. In: https://beam1photo.files.wordpress.com/2019/11/be_am_2019-digital-komprimiert.pdf (Abfragedatum 29.11.2019).

Mayring, Philipp (2002): Einführung in die qualitative Sozialforschung. Eine Anleitung zu qualitativem Denken. Weinheim/Basel.

Moreira, João/Figueiredo, Bruno/vCruz, Paulo (2019): Ceramic Additive Manufacturing in Architecture. Computational Methodology for Defining a Column System. In: Additive Manufacturing. Volume 1, Proceedings eCAADe 37/ Sigradi 23, S. 471–476.

Rada, Pravoslav (1989): Die Technik der Keramik. Handbuch der Arbeitsvorgänge der Keramik. Hanau.

Reicher, Maria E. (2005): Einführung in die philosophische Ästhetik. Darmstadt.

Reijnders, Anton (2016): The Ceramic Process. A manual and source of inspiration for ceramic art and design. Oisterwijk.

Singer, Wolf (2018): Warum erschafft das Gehirn Kunstwerke? In: Ludolph, Albert. <https://www.dasgehirn.info/entdecken/grosse-fragen/erst-kommt-das-denken-dann-die-kunst> (Abfragedatum 28.06.2018).

Stapenhorst, Carolin (2017/18): Werkzeuge und ihre Wirkungsmacht. In: Werkbund Akademiereihe. Jahrgang 19/20, Heft 2017/2018.

Weiß, Gustav (1984): Keramik Lexikon. Praktisches Wissen griffbereit. Darmstadt.

Zaganelli, Viale (2020): The 3d printed house Gaia. In: WASP. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/> (Abfragedatum 13.02.2020).

Abbildungen

Abb. 1, 2, 3 Klug, Christina (2019): Screenshots Rhino 6 / Grasshopper – Trianguläres Stützelement von A. Vinck und G. Boronkay.

Abb. 4 Vinck, Annika (2019): Druckprozess Delta WASP (Bildrechte mit Abgabe erhalten).

Abb. 5–11 Meyer, Joost (2019): Fotografien.

Zitiervorschlag

Christina Klug und Joost Meyer

Meta-Ton. Digitales Gestalten im Spannungsfeld von abstrakter Berechenbarkeit und materialspezifischem Erfahrungswissen.

In: Wolkenkuckucksheim | Cloud-Cuckoo-Land | Воздушный замок, International Journal of Architectural Theory (ISSN 1434-0984), vol. 25, no. 40, *Media Practices of Architectural Design*, 2021, pp. 125–139.