

Interaktionskonzepte für Personal Fabrication Geräte¹

Stefanie Mueller²

Abstract: Während ein 3D Drucker im Jahr 2007 noch 15.000 Euro kostete, kosten 3D Drucker heute im Schnitt nur noch 500 Euro. Auf diesem Preislevel sind die Geräte so erschwinglich, dass eine Zukunft in der jeder selbst Objekte produzieren kann in greifbare Nähe rückt. In meiner Dissertation untersuche ich die Fragestellung: Nun da die Hardware verfügbar ist, wie muss die Mensch-Maschine Interaktion gestaltet werden, damit jeder eigene Objekte erstellen kann? Um diese Frage zu beantworten, stelle ich in eine Analogie zu Personal Computing her. In der Geschichte von Personal Computing trug eine verkürzte Rücklaufzeit zwischen Benutzereingabe und Systemausgabe so stark zur Vereinfachung der Interaktion bei, dass heutzutage jeder einen Computer bedienen kann. In meiner Dissertation zeige ich, wie die gleiche Entwicklung auf 3D Drucker angewendet werden kann mit dem Ziel, dass in Zukunft nicht nur jeder einen Personal Computer zuhause hat sondern auch ein Personal Fabrication Gerät.

1 Einführung

Personal Fabrication Geräte, wie zum Beispiel 3D Drucker, weisen in eine Zukunft, in der jeder selbst zuhause eigene Objekte herstellen kann. Während ein durchschnittlicher 3D Drucker im Jahr 2007 noch 15.000 Euro kostete, kosten 3D Drucker heute im Schnitt nur noch 500 Euro (Abbildung 1b). Auf diesem Preislevel sind die Geräte so erschwinglich für Endkonsumenten, dass eine Zukunft in der jeder selbst zuhause eigene Objekte produziert in greifbare Nähe rückt. In meiner Dissertation untersuche ich die Fragestellung: Nun da die Hardware verfügbar ist, wie muss die Mensch-Maschine Interaktion gestaltet werden, damit jeder mit diesen Geräten eigene Objekte erstellen kann?

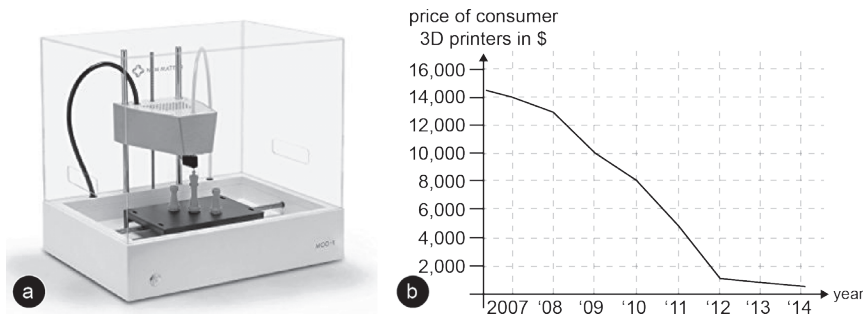


Abb. 1: (a) Preisgünstiger 3D Drucker für Endkonsumenten (New Matter, 300 Euro). (b) Sinkende Kosten für 3D Drucker machen die Hardware nun für jedermann verfügbar.

¹ Englischer Titel der Dissertation: 'Interacting with Personal Fabrication Devices'

² Stefanie Mueller, Massachusetts Institute of Technology (MIT), stefanie.mueller@mit.edu

1.1 Analogie: Personal Fabrication und Personal Computing

Um diese Frage zu beantworten, stelle ich in meiner Dissertation eine Analogie zur Geschichte des Personal Computing her.

Als Computer in den 60er Jahren langsam Verbreitung fanden, war die Rücklaufzeit zwischen Benutzereingabe und Maschinenausgabe sehr lang: Nachdem Benutzer eine Eingabe mittels einer Lochkarte erstellt hatten, mussten Benutzer bis zum nächsten Morgen warten um zu sehen, ob die Eingabe korrekt oder fehlerhaft war. War ein Fehler in der Eingabe, mussten Benutzer eine weitere Nacht warten. Gegebenfalls zog sich so die Erstellung einer funktionierenden Lösung über mehrere Tage oder gar Wochen hin. Da die Rücklaufzeit so lang war konnten Computer nur von Experten bedient werden, welche genug Erfahrung mitbrachten um Fehler von Anfang an zu vermeiden.

In genau der gleichen Art und Weise bedienen wir heutzutage 3D Drucker (Abbildung 2): Nachdem Benutzer eine Eingabe mittels eines 3D Models erstellt haben, müssen Benutzer bis zum nächsten Morgen warten um zu sehen, ob das Objekt, das der 3D Drucker über Nacht gedruckt hat, funktioniert oder fehlerhaft ist. Haben Benutzer bei der Erstellung des Objektes einen Fehler gemacht, müssen Benutzer erneut eine Nacht warten. Genau wie bei Computern früher verursacht die lange Rücklaufzeit zwischen Benutzereingabe und Maschinenausgabe, dass derzeit nur Experten mit jahrelangem Training 3D Drucker erfolgreich benutzen können.

Wenn wir uns jedoch die Entwicklung des Computers ansehen, sind wir heute an einem Punkt, an dem jeder einen Computer benutzen kann. Was hat sich seit den ersten Tagen des Computers geändert, das diese Zukunft ermöglicht hat?

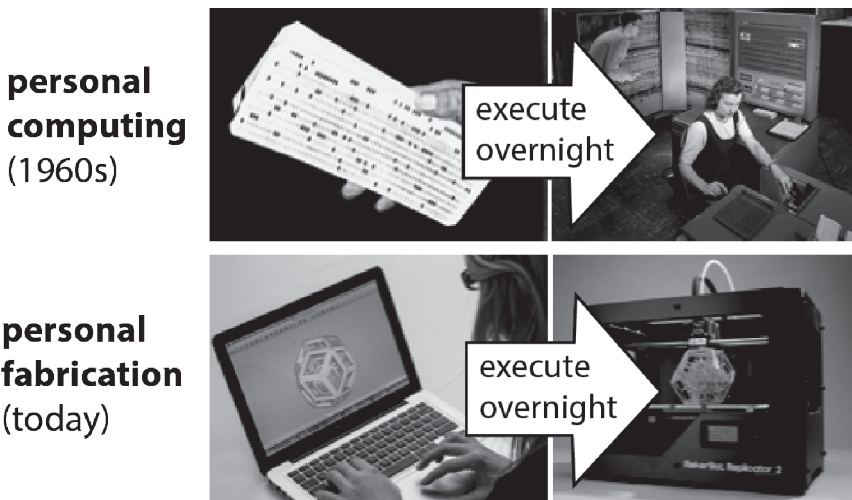


Abb. 2: Mit Personal Fabrication Geräten sind wir heute an dem Punkt, wo wir mit Personal Computern in den 60ern waren. Die Rücklaufzeit zwischen Benutzereingabe und Maschinenausgabe ist derart lang, dass 3D Drucker nur von Experten benutzt werden können, die genug Erfahrung mitbringen um Fehler von Anfang an zu vermeiden.

1.2 Schnellere Rücklaufzeiten zwischen Eingabe und Ausgabe

In den letzten Jahrzehnten wurden die Rücklaufzeiten zwischen Benutzereingabe und Maschinenausgabe immer kürzer (Abbildung 3):

In der ersten Phase, wie oben beschrieben, wurde eine Maschinenausgabe nur **ganz am Ende** produziert. Das heißt, Benutzer mussten zuerst die komplette Schrittfolge definieren (z.B. in Form einer Lochkarte), bevor Benutzer das Programm testen konnten.

In der zweiten Phase wurde eine Maschinenausgabe nicht erst am Ende, sondern bereits **nach jeder einzelnen Benutzereingabe** generiert (z.B. ein einzelnes Kommando in der Kommandozeile). Dieser schnelle Rücklaufzyklus vereinfachte die Interaktion wesentlich, da Benutzer nun schnell ausprobieren und bei potentiellen Fehlern gegensteuern konnten.

In der dritten Phase, heutzutage, wird die Maschinenausgabe **in Echtzeit** produziert: Während Benutzer mit den Fingern auf einem Touchscreen Bilder hin und her verschieben bewegen sich die Bilder unter den Fingern in Echtzeit mit. Es gibt keine zeitliche Verzögerung mehr. Benutzer können sehr schnell ausprobieren, welche Lösung sich am besten eignet, ohne dass sich das Ausprobieren einer Option über einen ganzen Tag hinzieht.

Rücklaufzeit



Abb. 3: Schnellere Rücklaufzeit: (a) Touchscreens, (b) Kommandozeile, (c) Lochkarten.

In meiner Dissertation argumentiere ich, dass wir genau diese drei Schritte der Entwicklung des Benutzerinterfaces von Personal Computern auf Personal Fabrication Geräte anwenden müssen, damit diese Geräte für jedermann benutzbar werden. Wenn wir diese Entwicklung erfolgreich durchlaufen, argumentiere ich wird **in Zukunft jeder zuhause ein Personal Fabrication Gerät besitzen**, genau wie heutzutage jeder einen Personal Computer besitzt.

Bis diese Zukunftsvision vollständig real wird, wird es noch mehrere Jahrzehnte dauern. Vielen Menschen fällt es schwer sich heute vorzustellen, dass sie einmal ein Personal Fabrication Gerät wie zum Beispiel einen 3D Drucker zuhause haben werden und damit eigene Objekte ganz einfach erstellen können. Jedoch wurde genau das in der Vergangenheit auch über Personal Computer gesagt. Bis heute werden diese Aussagen als die größten Irrtümer in der Technologiesgeschichte zitiert:

'I think there is a world market for maybe five computers.'

(Thomas Watson, president of IBM, 1943)

'There is no reason for any individual to have a computer in his home.'

(Ken Olsen, founder of Digital Equipment Corporation, 1977)

In den nächsten drei Kapiteln dieser Kurzfassung beschreibe ich wie ich durch die **Entwicklung neuer interaktiver Hardware/Software Systeme** die oben beschriebenen drei Phasen systematisch abbilde. Ich beginne mit Phase 1 und untersuche wie sich die **Rücklaufzeit für das Drucken ganzer Objekte** verkürzen lässt. In Phase 2 demonstriere ich die erste 'Kommandozeile' für physische Objekte, ein System, das eine **physische Ausgabe nach jeder Benutzereingabe** erstellt. Schließlich zeige ich in Phase 3 ein von mir entwickeltes System, mit dem Benutzer **Objekte in Echtzeit verändern** können.

2 Schnellere Rücklaufzeiten für ganze Objekte

Die erste Forschungsfrage die ich beantworte ist: Wie kann man ganze Objekte schneller herstellen, sodass sie nicht mehr über Nacht gedruckt werden müssen?

Um diese Frage zu beantworten, habe ich das Konzept des Low-Fidelity Fabrication [MB] entwickelt. Dem Konzept liegt die Beobachtung zugrunde, dass Objekte in der Testphase nicht immer in voller Auflösung gedruckt werden müssen, was sehr langsam ist, sondern in bestimmten Phasen auch als niedrig auflösende, dafür jedoch schnelle Vorschaudrucke erstellt werden können.

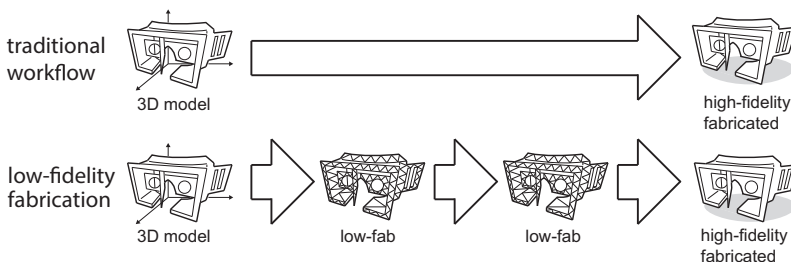


Abb. 4: Anstatt immer voll aufgelöste Objekte zu drucken, was viel Zeit kostet, druckt Low-Fidelity Fabrication Zwischenversionen als schnelle Vorschauobjekte.

Das Konzept des Low-Fidelity Fabrication lässt sich in verschiedenen Techniken für verschiedene Anwendungszwecke abbilden.

Abbildung 5a zeigt eine Low-fidelity Fabrication Technique für das Testen von Form [SMBa]: Der Benutzer möchte eine Flasche erstellen, die sich ergonomisch genau an seine Hand einpasst (jede Hand ist anders geformt) und daher verschiedene Größen der Flasche ausprobieren. Anstatt mehr als 2 Stunden pro Flaschendruck zu verwenden, verwendet der Benutzer die von mir entwickelte Low-fidelity Fabrication Software um das 3D Model der Flasche in ein Wireframe zu konvertieren. Mittels einer speziellen 3D Druck Technik, die ich entwickelt habe, kann diese Flasche nun in nur 14 Minuten gedruckt und ausprobiert werden. Der Benutzer kann also in der gleichen Zeit 8-mal so viele Varianten ausprobieren.

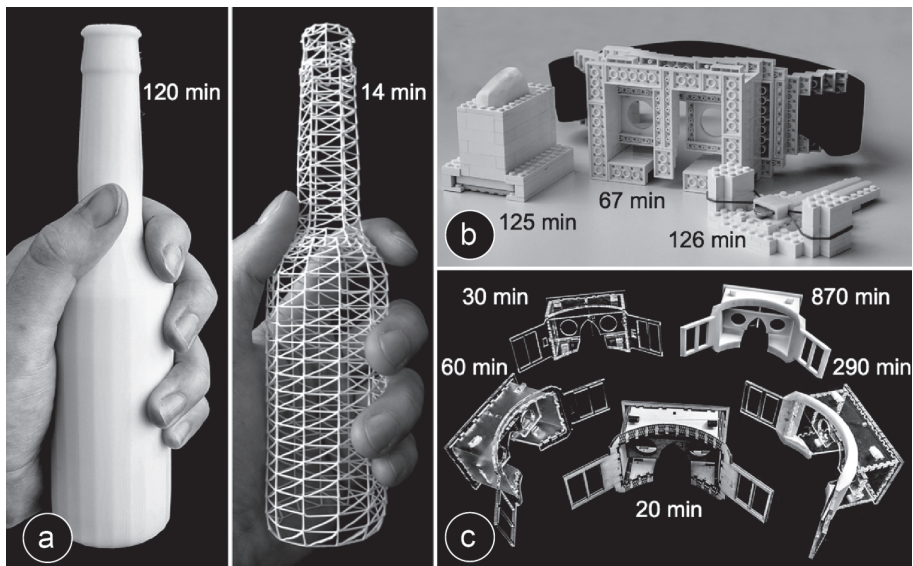


Abb. 5: Verschiedene Low-Fidelity Fabrication Techniken: (a) für Form, (b) für Modularität, (c) für Stabilität.

Die von mir entwickelte Technologie funktioniert auf 3D Druckern, die derzeit im Handel erhältlich sind, und kann damit direkt angewendet werden. Inzwischen ist Wireframe Printing in den meist verbreiteten 3D Drucker für Endkonsumenten, den Ultimaker, integriert. Mehrere Forschungsgruppen haben nach der Veröffentlichung meines Papiers auf der Idee aufgebaut und Folgepublikationen veröffentlicht (siehe [RWM] [HPG] [YHL]).

Abbildung 5b und c zeigen weitere Low-fidelity Fabrication Techniken: (b) eine Low-Fidelity Fabrication Technik für modulares Austauschen von Komponenten [SMBc] (Best Paper Award Nominee) und (c) eine Low-Fidelity Technik, die auf Stabilität fokussiert [DBB] (Best Paper Award Nominee).

Für alle drei Low-Fidelity Techniken habe ich mit der Unterstützung meiner Co-Autoren eine Konvertierungssoftware entwickelt, die Algorithmen aus der Computergraphik verwendet um die 3D Modelle automatisch in ihre neuen Repräsentationen zu zerlegen.

3 Physische Ausgabe nach jeder Benutzereingabe

Während Low-Fidelity Fabrication die Ausgabe des 3D Druckers bis zu 90 % beschleunigt, so müssen Benutzer dennoch zunächst das gesamte 3D Model erstellen und erst ganz am Ende können sie die gedruckte Version testen. Im nächsten Schritt habe ich daher untersucht, wie sich eine physische Ausgabe nach jeder Benutzereingabe realisieren lassen kann.

Um das Konzept zunächst in 2D zu evaluieren, habe ich als Grundlage meines Systems einen 2D Laserschneider verwendet. Im meinem System [SMBd] verwenden Benutzer einen Laserpointer um direkt auf das Stück Holz im Laserschneider zu zeichnen. Während der Benutzer eine Linie mit dem Laserpointer zeichnet, nimmt eine Kamera oberhalb des Laserschneiders den Zeichenpfad auf, begradigt ihn, und nachdem der Benutzer die gerade gezeichnete Linie beendet hat, schneidet der Laserschneider sie direkt aus. Der Benutzer erhält so eine physische Ausgabe nach jeder Eingabe.

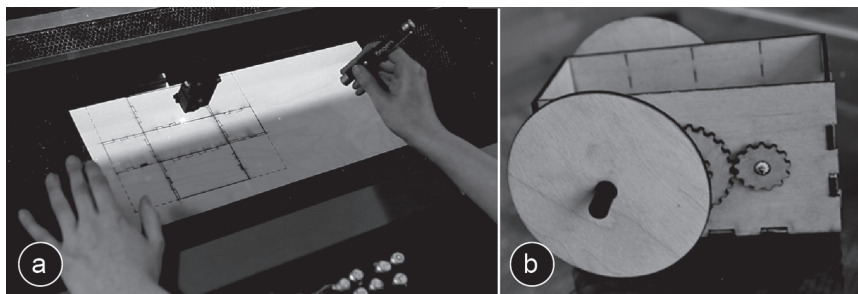


Abb. 6: (a) Benutzer zeichnen direkt auf das Holz im Laserschneider mit Hilfe von Laserpointern. Der Zeichenpfad wird von einer Kamera aufgenommen, automatisch begradigt, und anschließend vom Laserschneider direkt ausgeschnitten. (b) Ein Beispielobjekt.

Der Benutzer kann das bereits geschnittene Objekt jederzeit aus dem Laserschneider herausnehmen, testen, und es anschließend wieder zurücklegen um weiter daran zu arbeiten. Die benötigte Präzision kommt von einer Reihe verschiedener Arbeitswerkzeuge, die in verschiedene Laserpointer encodiert sind. Zum Beispiel gibt es einen Laserpointer, der immer gerade Linien erstellt, auch wenn der Benutzer mit der Hand wackelt.

Um das oben gezeigte System auf 3D zu erweitern, entwickelte ich eine neuartige Laserschneide-Technologie, die aus einer 2D Platte ein dreidimensionales Objekt faltet [SMBa] (Best Paper Award).

Ein Laserschneider fokussiert normalerweise den Laserstrahl auf die Oberfläche der Platte. Durch den fokussierten Strahl ist die Energie so hoch, dass ein Schnitt entsteht (Abbildung

7a). Um den Laserschneider auch zum Biegen verwenden zu können, benutze ich einen Trick: Ich defokussiere den Laser indem ich die Platte weiter nach unten bewege. Der defokussierte Strahl hat nicht mehr genug Energie um zu schneiden, sondern wärmt die Platte nur noch auf. Da es sich bei der Platte um ein Thermoplastik handelt, führt die Erwärmung dazu, dass sich die Platte mittels der Schwerkraft an der erwärmten Kante nach unten biegt und ein 3D Objekt bildet.

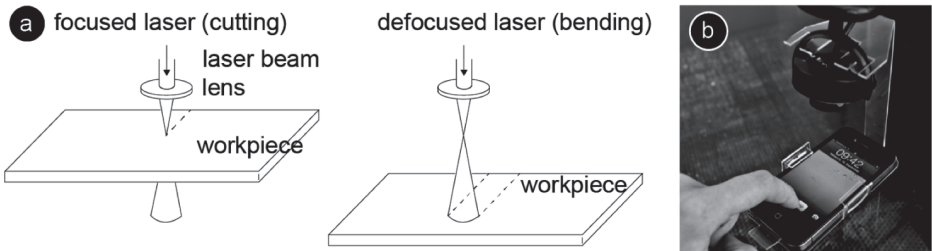


Abb. 7: (a) Zum Schneiden ist der Laser auf das Werkstück fokussiert, zum Biegen de-fokussiere ich den Laser automatisch. (b) Ein Beispielobjekt aus 5 Faltungen.

4 Physisches Ausgabe in Echtzeit

Die beiden zuvor beschriebenen Systeme sind Beispiele für eine physische Kommandozeile. Nachdem Benutzer ihre Eingabe beendet haben, wird eine physische Ausgabe produziert. Jedoch ist bei einer physischen Kommandozeile die Rücklaufzeit immer noch zu lang: Erst nachdem Benutzer eine Linie vollständig gezeichnet haben wird sie ausgeschnitten und nicht während Benutzer die Linie zeichnen.

Im letzten Schritt meiner Dissertation habe ich daher untersucht, wie ein System aussehen kann, dass dem Benutzer in Echtzeit eine physische Ausgabe erzeugt. Abbildung 8 zeigt ein Beispiel: Während der Benutzer die Hand bewegt und damit die gewünschte Veränderung anzeigt, ändert sich das Objekt sofort, es gibt keine Verzögerung mehr [SMBb].

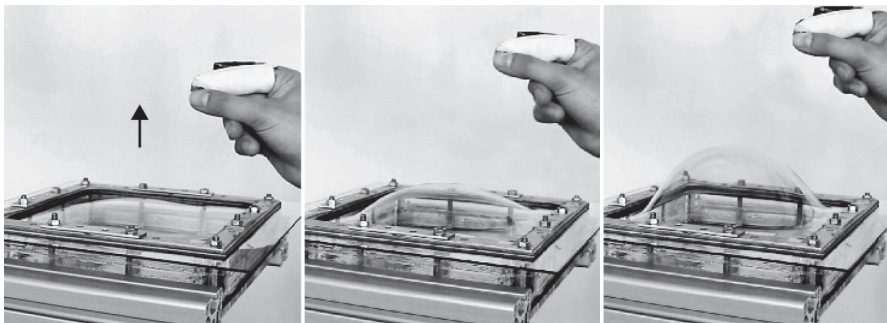


Abb. 8: Echtzeit-Veränderung: Die Form des Objektes folgt der Hand des Benutzers.

Die Interaktion wird durch das in Abbildung 9 dargestellte System ermöglicht: Eine Heißluftpistole an einem Roboterarm wärmt das Objekt an der Stelle auf, an welcher der Benutzer es verändern möchte. Sobald die Stelle warm genug ist, schaltet sich ein pneumatisches System ein, das entweder Druck oder Vakuum erzeugt. Dies drückt die aufgewärmte Stelle entweder nach außen oder zieht sie nach innen. Der Benutzer definiert wie weit die Stelle verformt wird indem der Benutzer die Hand entweder in Richtung des Objektes oder vom Objekt wegbewegt. Die Bewegung wird mit einem Motion Capture System aufgenommen und die Koordinaten an das System weitergegeben. Durch die Echtzeitveränderung kann der Benutzer schnell viele verschiedene Optionen ausprobieren um zu einer funktionierenden Lösung zu kommen.

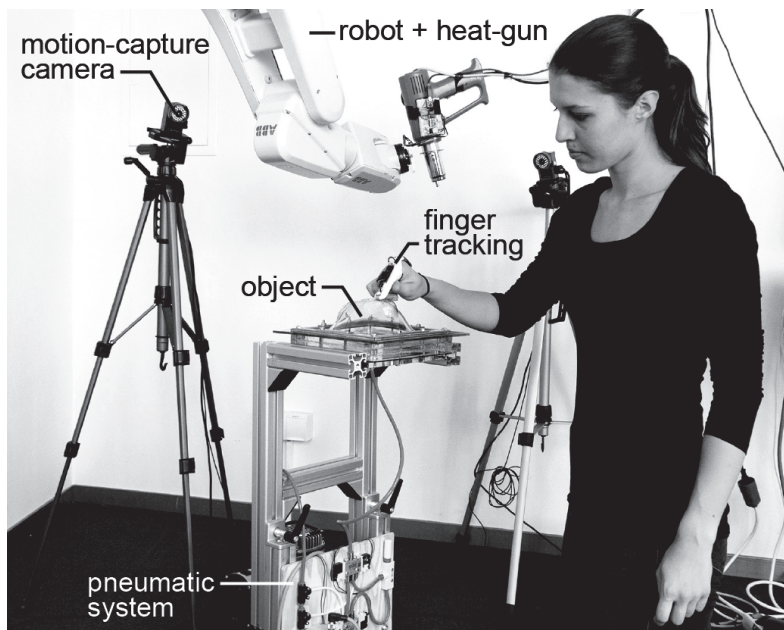


Abb. 9: Systemkomponenten für die interaktive Echtzeitverformung.

5 Zusammenfassung

Durch eine Reihe neuer interaktiver Software/Hardware Systeme habe ich in meiner Dissertation gezeigt, wie sich die Rücklaufzeiten zwischen Benutzereingabe und Maschinenausgabe für die Erstellung physischer Objekte reduzieren lassen. Die von mir entwickelten Systeme illustrieren wie sich das gleiche Interaktionsmodell, welches Personal Computing erfolgreich gemacht hat, auch auf Personal Fabrication anwenden lässt (Abbildung 10).

Genau wie in Personal Computing, hat dieses Interaktionsmodell jedoch auch seine Grenzen: Obwohl es sich sehr gut für Anfänger und einfache Objekte eignet, ist es weniger geeignet für komplexe Objekte die langfristige Planung benötigen. Solche Objekte fallen jedoch typischerweise in den Aufgabenbereich von Experten, die mit den bisher verwend-

ten 3D Editoren umgehen können. Mit den Händen Objekte zu formen bedeutet auch, dass es keine Zoom-Funktion gibt und alles auf einer 1:1 Skala beruht. Und schließlich ist es weiterhin eine offene Forschungsfrage, wie sich eine Rückgängig-Taste in der physischen Welt realisieren lässt. Mit weiteren Entwicklungen im Bereich Materialwissenschaften, glaube ich jedoch, dass sich in Zukunft Materialien für genau diesen Zweck herstellen lassen werden.

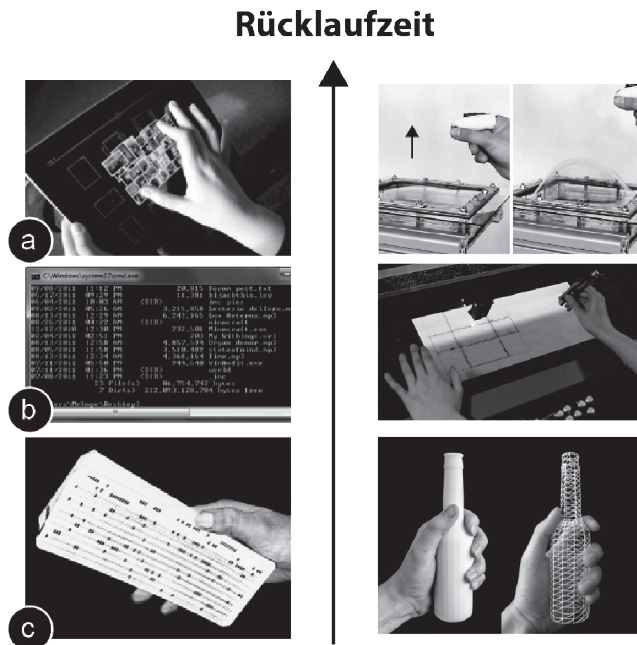


Abb. 10: Zusammenfassung: Durch eine Reihe neuer interaktiver Software/Hardware Systeme habe ich in meiner Dissertation gezeigt, wie sich das gleiche Interaktionsmodell, das Personal Computing erfolgreich gemacht hat, auch auf Personal Fabrication anwenden lässt.

6 Biografie



Stefanie Mueller ist Assistant Professorin in Electrical Engineering und Computer Science sowie Mechanical Engineering am Massachusetts Institute of Technology (MIT). Ihre Forschungsgruppe HCI Engineering arbeitet an neuartigen Techniken für Personal Fabrication mit dem Ziel, dass in Zukunft jeder überall zu jeder Zeit eigene Objekte herstellen kann. Stefanie erhielt für ihre Forschungsarbeit mehrere Best Paper und Honorable Mention Awards von der ACM CHI Konferenz. Als Gastredner hielt Stefanie unter anderem Vorträge an Universitäten wie Harvard,

Stanford, Berkeley, und Industrieforschungslaboren wie Adobe Research, Disney Research, und Microsoft Research. **Website:** <http://people.csail.mit.edu/stefaniemueller>

Literaturverzeichnis

- [DBB] Dustin Beyer, Serafima Gurevich, Stefanie Mueller Hsiang-Ting Chen; Baudisch, Patrick: Platener: Low-Fidelity Fabrication of 3D Objects by Substituting 3D Print with Laser-Cut Plates. In: Proc. ACM CHI 2015. S. 1799–1806.
- [HPG] Huaishu Peng, Rundong Wu, Steve Marschner; Guimbretiere, Francois: On-The-Fly Print: Incremental Printing While Modelling. In: Proc. ACM CHI 2016. S. 887–896.
- [MB] Mueller, Stefanie; Baudisch, Patrick: Low-Fidelity Fabrication: Speeding up Design Iteration of 3D Objects. In: Proc. CHI EA 2015. S. 327–330.
- [RWM] Rundong Wu, Huaishu Peng, Francois Guimbretiere; Marschner, Steve: Printing Arbitrary Meshes with a 5DOF Wireframe Printer. In: ACM Trans. Graph. 2016. Jgg. 35, 4, Article 101.
- [SMBa] Stefanie Mueller, Bastian Kruck; Baudisch, Patrick: LaserOrigami: Laser-Cutting 3D Objects. In: Proc. ACM CHI 2013. S. 2585–2592.
- [SMBb] Stefanie Mueller, Anna Seufert, Huaishu Peng Robert Kovacs Kevin Reuss Tobias Wollowski Francois Guimbretiere; Baudisch, Patrick: Continuous Interactive Fabrication. In: submitted to ACM UIST 2017.
- [SMBc] Stefanie Mueller, Tobias Mohr, Kerstin Guenther Johannes Frohnhofen; Baudisch, Patrick: faBrickation: Fast 3D Printing of Functional Objects by Integrating Construction Kit Building Blocks. In: Proc. ACM CHI 2014. S. 3827–3834.
- [SMBd] Stefanie Mueller, Pedro Lopes; Baudisch, Patrick: Interactive Construction: Interactive Fabrication of Functional Mechanical Devices. In: Proc. ACM UIST 2012. S. 599–606.
- [SMBe] Stefanie Mueller, Sangha Im, Serafima Gurevich Alexander Teibrich Lisa Pfisterer Francois Guimbretiere; Baudisch, Patrick: WirePrint: 3D Printed Previews for Fast Prototyping. In: Proc. ACM UIST 2014. S. 273–280.
- [YHL] Yijiang Huang, Juyong Zhang, Xin Hu Lei Yu; Liu, Ligang: FrameFab: Robotic Fabrication of Frame Shapes. In: Proc. ACM Trans. Graph. 2016. Jgg. 35, 6, Article 224.