

M. Koch, A. Butz & J. Schlichter (Hrsg.): Mensch und Computer 2014 Tagungsband, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2014, S. 65-74.

FabAR: Interaktive Fabrikation von 3D-Drucken durch Mashups

Christoph Beckmann, Mirko Fetter, Tom Gross

Lehrstuhl für Mensch-Computer-Interaktion, Otto-Friedrich-Universität Bamberg

Zusammenfassung

FabAR ist Interaktionskonzept und Werkzeug für die interaktive digitale Fabrikation von 3D-Modellen für den 3D-Druck durch Mashups. Benutzerinnen und Benutzer können durch das Zusammenspiel von Gestensteuerung und Augmented-Reality-Benutzungsschnittstelle 3D-Modelle direkt im 3D-Drucker bearbeiten, in Relation zu realen Objekten sehen und mehrfach miteinander kombinieren ohne auf komplexe CAD-Programme oder 3D-Modellierungswerkzeuge zurückzugreifen.

1 Einleitung und Hintergrund

Digital Fabrication (Gershenfeld 2005) verspricht Benutzerinnen und Benutzern die Herstellung von Gegenständen des täglichen Gebrauchs im eigenen Zuhause und findet immer raschere Verbreitung. Die Spannweite der Anwendungsszenarien reicht von schnellen Reparaturen, wie einen Ersatzdeckel für den Wasserkocher bis hin zur Herstellung von selbstgestalteten Hüllen für ein Smartphone. Dabei sind neuartige Technologien wie 3D-Drucker und Lasercutter — die immer einfacher zugänglich und erschwinglicher werden — die treibende Kraft für die Umsetzung dieser Szenarien. Durch Entwicklungen wie FabLabs und Crowdfunding-Plattformen, propagieren einige den Beginn einer dritten industriellen Revolution: alle können eigene, physische Waren erzeugen, modifizieren und reparieren.

Während die zugrundeliegenden Technologien für die eigene, digitale Herstellung günstiger, verfügbarer und einfacher werden, ist die Gestaltung von 3D-Modellen als Eingabedaten, komplex, fehleranfällig und entkorpert. Aktuelle GUI-basierte CAD- und 3D-Modellierungswerkzeuge zum Entwerfen oder Modifizieren eigener Modelle erzeugen eine künstliche, digitale Barriere zwischen den Benutzerinnen und Benutzern (vornehmlich mit keiner oder wenig Erfahrung mit 3D-Modellierung) und den Werkstücken (Willis *et al.* 2011). Für sie ist die Lernkurve solcher GUI-basierter Werkzeuge oft sehr steil. Auch können sie etwa nur schwer die Relation zwischen virtuellen Modellen und vorhanden realen Objekten abschätzen, um diese nach dem 3D-Druck zu kombinieren. Somit fehlt ein Werkzeug, welches das Erstellen und Bearbeiten von Modellen für den 3D-Druck ermöglicht (Lau *et al.* 2012). Ansätze, wie *Interaktive Fabrikation* und *Situative Modellierung* wurden in der

Literatur als Lösungen vorgeschlagen. Interaktive Fabrikation überbrückt die digitalen Barriere durch alternative Benutzungsschnittstellen (Willis *et al.* 2011). Situative Modellierung führt Augmented Reality (AR) ein, um Objekte durch die überlagerte Darstellung von digitalen und realen Objekten einfacher miteinander zu kombinieren (Lau *et al.* 2012). Auch haben sich im Umfeld von 3D-Druckern Plattformen zum einfachen Austausch von 3D-Modellen für den Druck wie Thingiverse¹ und Bld3r² etabliert.

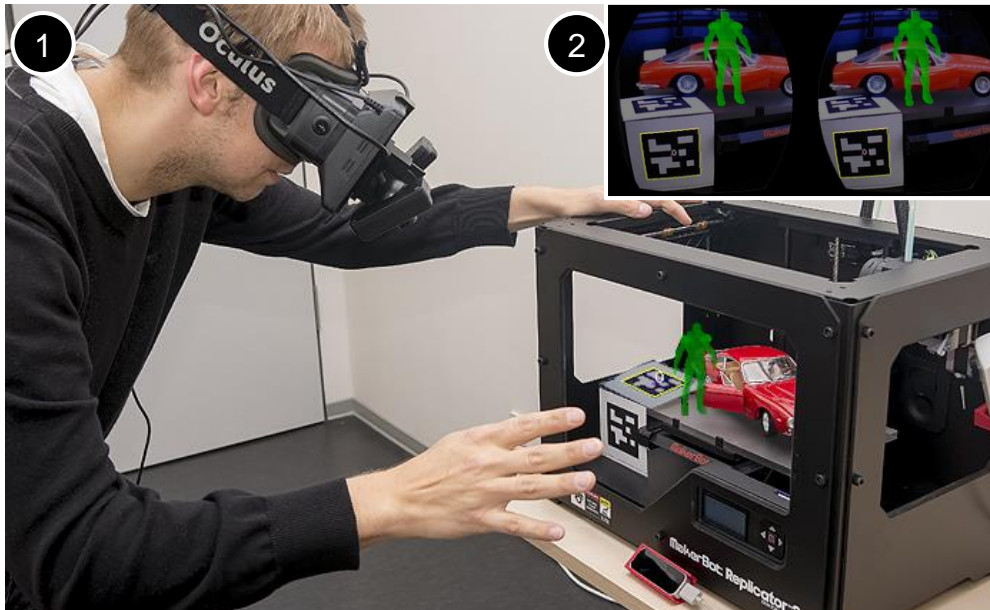


Abbildung 1. Das große Bild (1) zeigt FabAR während der Interaktion mit virtuellen und realen Objekten. Das kleine Bild (2) zeigt die stereoskopische Darstellung im AR-Headset.

Im vorliegenden Beitrag stellen wir mit FabAR ein Interaktionskonzept und ein System für die *Interaktive Fabrikation* von 3D-Druckern vor (siehe Abbildung 1). Es kombiniert die Stärken der oben beschriebenen Ansätze. Basierend auf dem Paradigma des Mashups (Hartmann *et al.* 2008) ermöglicht es Benutzerinnen und Benutzern direkt innerhalb eines 3D-Druckers und damit innerhalb des für die Fabrikation entscheidenden Referenzrahmens neue 3D-Modelle durch Bearbeiten und Kombinieren bestehender Modelle herzustellen. FabAR bietet durch das Zusammenspiel von AR und gestenbasierter Eingabe eine hohe Immersion. Nachfolgend stellen wir verwandte Arbeiten vor, beschreiben FabAR inklusive Benutzungsinteraktion, Anwendungsszenario, Implementierung, erstem Feedback und diskutieren unser Interaktionskonzept in Relation zum erhaltenen Feedback.

¹ <http://www.thingiverse.com>

² <http://www.bld3r.com>

2 Verwandte Arbeiten

Der Begriff *Interaktive Fabrikation* wurde basierend auf einigen Prototypen, die auf physischen Eingabemethoden setzen, um künstlerische, skulpturale Objekte zu erzeugen, geprägt (Willis *et al.* 2011). Andere, stärker technisch motivierte Ansätze im Bereich der *Interaktive Fabrikation*, sind einerseits FreeD V2 (Zoran *et al.* 2013), ein in der Hand haltbares Fräswerkzeug zum granularen Bearbeiten von bestehenden 3D-Modellen, und andererseits, das Constructable System (Mueller *et al.* 2012), welches Laser-Pointer als direktes Eingabewerkzeug für Schnitt- und Biegekanten eines Laser-Cutters einsetzt.

Der Begriff *Situative Modellierung* basiert auf zwei Systemen, die mittels AR eine explizite Referenz zu realen, physischen Objekten herstellen (Lau *et al.* 2012). Weitere Ansätze, wie CopyCAD (Follmer *et al.* 2010) und MixFab (Weichel *et al.* 2014) erlauben die Integration der Geometrie realer Objekten in 3D-Modelle. In diesem Zusammenhang wurde bereits gestenbasierte Eingabe zur Manipulation von 3D-Modellen erprobt. In MixFab können innerhalb einer durch Spezialhardware, dem Holodesk, definierten Mixed-Reality Umgebung reale Objekte gescannt und mit primitiven Formen durch Gesten zu neuen Objekten kombiniert werden. Spatial Sketch (Willis *et al.* 2011) und Sketch Furniture³ ermöglichen es, durch Gesten im freien Raum, Design-Objekte und Möbel zu erstellen. Industrielle Kooperationen wie die zwischen Softkinetic und Makerbot adressieren in erster Linie das Einscannen von realen Objekten und gehen bezüglich der Kombination von virtuellen Modellen und realen Objekten momentan nicht über Produktankündigungen hinaus. Aktuelle AR- und gestenbasierte Systeme wie MetaPro⁴ zeigen in diesem Zusammenhang die Realisierbarkeit von holographischen Benutzungsschnittstellen zur Erzeugung von 3D-Modellen ohne die Stärken der Überlagerung von realen Modellen und virtuellen Objekten zu nutzen. Darüberhinaus existieren jedoch weder Konzepte noch Systeme für die Interaktive Fabrikation innerhalb eines 3D-Drucker — der als für Benutzerinnen und Benutzern bekannte Referenz für die Interaktion von 3D-Modellen und realen Objekten dient.

Im Bereich der konventionellen CAD-Werkzeuge senken einfache und Web-basierte Programme die Einstiegsbarriere durch Reduktion des Funktionsumfangs (bspw. AutoDesk Tinkercad⁵, AutoDesk 123D Design⁶ und Thingiverse Customizer⁷). Jedoch erlauben es diese Werkzeuge nicht reale Objekte in Referenz zu 3D-Modellen zu setzen und bieten daher in Anwendungsszenarien nur wenig Unterstützung. Web-Dienste, wie Thingiverse bieten die Möglichkeit 3D-Modelle zu teilen und im bereits für den 3D-Druck optimierten Format herunterzuladen. Jedoch scheitern Benutzerinnen und Benutzer häufig an der Anpassung der Modelle für ihr Anwendungsszenario ohne auf komplexe CAD-Werkzeuge für vergleichsweise triviale Anpassungen an reale Objekte zurückzugreifen.

³ <http://www.designfront.org/category.php?id=81&product=191>

⁴ <http://www.spaceglasses.com/>

⁵ <http://tinkercad.com/>

⁶ <http://www.123dapp.com/design>

⁷ <https://www.thingiverse.com/apps/customizer>

3 FabAR

Für die *Interaktive Fabrikation* adressieren wir drei Herausforderungen mit FabAR: (1) bestehende Werkzeuge für die Modellierung von 3D-Drucken sind komplex. Benutzerinnen und Benutzer greifen häufig nur auf einen Bruchteil der Funktionen der Werkzeuge zurück und sind daher oft durch den großen Funktionsumfang überfordert. (2) Web-Dienste bieten zwar einen einfachen Zugang zu 3D-Modellen, jedoch benötigen Benutzerinnen und Benutzer einfache Werkzeuge um kleine und exakte Modifikationen der 3D-Modelle an ihren Anwendungskontext vorzunehmen. (3) Der Integrationsprozess (d.h. das Einpassen von 3D-Modellen in bestehende Gegenstände) ist häufig fehleranfällig und das bedeutet, dass Benutzerinnen und Benutzer mittels Ausprobierens 3D-Modelle mehrfach drucken und anpassen müssen (d.h. ein hoher Einsatz von Zeit bis zu mehreren Stunden und Druckmaterialien), bis sie mit dem Ergebnis zufrieden sind.

FabAR löst diese künstliche, digitale Barriere der klassischen und komplexen GUI-basierten Werkzeuge zugunsten einer einfachen Interaktion mit hoher Immersion. Nachfolgend beschreiben wir das Interaktionskonzept, ein Anwendungsszenario und die Implementierung.

3.1 Interaktionskonzept von FabAR

FabAR kombiniert Augmented Reality und gestenbasierte Eingaben, sodass Benutzerinnen und Benutzer interaktiv geladene 3D-Modelle direkt im 3D-Drucker auf dem Druckbett bearbeiten. Das Arbeiten im 3D-Drucker ist zentral, indem es den Kontext der Benutzung beachtet (vgl. Gross 2013) und infolgedessen den 3D-Druck bereits im Vorfeld abschätzen lässt. Zur besseren Einschätzung von Größenverhältnissen und einer späteren Passung können Benutzerinnen und Benutzer dem Paradigma des Mashups (Hartmann *et al.* 2008) folgen indem sie reale Objekte direkt neben virtuelle 3D-Modelle platzieren und sich so zeitaufwändige Anpassungen durch Ausprobieren ersparen (siehe Abbildung : reales rotes Auto und virtuelle grüne Figur). Durch Finger- und Handgesten vor dem 3D-Drucker können sie interaktiv 3D-Modelle direkt auf dem Druckbett positionieren und bewegen, sowie mit einem speziell auf ihre Bedürfnisse zugeschnittenen Funktionsumfang 3D-Modelle bearbeiten und miteinander kombinieren.

Für die Interaktion mit FabAR führen wir das Prinzip der *linearen schrittweisen Komposition* in Anlehnung an die Vorgehensweise der konstruktiven Festkörpergeometrie (Voelcker & Requicha 1977) ein: Benutzerinnen und Benutzer bauen iterativ ihr gewünschtes 3D-Modell für den Druck zusammen. Dazu kombinieren sie zwei bestehende Modelle in ein neues, welches dann weiter kombiniert werden kann; es können gleichzeitig maximal zwei Modelle bearbeitet werden. Wenn nur ein 3D-Modell geladen ist, so werden alle Bearbeitungen exklusiv darauf ausgeführt. Wird es zweites 3D-Modell geladen, so kann zwischen den Modellen zur Bearbeitung ausgewählt werden. In dem Moment, in dem ein drittes 3D-Modell geladen wird, werden die ersten beiden Modelle zu einem Modell kombiniert; sie können fortan nur als eine Einheit bearbeitet werden — ähnlich zur Gruppierungsfunktion in Grafikprogrammen. Diese Vorgehensweise führt zu einem linearen Prozess der iterativen Komposition (d.h. Kombination und Bearbeitung) bestehender 3D-Modelle.

Zur Komposition von 3D-Modellen bietet FabAR fünf grundlegende Bearbeitungsfunktionen an die durch Gesten ausgeführt und direkt angewendet werden (siehe Abbildung 2): Laden, Skalieren, Rotieren, Positionieren, und Auswählen von 3D-Modellen.

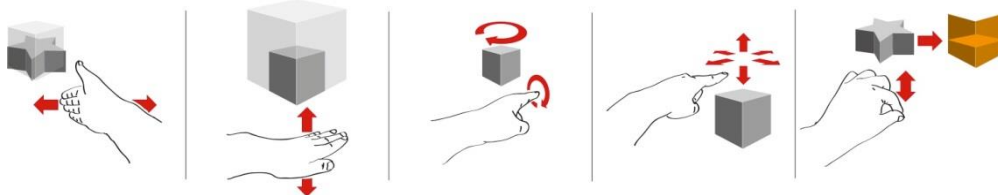


Abbildung 2. Die Bearbeitungsfunktionen und Gesten: Laden, Skalieren, Rotieren, Positionieren, und Auswählen.

Benutzerinnen und Benutzer können 3D-Modelle mittels einer horizontalen Wischgeste vor dem 3D-Drucker laden, indem sie durch einen Katalog an verfügbaren Modellen navigieren. Das Wischen von links nach rechts zeigt jeweils das nachfolgende und in die andere Richtung das vorherige Modell. Um ein Modell zu skalieren, führen sie eine vertikale Wischgeste auf dem aktuell geladenen Modell aus. Dabei wird jedes Wischen von unten nach oben in eine kontinuierliche Vergrößerung des ausgewählten Modells übersetzt. Das Wischen von oben nach unten verkleinert das Modell. Kreisförmiges Bewegen des Zeigefingers ist eine Rotation des 3D-Modells; die Rotationsrichtung des Modells ist mit der Bewegungsrichtung des Fingers synchronisiert. Die Rotationsgeschwindigkeit in Form einer nicht-isomorphen Übersetzung erlaubt eine feingranulare Rotation des 3D-Modells. Positionieren des 3D-Modells wird mit einer Zeigegeste realisiert. Dazu bewegen Benutzerinnen und Benutzer ihre Zeigefinger anhand der x-, y-, und z-Achse; das 3D-Modell folgt diesen Bewegungen. Das Auswählen von 3D-Modellen ist an die Zwickgeste gebunden, d.h. das Zusammenführen von Daumen- und Zeigefingerspitzen.

Ausgehend vom beschriebenen Paradigma des linearen iterativen Komponierens sind drei Zustände für eine Selektion möglich, durch die gewechselt werden kann: das erste Modell ist selektiert (d.h. alle Bearbeitungen erfolgen am ersten Modell), das zweite Modell ist selektiert (d.h. alle Bearbeitungen erfolgen am zweiten Modell), beide Modelle sind selektiert (d.h. alle Bearbeitungen erfolgen an beiden Modellen als eine Einheit). Wird dann die Wischgeste zum Laden aktiviert, so werden die beiden selektierten Modelle in ein logisches Modell überführt.

3.2 Anwendungsszenario von FabAR

Zur Illustration der Benutzungsinteraktion von FabAR — dem Zusammenspiel der Gesten mit virtuellen 3D-Modellen und realen Objekten — zeigen wir nachfolgend die schrittweise Konstruktion eines 3D-Modells anhand eines Szenarios.

Eine Medienkünstlerin möchte mit einem *LEAP Motion Controller* Gesten von oben aufnehmen und anschließend für eine Installation verarbeiten. Zur einfachen Positionierung des Controllers für Ihren Prototypen entschließt sie sich diesen an eine Schreibtischlampe zu montieren — jedoch weiß sie nicht genau wie. Auf Thingiverse findet sie zahlreiche Gehäuse und Halterungen für den *LEAP Motion Controller*, aber keine passt an die

Schreibtischlampe. Sie sucht weiter nach einer Lösung zur Montage und entdeckt ein 3D-Modell eines E27-Schraubgewindes (dem Gewinde einer herkömmlichen Glühbirne). Sie lädt zwei Modelle runter, das E27-Schraubgewinde und eine Halterung für den Controller.

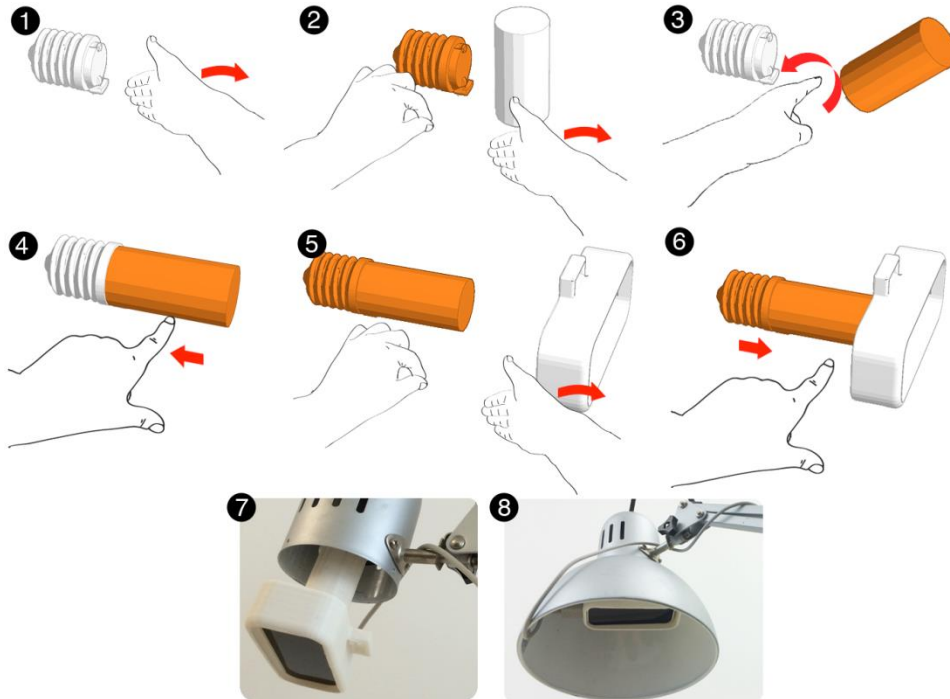


Abbildung 3. Die Benutzerin lädt das Schraubgewinde (1) und lädt den Zylinder (2) während Sie das Schraubgewinde mit der Zwickgeste festhält. Sie rotiert den Zylinder (3) und verschiebt diesen passgenau an das Schraubgewinde (4). Sie hält das kombinierte Objekt fest und lädt die Halterung dazu (5). Sie schiebt das neue Objekt an die Halterung (6). Nach dem Druck passt die Halterung in die Schraubfassung (7) und unter den Lampenschirm (8).

Mit FabAR kann sie die beiden Modelle laden und in ein neues, druckbares Modell kombinieren (siehe Abbildung 3). Sie legt die realen Objekte (d.h. Controller und Kopf der Schreibtischlampe) in den 3D-Drucker und sieht, dass die 3D-Modelle schon die richtige Größe haben. Entsprechend rotiert und transliert sie die Halterung des Controllers und positioniert diesen mit etwas Überlappung an das Schraubgewinde. Sie positioniert den Kopf der Schreibtischlampe so wie später die neue Halterung passen soll. Dabei stellt sie fest, dass der Lampenschirm zu eng ist um die breite Halterung des Controllers vollständig aufzunehmen: sie braucht eine Verlängerung zwischen Schraubgewinde und Halterung. Einen einfachen Zylinder (Mittelteil in Abbildung 3.6) findet sie ebenfalls bei Thingiverse und lädt diesen runter. Sie platziert die 3D-Modelle jeweils mit etwas Überlappung und druckt. Nach ca. 3 Stunden ist der Druck fertig; es passt perfekt (siehe Abbildung 3.7 und Abbildung 3.8).

3.3 Implementierung von FabAR

FabAR basiert auf Standardkomponenten: einem Makerbot Replicator 2 als 3D-Drucker, einem LEAP Motion Controller zur gestenbasierten Eingabe und einer Oculus Rift in Kombination mit zwei PS 3 Eye Kameras als günstiges AR-Headset. Unsere Software-Architektur folgt dem modularen Ansatz von openFrameworks⁸ mit einer FARController Kontrollklasse und vier Subsystemen: FARFrameGrabber, FARAR, FARDraw, und FARView. Nachfolgend beschreiben wir die Bearbeitungsschritte.

Zur stereoskopischen Präsentation der Szene im AR-Headset benutzen wir zwei Kameras. Im FARFrameGrabber werden die Bilder beider via USB angeschlossenen Kameras abgerufen, rotiert und gespiegelt um die richtige Perspektive einzustellen. Vorbereitend für die AR-Markererkennung fertigen wir je eine S/W-Version der Einzelbilderpaare und eine Version mit reduziertem Tonwertumfang anhand eines Schwellwertes an. Letztere Version wird dann innerhalb des FARAR Subsystems zur AR-Markererkennung mittels des ARToolKit+ (Wagner & Schmalstieg 2007) weiterverarbeitet: für uns ist die Position des AR-Markers an dem Druckbett für die Platzierung von 3D-Modellen von Interesse. Die originalen Einzelbilderpaare werden im FARDraw Subsystem in einem OpenGL-Contexts nebeneinander und die aktivierten 3D-Modelle an die korrespondierenden Koordinaten gezeichnet. Um eine gewarpte stereoskopische Repräsentation zur Darstellung im AR-Headset zu erhalten wenden wir innerhalb des FARView Subsystems Vertex- und Fragment-Shader an (siehe Abbildung .2). Die Darstellung läuft flüssig mit ca. 60 fps.

Zur Gestenerkennung greifen wir auf die vordefinierten Wisch-, Zeige- und Kreisgesten der LEAP C++ API⁹ zurück und erkennen zusätzlich die Zwickgeste durch Auswertung der Positionen der Fingerspitzen. Der FARController verarbeitet alle Gesteneingaben und propagiert diese direkt an alle aktiven 3D-Modelle. Änderungen sind sofort sichtbar und persistent an den 3D-Modellen; diese können im STL-Format im- und exportiert werden.

4 Erstes Feedback zu FabAR

Für eine erste, informelle Benutzungsstudie zu FabAR rekrutierten wir 22 (zwei weibliche) Teilnehmerinnen und Teilnehmer zwischen 18 und 44 ($M = 25.93$; $SD = 5.97$) Jahren. Nach einer kurzen Erklärung von FabAR und dem Anpassen des AR-Headsets konnten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer selbstständig FabAR für einige Minuten ausprobieren. In dieser ersten Studie waren wir in erster Linie an Rückmeldungen zur Robustheit von FabAR interessiert und haben daher die Teilnehmerinnen und Teilnehmer aufgefordert den Interaktionsrahmen sukzessive zu explorieren anstelle ihnen feste Aufgaben zuzuweisen und Bearbeitungszeiten zu messen; im 3D-Drucker waren das rote Auto wie in Abbildung zu sehen und Beispiel-3D-Modelle präpariert. Während des Tests haben wir die Interaktion der

⁸ <http://www.openframeworks.cc>

⁹ <http://developer.leapmotion.com/documentation/cpp/api/Leap.Frame.html>

Teilnehmerinnen und Teilnehmer vor dem 3D-Drucker mit FabAR beobachtet und die stereoskopische Ansicht auf einem zweiten Bildschirm verfolgt. Wir konnten so die AR- und Gesten-Tracking-Genauigkeit analysieren sowie Eindrücke von der Interaktion an sich erhalten. Nach dem Test haben die Teilnehmerinnen und Teilnehmer den standardisierten INTUI Fragebogen (Ullrich & Diefenbach 2010) zu FabAR ausgefüllt (17 Fragen jeweils Likert-skaliert von 1-7) und so die Einfachheit der Interaktion mit FabAR bewertet.

Die Beobachtungen während der Studie zeigen vor allem zwei Dinge: (1) der Grad der Immersion, d.h. die stereoskopische Überlagerung von 3D-Modellen und realen Objekten war für viele Teilnehmerinnen und Teilnehmer ungewohnt, jedoch sehr hilfreich um Größen- und Passungsverhältnisse abschätzen zu können. Einige Teilnehmerinnen und Teilnehmer öffneten beispielsweise die Türen des roten Autos um 3D-Modelle von Figuren besser positionieren und skalieren zu können. Häufig haben wir beobachtet, dass sie ihre Perspektive auf die Szene im 3D-Drucker durch Veränderung von Körperhaltung, Abstand und Blickrichtung angepasst haben um Bearbeitungen genauer durchzuführen. (2) Auch wenn die Erkennung der AR-Marker zuverlässig war, kam es in den Grenzbereichen des AR-Headsets zu einer monoskopischen Überlagerung von 3D-Modellen und realen Objekten (d.h. wenn eine sehr steile Perspektive eingenommen wurde, so dass der Marker nur von einer Kamera erkannt wurde) — dies wurden von keinem Teilnehmenden expliziert.

Die Auswertung der INTUI-Fragebögen zeigt, dass die Teilnehmerinnen und Teilnehmer die Interaktion mit FabAR als überdurchschnittlich intuitiv beurteilen (Skala INT: $M = 5.14$, $SD = 1.08$). Besonders die Verbalisierungsfähigkeiten (Skala V: $M = 5.59$, $SD = 1.21$) und das magische Erleben (Skala X: $M = 5.47$, $SD = 1.00$) wurden positiv bewertet. Weiterhin bewerteten sie die Interaktion mit FabAR als eher mühelos (Skala M: $M = 4.27$, $SD = .90$), und beurteilten ihr Vorgehen als eher gefühlsgeleitet (Skala G: $M = 4.35$, $SD = 1.47$).

5 Diskussion

FabAR als Interaktionskonzept und System adressiert die Herausforderungen der *Interaktiven Fabrikation* aktiv und befähigt Benutzerinnen und Benutzer als Novizen im Bereich des 3D-Drucks ihr Ziel — im Sinne des Anwendungsszenarios — mühelos zu erreichen. Den Grundsätzen von Myers et al. (2000) folgend haben wir das Interaktionskonzept von FabAR bewusst minimal gestaltet: ein Interface soll sowohl einen einfachen Einstieg ermöglichen als auch genügend Reserven zur Bearbeitung komplexerer Aufgaben bereitstellen. Wie das erste Feedback von Benutzerinnen und Benutzern zeigt, unterstützt FabAR bereits den einfachen Einstieg. Komplexere Kompositionen mit einer Vielzahl an 3D-Modellen sind in FabAR möglich, jedoch haben wir vorerst komplexere Interaktionskonzepte zugunsten einer einfachen gestenbasierten Eingabe bewusst außen vor gelassen. Nachfolgend diskutieren wir die Möglichkeiten komplexerer Interaktionsmöglichkeiten im Zusammenhang mit unseren ersten Beobachtungen.

Die Benutzerinnen und Benutzern sind von dem hohen Grad der Immersion in FabAR begeistert und zugleich mit einer für sie neuen Form der Interaktion konfrontiert. Einerseits konnten wir die Begeisterung direkt beobachten: die Benutzerinnen und Benutzer inter-

agierten zugleich mit realen und virtuellen Objekten im 3D-Drucker und passten durch Gesten die 3D-Modelle den realen Gegenständen an. Auch bewerteten die Benutzerinnen und Benutzer die Skalen Verbalisierungsfähigkeit und magisches Erleben des Fragebogens hoch. Andererseits hat FabAR auf den Skalen Mühelosigkeit und Bauchgefühl nur knapp überdurchschnittlich gute Werte erhalten. Auch leitet sich aus dem Interaktionskonzept eine direkt strukturierte Arbeitsweise zum Erstellen von komplexeren Objekten ab. Der derzeitige Prozess ist strikt linear, d.h. zwei 3D-Modelle müssen vor dem Laden eines dritten Modells in ihrer nicht-abänderbaren Kombination sein. Prinzipiell sind auch große Kompositionen von 3D-Modellen möglich, sicher sind aber nur Kompositionen mit bis zu fünf 3D-Modellen praktikabel, da sich sonst die Zahl der nicht-abänderbaren Arbeitsschritte zu stark erhöht. Daher schlagen wir zwei einfache, aber unserer Auffassung nach wirkungsvolle Funktionen zur Integration vor: (1) *Rückgängig und Wiederholen* ermöglicht kurzfristige Korrekturen und (2) eine *Zwischenablage* gibt Freiraum um gute Modellkompositionen zu einem späteren Zeitpunkt einzusetzen. Beides sind klar Standardfunktionen interaktiver GUI-basierter System, jedoch ergeben sich in Kontext der Interaktiven Fabrikation neue Herausforderungen der Selektion und Gruppierung von 3D-Modellen. Das Zyklisieren der Selektion, wie im aktuellen Prototypen möglich, ist bei mehr als drei Modellen unserer Ansicht nach anstrengend. Da bestehende Ansätze der Selektion im freien Raum durch einfach handhabbare Gesten nur wenig erforscht sind ergibt sich ein breites Feld für weitere Arbeiten (vgl. Vogel & Balakrishnan 2005).

Wir konnten beobachten, wie Benutzerinnen und Benutzer ihre Perspektive veränderten um Bearbeitungsschritte mit einer höheren Genauigkeit auszuführen, so sind sie bspw. zur Translation eines 3D-Modells näher an den 3D-Drucker herantreten. Auch interpretieren wir die nur knapp überdurchschnittliche Bewertung auf der Skala Mühelosigkeit in Richtung der akkuraten Platzierung von 3D-Modellen auf dem Druckbett. In FabAR werden 3D-Modelle durch die Zeigegeste freihändig in der Luft durchgeführt. Die fehlende Genauigkeit dieser Freihandpositionen und mögliche Lösungen sind im Bereich der interaktiven Systeme bekannt — durch den Schnappmechanismus (Bier & Stone 1986) kann in FabAR eine höhere Präzision erreicht werden, ohne dass neue Gesten oder Steuerungsmöglichkeiten hinzugefügt werden müssen. Das Anbieten eines spezifischen Bearbeitungswerkzeugs zum Justieren und Ausrichten von 3D-Modellen als weitere Lösungsmöglichkeit erfordert hingegen wieder zusätzliche Gesten oder Steuerungsmöglichkeiten.

6 Resümee

Zusammenfassend haben wir mit FabAR sowohl ein Interaktionskonzept, als auch ein System vorgestellt, das es Benutzerinnen und Benutzern ermöglicht interaktiv 3D-Modelle für den 3D-Druck durch Mashups vorhandener Modelle herzustellen. FabAR zeigt die technische Umsetzbarkeit dieser Idee im Druckraum eines 3D-Druckers. Die informelle Benutzungsstudie zeigt, dass FabAR bereits intuitiv durch Benutzerinnen und Benutzer einzusetzen ist. In der Diskussion konnten wir zeigen, dass der Interaktionsraum 3D-Drucker viele Möglichkeiten der Integration nützlicher Funktionen etablierter 3D-Werkzeuge offen lässt und gleichzeitig die Herausforderungen einer handhabbaren Steuerung hoch sind.

Literaturverzeichnis

- Bier, E.A. & Stone, M.C. Snap-Dragging. In *13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques - SIGGRAPH 1986* (18.-22. Aug., Dallas, TX). ACM Press, NY, 1986. pp. 233-240.
- Follmer, S., Carr, D., Lovell, E. & Ishii, H. CopyCAD: Remixing Physical Objects With Copy and Paste From the Real World. In *23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST 2010* (3.-6. Okt., New York NY). ACM Press, NY, 2010. pp. 381-382.
- Gershenfeld, N. *Fab: The Coming Revolution on Your Desktop--from Personal Computers to Personal Fabrication*. Basic Books, Cambridge, MA, 2005.
- Gross, T. Mensch-Computer-Interaktion in Wissenschaft und Praxis. *HMD - Praxis der Wirtschaftsinformatik* 50, 294 (Dez. 2013). pp. 6-15.
- Hartmann, B., Doorley, S. & Klemmer, S.R. Hacking, Mashing, Gluing: Understanding Opportunistic Design. *IEEE Pervasive Computing* 7, 3 (Juli 2008). pp. 46-54.
- Mueller, S., Lopes, P. & Baudisch, P. Interactive Construction: Interactive Fabrication of Functional Mechanical Devices. In *25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST 2012* (7.-10. Okt., Cambridge, MA). ACM Press, NY, 2012. pp. 599-606.
- Myers, B., Hudson, S.E. & Pausch, R. Past, Present and Future of User Interface Software Tools. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 7, 1 (März 2000). pp. 3-28.
- Ullrich, D. & Diefenbach, S. INTUI. Exploring the Facets of Intuitive Interaction. In *Mensch & Computer - M&C 2010* (12.-15. Sep., Duisburg). Oldenbourg, München, 2010. pp. 57-62.
- Voelcker, H.B. & Requicha, A.A.G. Constructive Solid Geometry. *Reportnummer: TM-25, University of Rochester*. Production Automation Project, Rochester, N.Y., Nov. 1977.
- Vogel, D. & Balakrishnan, R. Distant Freehand Pointing and Clicking on Very Large, High Resolution Displays. In *18th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST 2005* (23.-26. Okt., Seattle, WA). ACM Press, NY, 2005. pp. 33-42.
- Wagner, D. & Schmalstieg, D. ARToolKitPlus for Pose Tracking on Mobile Devices. In *12th Computer Vision Winter Workshop - CVWW 2007* (6.-8. Feb., Sankt Lambrecht, Österreich). 2007. pp. 1-8.
- Weichel, C., Lau, M., Kim, D., Villar, N. & Gellersen, H. MixFab: A Mixed-Reality Environment for Personal Fabrication. In *Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI 2014* (1. Apr.-1. Mai, Toronto, Ontario, Kanada). ACM Press, NY, 2014. pp. 3855-3864.
- Willis, K.D.D., Xu, C., Wu, K.-J., Levin, G. & Gross, M.D. Interactive Fabrication: New Interfaces for Digital Fabrication. In *Fifth International Conference on Tangible Embedded Interaction - TEI 2011* (23.-26. Jan., Funchal, Portugal). ACM Press, NY, 2011. pp. 69-72.
- Zoran, A., Shilkrot, R. & Paradiso, J. Human-Computer Interaction for Hybrid Carving. In *26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST 2013* (8.-11. Okt., St. Andrews, Schottland). ACM Press, NY, 2013. pp. 433-440.

Kontaktinformationen

Prof. Dr. Tom Gross, tom.gross(at)uni-bamberg.de, T. 0951-863-3940