

# Nutzung von Projection Mapping zur Unterstützung von Hardware-Aneignung

Thomas Ludwig<sup>1</sup>, Christoph Kotthaus<sup>2</sup>, Michael Döll<sup>2</sup>

Cyber-Physische Systeme, Universität Siegen<sup>1</sup>

Computer-unterstützte Gruppenarbeit, Universität Siegen<sup>2</sup>

[thomas.ludwig@uni-siegen.de](mailto:thomas.ludwig@uni-siegen.de), [christoph.kotthaus@uni-siegen.de](mailto:christoph.kotthaus@uni-siegen.de),  
[michael.doell@uni-siegen.de](mailto:michael.doell@uni-siegen.de)

## Zusammenfassung

Die Anforderung an Nutzer bei der handlungsorientierten Bedienung mit immer komplexeren technischen Systemen nimmt stetig zu. Herkömmliche unterstützende Instrumente in Form von Handbüchern oder Video-Tutorials stellen jedoch nur passive Elemente der Informationsvermittlung ohne aktiven Einbezug der Geräte selbst dar. Die Aneignungsunterstützung und Sociable Technologies untersuchen dabei, wie Funktionalitäten zur Unterstützung der Aneignung direkt in die Geräte integriert werden können. Projection Mapping stellt dabei eine innovative Form der Visualisierung dar. Im Rahmen dieses Beitrags wird am Beispiel des 3D-Drucks untersucht, wie Projection Mapping als Instrument der hardwarenahen Aneignungsunterstützung angewendet werden kann. Durch Konzeption, Design und eine Eye-Tracking-gestützte Evaluation eines vollständig implementierten projektionsbasierten 3D-Drucker-Bediensystems werden Erkenntnisse gewonnen, die nicht nur den Status quo der Aneignungsunterstützung mittels Projection Mapping erweitern, sondern auch die zukünftige Entwicklung projektionsbasierter Systeme im Sinne einer nutzerorientierten Mensch-Maschine-Interaktion ermöglichen.

## 1 Einleitung

Das moderne Kraftfahrzeug unterstützt durch sensorgestützte umweltwahrnehmende Assistenzsysteme den Nutzer bei einer sicheren Fahrt. Der intelligente Backofen teilt dem Nutzer anhand digitaler Kochbücher mit, wie und wann eine Speise fertig zubereitet ist. Die cyber-physische Gießanlage passt ihr Mischverhältnis automatisiert an den Sauerstoffgehalt der Umgebung an. Durch die Digitalisierung begünstigte cyber-physische Prozesse erlauben zunehmend übergreifende Kommunikation und Kooperation von Maschinen und Anlagen. Mit steigender Komplexität solcher Systeme steigen jedoch gleichzeitig die Anforderungen an die Nutzer, die Bedienung und Funktionsweisen zu verstehen und handlungsorientiert

anzuwenden. Ein Beispiel aus der jüngeren Praxis stellt der Einsatz von 3D-Druckern dar: War additive Fertigung in der Vergangenheit ein Thema für hochspezialisierte Experten, widmen sich mittlerweile eine Vielzahl semi-professioneller Anwender dem Themenfeld des 3D-Drucks. Da sich 3D-Drucker im Hinblick auf die Komplexität eines durchzuführenden Drucks durch eine Vielzahl von äußeren physischen Einflussfaktoren jedoch von herkömmlichen Druckern unterscheiden, werden semi-professionelle und häufig unerfahrene Nutzer vor hohe Herausforderungen gestellt (Ludwig et al., 2017; Ludwig et al., 2014). Es treten insbesondere Fragen zur Funktionsweise, der Inbetriebnahme oder Fehlerbehebungen auf.

Zur Unterstützung der Aneignung beim Umgang solcher Systeme bieten die Hersteller zu meist Informations- und Schulungsmaterial in Form von gedruckten Handbüchern, Schnellstartanleitungen oder Online-Video-Tutorials an. In Ergänzung dazu suchen Nutzer häufig eigenständig im Internet (z.B. YouTube) nach Hilfe. Diese Formen der Unterstützung bieten jedoch nur eine *passive* Unterstützung der Informationsvermittlung und beziehen das eigentliche Gerät nicht *aktiv* ein. Infolgedessen müssen Lösungen auf Problemstellungen vor, während oder nach der Nutzung eines Systems durch *proaktives* Suchen gefunden werden. Der Technologie des *Projection Mappings*, welche auch als projektionsbasierte Spatial Augmented Reality bezeichnet wird, beschreibt nach Raskar et al. (1998) einen technologischen Prozess, bei dem ein digitales Bild mithilfe eines Videoprojektors (Beamers) auf ein beliebiges physisches Objekt projiziert wird. Techniken des Projection Mappings finden bislang nur eine sehr geringe Verbreitung und begrenzen sich vor allem auf den Einsatz in den Bereichen des Entertainments und durch klassische „Pick-by-light“-Systeme im Rahmen industrieller Montage.

In diesem Beitrag untersuchen wir, ob und wie Projection Mapping zur Unterstützung der Aneignung beim Umgang komplexer und kontextspezifischer Technologien eingesetzt werden kann. Dazu führen wir zu Beginn in das Konzept der Aneignungsunterstützung, der Sociable Technologies sowie des Projection Mappings ein (Kapitel 2). Darauf basierend konzipieren wir eine projektionsbasierte Unterstützung verschiedener Wissens Ebenen und implementierten das System *Projection 3D-Printing*, welches durch den Einsatz von Projection Mapping die Aneignung eines 3D-Druckers unterstützt (Kapitel 4). Aufbauend darauf evaluierten wir dessen Usability durch den Einsatz von Interviews, Nutzungstests und Eye-Tracking (Kapitel 5). Durch unsere Studie tragen wir zum einen zu dem existierenden CSCW-Diskurs um Aneignungsunterstützung, sowie zum anderen zu dem HCI-Diskurs um projektionsbasierte und nutzerorientierte Interaktions- sowie User-Interface-Designs bei.

## 2 Aneignungsunterstützung und Projection Mapping

Aneignung kann als ein Prozess verstanden werden „*by which people adopt and adapt technologies, fitting them into their working practices. It is similar to customisation, but concerns the adoption patterns of technology and the transformation of practice at a deeper level*“ (Dourish, 2003). Dieses Verständnis hat seine Wurzeln in etablierter CSCW- und HCI-Literatur, wo die Aneignung mit dem Prozess der Anpassung neuer Technologien an die Praktiken der Nutzer im jeweiligen Kontext verbunden ist. Das Konzept der *Aneignung* geht

dabei tiefer als jenes der *Anwendung* oder *Anpassung* von Technologien, da es grundlegende Veränderungen in der Praxis umfassen kann und auch jene Möglichkeit mit einschließt, dass Nutzer die Technologie auf eine Weise übernehmen und in Praxis nutzen, die von ihren Herstellern im Vorfeld nicht zwangsweise so konzipiert wurde (Pipek & Wulf, 2009).

## 2.1 Aneignungsunterstützung und Sociable Technologies

Die Aneignung von Softwaresystemen ist bereits ein etablierter Diskurs in der CSCW. Unter dem Begriff der Aneignungsunterstützung untersuchten beispielsweise Pipek & Wulf (2009), wie Funktionalitäten für die kollaborative Aneignung und die Verbindung von Benutzern eines Groupware-Systems gestaltet werden können. Stevens et al. (2009) konzipiert ein Framework, das neben den Kernfunktionen des Systems (z.B. eines CAD-Tools) auch Funktionen „der zweiten Ebene“ enthält, welche Funktionalitäten zur kollaborativen Aneignung wie die Integration partizipativer Feedback-Tools in die Eclipse IDE umfassen.

Frühe Studien der Aneignungsunterstützung fokussieren rein auf Software-Anwendungen und umfassen keine physisch-materiellen Elemente beteiligter Hardware (Dourish, 2003; Stevens et al., 2009). Bei der Nutzung von Hardware bzw. komplexer Maschinen lassen sich aber ebenfalls starke kommunikative als auch kollaborative Aneignungsaktivitäten beobachten, welche ein Verständnis über die Funktionsweise der Maschine bedingen. Ludwig et al. (Ludwig et al., 2014) zeigten bereits auf Basis einer empirischen Studie in zwei Maker-Communities die Probleme und Herausforderungen bei der Aneignung von hardwarenahen Technologien am Beispiel von 3D-Druckern. Eines der Hauptprobleme dabei war, dass die Herangehensweise an 3D-Druck ein „*constant mix of experimenting and watching tutorials*“ (Ludwig et al., 2014) ist und nicht zuletzt semi-professionelle Anwender in der Regel keine Fachliteratur oder Handbücher im Vorfeld lesen, sondern direkt – auch im Austausch mit ihren Kollegen – versuchen zu drucken. Dadurch fehlte ihnen das theoretische Grundlagenwissen über die einzelnen Komponenten und Funktionsweisen des 3D-Druckers, was die spätere Problemfindung und deren -lösung durch eine hohe physische Kontextabhängigkeit wie Raumtemperatur, Zugluft, Erschütterungen, etc. erschwerte. Auf Basis der Problemstellungen konzipierten Ludwig et al. (2014) die Idee der Sociable Technologies als eine Form der hardwareintegrierten Aneignungsunterstützung. Durch zusätzliche integrierte Sensorik, neue Formen der Visualisierung und kollaborative Werkzeuge sollen die Maschine bzw. das Gerät selbst als Kommunikationsmedium fungieren. Ziel ist dabei, dass die Maschine sowohl Informationen über die eigene Funktionsweise übermittelt und dadurch die „Black Box“ aufbricht als auch in Form eines in die Hardware integrierten sozialen Aneignungsnetzwerk die jeweiligen Nutzer der Maschine dazu befähigt, sich über Praktiken, Probleme und potenzielle Lösungen in selbstverwalteten Communities auszutauschen. Dabei beschrieben sie drei Kontexte, welche für die Aneignung von entscheidender Rolle sind (Ludwig et al., 2017):

1. *Interner Kontext*: Bereitstellung von Informationen über interne Funktionsweise des 3D-Druckers, aktuellen Status sowie Struktur aus Komponenten und Verhalten.
2. *Sozio-materieller Kontext*: Beispielsweise Standort und Umgebung, Daten zur Umgebung wie Raumtemperatur, Wartung oder Nutzer-/Nutzungsdaten.
3. *Aufgaben-/prozess-Kontext*: z.B. genutzte Technologien, Position innerhalb der Produktionskette oder im Prozess sowie Zweck und Ziel der Maschinennutzung.

## 2.2 Projection Mapping und Anwendungsfälle

Der Begriff des Projection Mapping beschreibt einen technologischen Prozess, bei dem ein digitales Bild mithilfe eines Videoprojektors auf ein beliebiges physisches Objekt projiziert wird (Raskar et al., 2001). Die Oberfläche des Objekts muss dabei im Gegensatz zu einer herkömmlichen Projektion auf eine weiße Leinwand nicht flach sein, sondern kann eine variabel-geformte Struktur aufweisen. Das Projection Mapping hat in den vergangenen Jahren vor allem in den Bereichen Werbung, Entertainment, Museums- und Kunstaustellungen sowie der Architektur Einzug erhalten. Ihren Ursprung hat die Technologie in einer ersten patentierten Anwendung im Jahre 1969 in der Attraktion „Haunted Mansion“ im Disneyland-Themenpark. Videoaufnahmen eines singenden, menschlichen Gesichts wurden dabei passgenau auf plastische Büsten projiziert (Abb. 1, Mine et al., 2012). Seitdem hat sich die Projektionstechnologie verbessert, so dass Projection Mapping vor allem im Kontext der Popularität von Mixed- und Virtual Reality einen verstärkten Einsatz findet (Jones et al., 2014).

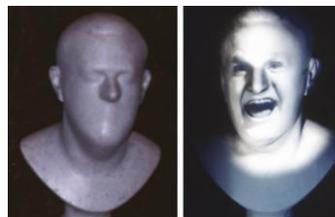


Abbildung 1: Disney's Singing Busts

Die grundlegende Technologie ist nicht nur unter ‚Projection Mapping‘ bekannt, sondern geht auf die in wissenschaftlichen Publikationen etablierte „Spatial Augmented Reality“ (SAR) zurück. Dabei sind neben der Bereitstellung eines Projektionssystems, das Informationsinhalte passgenau auf ein physisches Objekt projiziert, auch die eigentlichen Inhalte zu generieren und in nutzerorientierter Form visuell aufzubereiten. Eines der ersten Anwendungsszenarien projektionsbasierter SAR-Systeme stellt der „Luminous Room“ (Underkoffler et al., 1999) aus dem Jahr 1999 dar, welcher den Einsatz von digitalen grafischen Projektionen auf realen Oberflächen des Raums wie Tischen und Wänden aufzeigen. Bei dem *IllumiRoom* (Jones et al., 2013) und *RoomAlive* (Jones et al., 2014) kommen mehrere Projektoren zur Vergrößerung der raumfüllenden Darstellung digitaler Inhalte zum Einsatz. Die Tangible-Interface-Projekte *Illuminating Clay* (Piper et al., 2002) sowie *Inner Garden* (Roo et al., 2017) veranschaulichen die Projektion auf unebene Flächen mit wechselnden Geometriestrukturen am Beispiel einer Tiefenkamera und einem mit Sand gefüllten Kasten. Im Hinblick auf eine verbesserte Qualitätssicherung stellen Rüter et al. (2013) ein projektionsbasiertes SAR-System vor, welches Mitarbeiter eines Krankenhauses bei der Reinigung von medizinischen Instrumenten unterstützt. Einen Schwerpunktbereich der Forschung zu projektionsbasierten SAR-Systemen stellt die manuelle Fertigung und Montage in der Industrie dar, wobei Montageanweisungen schrittweise mithilfe einer in-situ Projektion auf die Montagefläche projiziert (Funk et al., 2015; Zhou et al., 2011) und ergänzend ein bidirektionale Interaktion mittels Gestenerkennung konzipiert werden (Höcherl et al., 2016). Weichel et al. (2015) haben mit ihrem ReForm-System bereits SAR auf den 3D-Druck angewendet, um ein physisches und das zugehörige digitale Druckobjekt bidirektional verändern zu können. Hierbei wird das digitale Modell mittels eines Beamers auf eine transparente Fläche zwischen Nutzer und Druckobjekt projiziert, um die Änderungen zu visualisieren.

### 3 Konzept und Implementierung

Die Erkenntnisse zur Praxis und Aneignung des 3D-Drucks (Ludwig et al., 2014) zeigen, dass zur Problemreduktion vor allem ein Verständnis für die grundlegende Funktionsweise des 3D-Druckers beiträgt. Bei bisherigen Umsetzungen von Sociable Technologies als innovative Form der hardwarenahen Aneignungsunterstützung treten häufig Probleme bei einer Vielzahl von Medienbrüchen, Sprachbarrieren durch Fachterminologie sowie fehlenden Orientierungshilfen auf, welche Fragen einer effektiven Form der Visualisierung aufwerfen (Ludwig et al., 2017). Diese Arbeit verfolgt die Adressierung der Problematik des 3D-Druckers als „Black Box“ mittels Projection Mapping. Folglich gilt es, den Nutzer durch vermittelte Informationsinhalte sowohl in der Aneignung von Grundlagen- als auch von Fachwissen zu unterstützen. Die notwendige Expertise, die bisher durch die Community, Online-Hilfe oder Literatur einbezogen wird, fließt daher in die Wissensbasis des Projection 3D-Printing-System (Abb. 2) zur Aneignungsunterstützung ein. Die visuelle Komponente bildet hierbei das Projection Mapping, welches durch eine in-situ Projektion auf dem 3D-Drucker realisiert wird. Dabei werden verschiedene aneignungsunterstützende Szenarien vorgesehen:

- Projektion grafischer, textueller sowie animierter Informationsinhalte auf dem 3D-Drucker sowie angrenzender Tischflächen
- Visuelles in-situ Highlighten von Objekten in Form spezifischer technischer Bauteile am 3D-Drucker sowie notwendiger Werkzeuge
- In-situ Projektion von Videoanleitungen zur Vermittlung komplexer Arbeitsschritte

Neben Projection Mapping, als visueller Komponente einer multimodalen Informationsvermittlung, wird ergänzend eine auditive Unterstützung vorgesehen, um anlehnend an bisher verwendete Video-Tutorials auch verbale Erläuterungen einfließen zu lassen. Dies war ein Audio-Guide zur Ergänzung der projizierten Informationen und Anweisungen sowie Hinweis-Sounds, etwa bei Warnung vor möglichen Gefahren, die in Form von Verbrennungs- oder Quetschungsgefahr vom Drucker ausgehen.

Die Konzeption der multimodalen Kommunikation schließt ferner die Schaffung einer visuellen Schnittstelle zur Steuerung der Funktionen des Projection 3D-Printing-Systems durch eine grafische Benutzerschnittstelle. Experimentell wurde herausgefunden, dass eine vertikale, um etwa 20 Grad geneigte Aufhängung horizontal mittig über dem 3D-Drucker die größtmögliche Projektionsfläche mit minimalem Schattenwurf auf die gewählte Druckerkonstruktion ermöglicht. Daher wurde eine eigens an- und fernsteuerbare Beamerhalterung konstruiert (Abb. 2, A, B) und Kalibrierungstests durchgeführt (Abb. 2, C-F), um den Beamer optimal auszurichten. Die Funktionsweise der Anwendung ist im Folgenden erklärt.

*Schaffung von Grundlagenwissen:* Ludwig et al. (2014) zeigten bereits, dass Nutzer in der Praxis zu Beginn oft durch eine spielerisch motivierte Mentalität des Hands-on sowie Probiefreudigkeit vorgehen und ein begrenztes Wissen zur Nutzung eines 3D-Druckers aufweisen. Der Erwerb von Grundlagenwissen und das Verständnis von Fachterminologie wird daher in Form des Szenarios „3D-Druck Entdecken“ vermittelt. Hierbei wird zunächst das spezifische Druckermodell und der technische Aufbau betrachtet, wobei Bauteile und Druckmaterialien mit ihren Fachbegriffen und deren Handhabung explizit aufgegriffen werden.

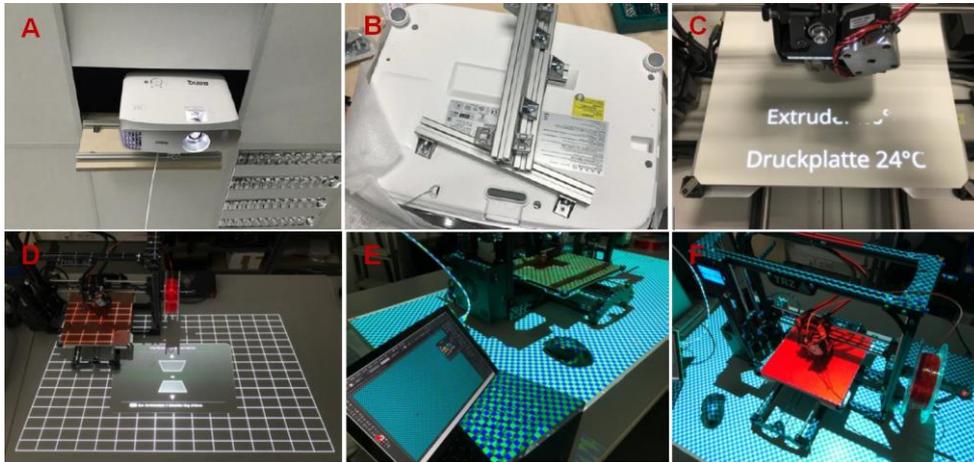


Abbildung 2: Beamerhalterung (1,2) und Kalibrierungstests (3-6)

**Bedienkompetenz & Prozesswissen:** Die Bedienkompetenz und Vermittlung von Prozesswissen werden durch die schrittweise unterstützte Durchführung eines 3D-Druckjobs vermittelt. Ein ausgewähltes digitales 3D-Modell aus einer Druckobjektgalerie wird dabei schrittweise erläutert. Der Prozess des Druckobjektes startet mit einer Vorbereitungsphase, in welcher der 3D-Drucker notwendige Aufheizprozesse durchführt. Zudem wird der Nutzer in manuell durchzuführenden Handlungsschritten aktiv angeleitet. Es folgt der eigentliche Druckprozess, wobei Kontextfaktoren wie Druckparameter und -temperatur projektionsbasiert visualisiert werden. Anschließend folgt eine Prüfung, ob das Modell korrekt gedruckt wurde, oder ob Fehlerbehebungen notwendig werden. Durch schrittweise Unterstützung der Durchführung des Druckjobs wird das bisherige Experimentieren durch eine strukturierte Form der Aneignungsunterstützung unterstützt.

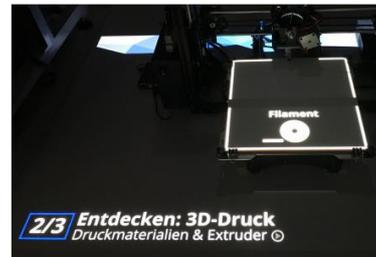


Abbildung 3: 3D-Drucker entdecken

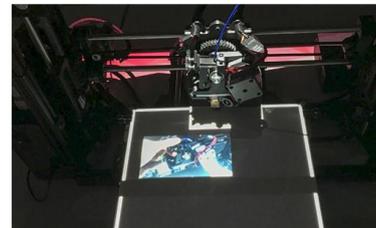


Abbildung 4: In-situ Videos

**Fehlerbehebung & Fachwissen:** Da Ludwig et al. (2014) zeigten, dass die Fehleridentifikation Probleme bereitet, fokussiert der dritte Bereich auf die Fehlerbehebung bei gleichzeitiger Schaffung eines vertieften Fachwissens. Auf Basis einer Vielzahl möglicher, druckerspezifischer Problembilder wie bspw. das Lösen des Drucks von der build plate oder fehlerhafte Filament-Zufuhr wird der Nutzer schrittweise darin unterstützt werden, mögliche Fehlerursachen zu identifizieren und zu beheben. Das dabei vertiefte Fachwissen kann den Nutzer zukünftig dazu befähigen, Probleme noch vor ihrem Eintreten zu erkennen.

**Wartung & Präventionswissen:** Neben der Realisierung von Druckobjekten und der Lösung auftretender Probleme zeichnet sich der 3D-Druck auch durch Wartungsaktivitäten aus. Hierbei werden teilweise komplexe manuelle Arbeiten durch den Nutzer am 3D-Drucker

notwendig, welche zur korrekten Durchführung entsprechendes Fachwissen erfordern. Hierdurch ergibt sich ein Unterstützungsbedarf, welcher exemplarisch durch die Aneignung des Druckmaterialwechsels realisiert wird.

## 4 Evaluation

Um das projektionsbasierte Bediensystem hinsichtlich praktischer Nutzbarkeit und Aneignungsunterstützung zu testen, wurde eine Evaluation mit 12 Studenten und wissenschaftlichen Mitarbeitern (10 männlich und 2 weiblich, Durchschnittsalter 31 Jahre) in drei Schritten durchgeführt. Die Teilnehmer wurden dabei an der Universität akquiriert. Zuerst wurde der Erfahrungsstand des Teilnehmers durch ein semi-strukturiertes Leitfaden-Interview erhoben. Die zweite Phase erfolgte durch einen aufgabenorientierten Usability-Test, wobei die Aufgaben mithilfe des Systems erfüllt werden sollten. Die durchzuführenden Aufgaben teilten sich dabei (1) Versuche, dich mithilfe des Projection-3D-Printing System mit dem 3D-Druck vertraut zu machen; (2) Drucke einen Uni-Siegen-Schlüsselanhänger; (3) Behebe den aufgetretenen Druckfehler (Unvollständiger Objektdruck); (4) Wechsle das aktuell im Drucker befindliche Filament aus. Um die Denkweisen des Nutzers zu verstehen und handlungsorientiert auswerten zu können, wurde dabei die retrospektive Thinking-Aloud Methode (mit Audiorecorder) angewendet. Zusätzlich sollte evaluiert werden, inwiefern das Projection-Mapping die Wissensvermittlung und Interaktion zwischen dem Nutzer und dem Bediensystem unterstützt. Um die Effekte und die intendierte Blick- und Aufmerksamkeitsfokussierung des Nutzers durch die Projektionskomponente zu evaluieren, wurde auf die Eye-Tracking-Brille Tobii Pro Glasses 2 zurückgegriffen (Abb. 5, links). Die Blickaufzeichnung wurde anschließend für jedes Szenario aggregiert, als auch fokussiert für einzelne Unterstützungsfunktionen (in-situ Highlighting, in-situ Video-Projektion etc.) ausgewertet, wodurch Rückschlüsse darauf gezogen wurden, welche visuellen Grafikelemente einen gewünschten Effekt der Blick- und Aufmerksamkeitsfokussierung unterstützen.

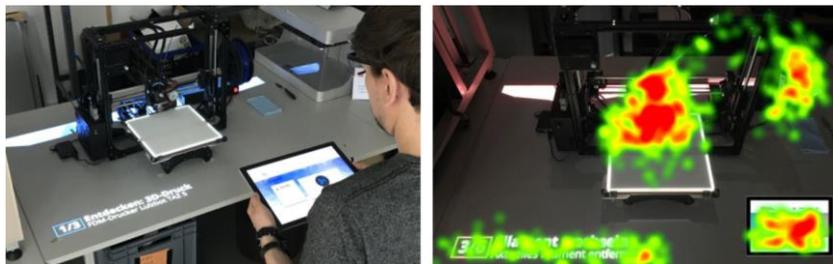


Abbildung 5: Evaluationsaufbau (links), Eye-Tracking Heatmap (rechts)

Die einleitende Frage des Pre-Test-Interviews befasste sich mit dem Vorerfahrungs- und Kenntnisstand des Teilnehmers zum 3D-Druck, wobei alle 12 Teilnehmer bereits einen 3D-Drucker gesehen hatten. Allerdings hatten lediglich vier von zwölf Probanden bereits einen 3D-Drucker bedient. Im Hinblick auf die Gestaltung von 3D-Objekten, welche die Ausgangsbasis eines 3D-Drucks darstellen, wiesen fünf von zwölf Teilnehmern entsprechende Kenntnisse zur 3D-Objektmodellierung auf.

Bei dem Usability-Test nahmen die Teilnehmer unmittelbar und intuitiv das Control-Tablet zur Hand, um die angezeigten Funktionen in der „Home“-Übersicht zu betrachten. Anschließend navigierten alle Nutzer zur „Entdecken“-Landingpage, woraufhin die Projektion auf dem 3D-Drucker sowie der Audio-Guide über die nun auswählbaren Entdecken-Funktionen informierten. Die ersten Reaktionen nach erfolgreicher Erkundung des 3D-Drucks fielen sehr positiv aus. Die gewählte Form der projizierten Wissensvermittlung wurde bereits im ersten Szenario zum Entdecken des 3D-Drucks als Besonderheit wahrgenommen: *„Also erstmal vom ganzen Setting her muss ich sagen, dass mich das so sehr beeindruckt, dass ich teilweise kaum gefolgt bin, weil ich vom Setting her so angetan war“ (EP4)*. Entsprechend fällt einigen Evaluationspartnern bereits im Aufgabenszenario der Nutzen der projizierten und insbesondere ortsbasierten Wissensvermittlung auf: *„Als zwischendurch gesagt wurde, es gibt hier eine Filamentrolle, einen Extruder und ein Hotend: Das fand ich ziemlich gut, dass dann die Flächen beleuchtet wurden. Ist ähnlich wie wenn zwei Personen vor dem Drucker stehen und der eine sagt "Hier auf der Rolle ist das Filament" – also quasi über die Visualisierung und das weiße Feld simuliert dann quasi die Zeige-Geste“ (EP6)*. Es wurde zu diesem frühen Zeitpunkt bereits ein Vergleich mit etablierten Medien zur Informationsvermittlung gezogen: *„Du kannst dir natürlich auch ein Video angucken, aber so stehst du davor und hast es an deinem Gerät und weißt, gleich kannst du loslegen. Von daher ist das genau abgepasst und bereitet dich am Objekt direkt vor, statt so anonym und generisch über ein Video“ (EP4)*.

Bei dem Szenario „3D-Druckjob durchführen“ wurde vor allem die während der Nutzung vermittelte Sicherheit durch das Bediensystem und die nachvollziehbare Segmentierung hervorgehoben: *„Man fühlt sich so sicher angeleitet, dass ich nie das Gefühl habe, ich mach was kaputt. Ich hatte überhaupt keine Schwierigkeiten“ (EP4)*. Geht es anschließend um die Überprüfung des Druckmaterials, griffen alle Teilnehmer nach projektionsgestütztem Highlighting zur Filamentrolle und stellten die leichte Zuführung des Materials zum Druckkopf sicher. Das Aufleuchten von Druckmaterial und Druckkopf in Kombination mit den Hinweisen des Audio-Guides animiert die Nutzer somit zur direkten Technikinteraktion. Neben der positiv wahrgenommenen Segmentierung des 3D-Druckjobs in neun Einzelschritte wurden weiterhin auch die projizierten Warn-, Temperatur- und Fortschrittshinweise als informative Elemente genannt: *„Besonders, dass die Temperatur dargestellt wird: Welcher Wert gerade erreicht ist und wie lange es noch dauert [...]; das hilft dann schon Einiges. Kann mir vorstellen, wenn das nicht wäre, dann steht man einfach nur rum und weiß gar nicht, wann es fertig ist“ (EP1)*. Ähnliche Ergebnisse zeigte auch das Szenario „Hilfe und Fehlerbehebung“.

Das Szenario „Wartung und Filamentwechsel“ umfasste komplexe Detailarbeiten, wie das Lösen der Filamentklemme am 3D-Drucker und wie dies verständlich mit Detailvideos vermittelt werden kann. *„Das Video hat extrem geholfen. Ich wusste durch das Blinken genau, wo ich was machen zu machen habe und das Video hat das nochmal unterstützt. Das Problem ist halt: Gerade bei Hardware macht man schnell Sachen, die man nicht mehr mit einem Klick rückgängig machen kann – nach dem Video fühlte man sich sicher“ (EP8)*. Auch gab es eine Reihe von Verbesserungsmöglichkeiten wie einer schnelleren Abspielgeschwindigkeit der Audioaufzeichnungen und Videos.

Nach Analyse der Eye-Tracking-Daten (Abb. 5, rechts) wurde geschlossen, dass sich der Blickfokus des Nutzers durch das Projection Mapping wie intendiert steuern lässt. Dies kann

nicht nur durch das Hervorheben von Elementen und Werkzeugen erfolgen, sondern auch durch grafisch animierte Projektionselemente, wie Warnsymbole, Bauteil-Icons sowie Temperaturinformationen. Die bauteilnah projizierten Instruktionsvideos unterstützten die Durchführung der Tätigkeit, indem die Aufmerksamkeit des Nutzers darauf gelenkt wird. Weiterhin zeigte sich durch die Blickdatenanalyse, dass der Einsatz des Control-Tablets ein geeignetes Interface als zentrales Steuerelement des Projection 3D-Printing-Systems darstellt.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch Konzeption, Design und Evaluation des projektionsbasierten 3D-Drucker-Bediensystems „Projection 3D-Printing“ konnten einige Erkenntnisse zur Aneignungsunterstützung komplexer Technologien mittels Projection Mapping gewonnen werden. Auf Basis des Nutzerfeedbacks zeigt sich, dass durch den Einsatz multimodaler Informationsvermittlungen wie grafische, textuelle sowie animierte Informationsprojektionen in Form von in-situ Videos oder das Hervorheben von Objekten sowie durch Audio-Guide und Hinweis-Sounds die Aneignung von Beginn an unterstützt wird. Es finden vor allem die projizierten Instruktionsvideos mit explizit gezeigter händischer Interaktion großen Zuspruch. Grafische Interface-Elemente innerhalb der Projektion und des Control-Tablets, fördern ebenso die Nutzung wie Animationen, die etwa die Druckplatte als Projektionsfläche animieren.

Basierend auf dem Bediensystem ergibt sich weiterer Forschungsbedarf. Allen voran sollte untersucht werden, wie die Ergebnisse sowohl auf weitere Druckermodelle, insbesondere solche, die keine so offene Bauform aufweisen, als auch auf weitere Anwendungskontexte und technologische Artefakte erfolgen kann. So könnte Projection Mapping als grundlegende Technologie zur Aneignungsunterstützung etwa komplexe Industriemaschinen verständlicher gestalten. Zusätzlich ließe sich der Wirkungsbereich ausweiten, indem nicht nur eine Maschine, sondern auch ihr direktes Umfeld, sowie übergeordnete Produktionssysteme mit projektionsbasierten Visualisierungen als Leitsystem ausgestattet werden. Hinsichtlich der Interaktion wäre neben dem User-Input via Touchscreen des Control-Tablets zukünftig auch eine gestenbasierte Steuerung der Systemfunktionen möglich. Weiterhin könnte eine Erweiterung um Community-Aspekte erfolgen. Darunter könnten eine Remote-Fehlerbehebung durch Experten sowie der Austausch über Druckprojekte verstanden werden. Diese zusätzlichen Möglichkeiten würden im Sinne der Sociable Technologies die Kommunikation zwischen Endnutzern ermöglichen. Abschließend konnte durch das entwickelte Projection 3D-Printing-System der Einsatz des Projection Mappings als innovative Möglichkeit einer projektionsbasierten Aneignungsunterstützung praxisorientiert mit Erkenntnissen für zukünftige Forschungsvorhaben aufgezeigt werden.

## Literaturverzeichnis

Dourish, P. (2003). The Appropriation of Interactive Technologies: Some Lessons from Placeless Documents. *Computer Supported Cooperative Work*, 12(4), 465–490.

- Funk, M., Mayer, S., & Schmidt, A. (2015). Using In-Situ Projection to Support Cognitively Impaired Workers at the Workplace. In *Proc. of the 17th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility - ASSETS '15*.
- Höcherl, J., Niedersteiner, S., Haug, S., Pohlt, C., Schlegl, T., Weber, K., & Berlehner, T. (2016). Smart Workbench. In *Zweite transdisziplinäre Konferenz zum Thema "Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen"* (pp. 49–58). Hamburg.
- Jones, B. R., Benko, H., Ofek, E., & Wilson, A. D. (2013). IllumiRoom: Peripheral Projected Illusions for Interactive Experiences. *Proc. of Conference on Human Factors in Computing Systems*, 869.
- Jones, B., Shapira, L., Sodhi, R., Murdock, M., Mehra, R., Benko, H., ... Raghuvanshi, N. (2014). RoomAlive: Magical Experiences Enabled by Scalable, Adaptive Projector-camera Units. *Proc. of Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '14*, 637–644.
- Ludwig, T., Boden, A., & Pipek, V. (2017). 3D Printers as Sociable Technologies: Taking Appropriation Infrastructures to the Internet of Things. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 24(2).
- Ludwig, T., Stickel, O., Boden, A., & Pipek, V. (2014). Towards Sociable Technologies: An Empirical Study on Designing Appropriation Infrastructures for 3D Printing. In *Proc. of DIS14 Designing Interactive Systems* (pp. 835–844). Vancouver, Canada.
- Mine, M. R., Van Baar, J., Grundhöfer, A., Rose, D., & Yang, B. (2012). Projection-based augmented reality in Disney theme parks. *Computer*, 45(7), 32–40.
- Pipek, V., & Wulf, V. (2009). Infrastructuring: Towards an Integrated Perspective on the Design and Use of Information Technology. *Journal of Association for Information Systems*, 10(5), 447–473.
- Piper, B., Ratti, C., & Ishii, H. (2002). Illuminating Clay: A 3-D Tangible Interface for Landscape Analysis. *Proc. of the Conference on Human Factors in Computing Systems*, (1), 355–362.
- Raskar, R., Welch, G., Low, K.-L., & Bandyopadhyay, D. (2001). Shader Lamps: Animating Real Objects With Image-Based Illumination, 89–102.
- Roo, J. S., Gervais, R., Frey, J., & Hachet, M. (2017). Inner Garden. *Proc. of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '17*, 1459–1470.
- Rüther, S., Hermann, T., Mracek, M., Kopp, S., & Steil, J. (2013). An assistance system for guiding workers in central sterilization supply departments. *Proc. of the 6th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments - PETRA '13*, 1–8.
- Stevens, G., Pipek, V., & Wulf, V. (2009). Appropriation Infrastructure: Supporting the Design of Usages. In B. De Ruyter, V. Pipek, M. B. Rosson, & V. Wulf (Eds.), *Proc. of International Symposium on End-User Development* (pp. 50–69). Heidelberg, Germany: Springer.
- Underkoffler, J., Ullmer, B., & Ishii, H. (1999). Emancipated Pixels: Real-World Graphics In The Luminous Room, 385–392.
- Weichel, C., Hardy, J., Alexander, J., & Gellersen, H. (2015). ReForm: Integrating Physical and Digital Design through Bidirectional Fabrication. *Proc. of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*.
- Zhou, J., Lee, I., Thomas, B., Menassa, R., Farrant, A., & Sansome, A. (2011). Applying spatial augmented reality to facilitate in-situ support for automotive spot welding inspection. *Proc. of the Internat. Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry*, 1(212).