

# Personal Photonics: Neue Benutzerschnittstellen für Open Innovation mit Photonik-Werkzeugen

Schlussbericht zum BMBF-Vorhaben Personal Photonics

RWTH Aachen University
Lehrstuhl für Medieninformatik und Mensch-Computer-Interaktion und Fab Lab Aachen Human-Computer Interaction Center (HCIC) Leitung Prof. Dr. Jan Borchers
Adresse: Ahornstraße 55, 52074 Aachen
<a href="http://hci.rwth-aachen.de">hci.rwth-aachen.de</a>
Ansprechpartner: Prof. Dr. Jan Borchers Tel: (0241) 80-21050 Fax: (0241) 80-22050 <a href="mailto:borchers@cs.rwth-aachen.de">borchers@cs.rwth-aachen.de</a>

# Inhaltsverzeichnis

<b>I. Kurze Darstellung</b>	<b>1</b>
Aufgabenstellung . . . . .	1
Voraussetzungen . . . . .	1
Planung und Ablauf des Vorhabens . . . . .	2
Wissenschaftlicher und technischer Stand zum Projektstart . . . . .	4
Start Teilprojekt A: HaptiVision Toolkit . . . . .	4
Start Teilprojekt B: iWand . . . . .	5
Start Teilprojekt C: Photonik-Arduino-Workshops . . . . .	6
Start Teilprojekt D: Dissemination . . . . .	6
<b>II. Eingehende Darstellung</b>	<b>7</b>
Erzieltes Ergebnis . . . . .	7
Ergebnisse Teilprojekt A: HaptiVision-Toolkit . . . . .	7
Ergebnisse Teilprojekt B: iWand/ARPen . . . . .	13
Ergebnisse Teilprojekt C: Photonik-Arduino-Workshops . . . . .	20
Ergebnisse Teilprojekt D: Dissemination . . . . .	24
Verwertbarkeit der Ergebnisse . . . . .	35
Weiterführende Forschungsarbeiten . . . . .	36
Open-Source Releases . . . . .	36
Veröffentlichung der Ergebnisse . . . . .	37
Teilprojekt A: HaptiVision-Toolkit . . . . .	37
Teilprojekt B: iWand/ARPen . . . . .	38
Teilprojekt D: Dissemination . . . . .	39
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>41</b>
<b>Literatur</b>	<b>43</b>

# I. Kurze Darstellung

## Aufgabenstellung

**Ziel** des Projekts *Personal Photonics* war, Photonik-Werkzeuge für die digitale Fabrikation auch für Nichtexperten benutzbar zu machen und die aus diesen neuen Einsatzfeldern resultierenden kreativen Impulse wiederum der Photonikindustrie zuzuführen. Zu diesen Nichtexperten gehören Heimanwender, „Maker“, Selbständige, Startup-Unternehmen und KMUs, deren Kerngeschäft nicht die Photonik selbst ist, sondern die diese Werkzeuge in anderen Projekten oder Geschäftsideen zur digitalen Fertigung physikalischer Produkte einsetzen wollen.

Dazu reichte eine graduelle Verbesserung der „Usability“ wie bei der typischen Produktentwicklung und Optimierung traditioneller Bedienkonzepte nicht aus, sondern es mussten gänzlich neue Interaktionstechniken für diese Werkzeuge für Nichtexperten entstehen (ein Beispiel wären Gesteneingaben für die 3D-Modellierung durch Nichtexperten). Die persönliche digitale Fabrikation hat ein großes Potenzial: die individualisierte, computerbasierte Fertigung von Produkten. Viele dieser Werkzeuge basieren auf Photonik, vom Lasercutter über 3D-Scanner bis zum 3D-Lasersinterdrucker. Damit diese Werkzeuge aber durch die breite Öffentlichkeit als „persönliche“ Werkzeuge Verwendung finden können, mussten ihre Formfaktoren und Benutzerschnittstellen neu gedacht werden.

Bei der Forschung und Entwicklung von Photonik-Werkzeugen stand zumeist die technische Entwicklung im Zentrum, und die Benutzerschnittstelle wurde nur für Ingenieure und ähnliche Experten-Anwender in professionellen Nutzungsszenarien entwickelt. Dadurch sind diese Geräte für die Gruppe der Nichtexperten vielfach umständlich zu benutzen. Oft erschließt sich so der potenzielle Nutzen von Photonik-Werkzeugen dem Anwender gar nicht erst; innovative Anwendungsmöglichkeiten bleiben so unerkannt und unerschlossen. Die Ergebnisse dieses Projekts sollten dieses Potenzial der *Personal Photonics* durch einen neuen Fokus auf innovative, nutzergerechte Interaktionstechniken für diese Werkzeuge erschließen. Darüber hinaus sollte die Evaluierung dieser Werkzeuge mit Nichtexperten deren Innovationspotenzial für die Photonikindustrie öffnen.

## Voraussetzungen

In den 80er Jahren wurden Computer für die breite Öffentlichkeit bezahlbar. Die weltweite **PC-Revolution** als „**erste digitale Revolution**“ jedoch wurde erst durch die Entwicklung neuer **Anwendungsgenres** wie der Tabellenkalkulation und neuer **Interaktionstechniken** wie Maus und graphischer Benutzerschnittstelle möglich. Sie erlaubten es Privatanwendern, Selbständigen und KMUs, Computer für eigene Aufgaben kreativ einzusetzen. Dadurch verbreitete und entwickelte sich das PC-Konzept im Geschäfts- und Privatleben explosionsartig, oft getrieben von **Open-Source**-Projekten wie Unix/Linux.

Dasselbe zeigte sich bei der Etablierung des **Internets** als „**zweite digitale Revolution**“: Erst der graphische Web-Browser als Benutzerschnittstelle machte das Internet sowohl für Erzeuger von Online-Inhalten und -diensten als auch für eine breite Basis von Endanwendern benutzbar und damit attraktiv. Wiederum beflügelten in der Folge kreative Nutzer mit neuen, oftmals **Community-basierten** Anwendungs- und Geschäftsideen diese Revolution bis heute.

In den letzten Jahren sind **digitale Produktionstechnologien** in ähnlicher Weise für Endanwender erschwinglich geworden, und derzeit erhält in der häufig als „**dritte digitale Revolution**“ bezeichneten **Personal Fabrication** die breite Öffentlichkeit über 3D-Drucker, Lasercutter etc. Zugang zu rentablen Fertigungsverfahren für – derzeit noch einfache – physische Objekte nach individuellen Bedürfnissen und in Losgröße 1. Die **Photonik** hat so in vielen Einsatzfeldern in der Industrie und im Consumerbereich, z.B. in der Unterhaltungselektronik, bereits entscheidende Durchbrüche ermöglicht.

Ein Großteil der Photonik-Forschung vor Beginn dieses Projekts konzentrierte sich auf technische Verbesserungen vorhandener Prozesse und Produkte, insbesondere Fertigungswerkzeugen mit Fokus auf industrielle, professionelle Nutzer. Personal Photonics hingegen entschied sich, den Einsatz durch Nichtexperten mit einem Fokus auf neue Bedienkonzepte und Interaktionstechniken zu behandeln.

Diese Konzentration auf neue Bedienschnittstellen von Photonik-Werkzeugen für Nichtexperten sollte helfen, einen neuen Anwenderkreis und damit Absatzmarkt für diese Personal-Photonics-Technologien zu erschließen, sodass die Photonik als eine Schlüsseltechnologie im Zentrum der „Revolution“ der Personal Fabrication wahrgenommen wird. Die neuen, einfach bedienbaren Werkzeuge würden außerdem Nichtexperten die Entwicklung innovativer Produkte und Dienstleistungen ermöglichen und den technischen Fortschritt und die wirtschaftliche Entwicklung im Land unterstützen.

## **Planung und Ablauf des Vorhabens**

Insgesamt wurde das Vorhaben in vier parallelen Teilprojekten A–D durchgeführt. In den ersten beiden Teilprojekten A und B wurde die Photonik genutzt, um Makern innovative Tools – (A) das *HaptiVision Toolkit* und (B) den *iWand/ARPen* – an die Hand zu geben, mit denen sie selbst Objekte designen und mittels digitaler Fabrikation fertigen und mit haptischer bzw. photonischer Ausgabe erweitern konnten. Im dritten parallelen Teilprojekt C wurden Photonik-Aspekte mit Arduino- Mikrocontrollern in Workshops und über ein deutschlandweites Verleihsystem einem breiten Publikum erfahrbar gemacht. Das vierte Teilprojekt D entwickelte sich erst im Laufe des Projekts durch die erkannten Bedarfe und den Dialog mit dem Projektträger. Hier wurden regelmäßige Community Events organisiert, Beispielprojekte umgesetzt und Poster und Lernkarten publiziert, um der Community und neuen Nutzern die Möglichkeiten für sie zentraler Photonikwerkzeuge zu demonstrieren und zu erklären.

Im Teilprojekt **(A) HaptiVision Toolkit** wurde ein Toolkit zur Übersetzung optischer Signale aus **Tiefenbildern** in **haptische Muster** entwickelt. Dazu wurden zunächst konkrete Demonstratoren wie eine haptische Weste und ein haptisches Armband entwickelt. Anschließend wurde das Toolkit auf beliebige geometrische Formen erweitert, sodass mit dem HaptiVision Toolkit andere Gegenstände entwickelt werden können, die Tiefenbildinformationen erfassen, in haptische Signale übersetzen und an Felder von haptischen Aktuatoren auf der Oberfläche des Gegenstands weitergeben.

Im Teilprojekt **(B) iWand** wurde ein photonischer Stift zur in-situ-Erstellung von 3D-Modellen entwickelt. Nach einer Reihe von Experimenten sowohl mit aufwändiger Labor-Trackingtechnologie (VICON) als auch mit kostengünstigen Kameras (Pixycam) wurde eine Möglichkeit gefunden, mit einem Smartphone die Position eines einfachen, mit Markern bestückten Stifts im Raum zu verfolgen. Der Stift reduzierte sich damit auf ein einfaches Design, das lediglich über Bluetooth-Buttons zur Interaktion verfügte, und es wurde sogar eine Version entwickelt, die mit einem ausgedruckten Stift auf Papier funktioniert. Diese Lösung zeigte damit, wie weithin verfügbare photonische Technologie wie Smartphone-Kameras bei Makern für neue Design-Werkzeuge genutzt werden kann. Die App ist unter dem Namen *ARPen* in Apples App Store für das iPhone frei verfügbar (<http://personalphotonics.de/arpn-ios>). Maker können mit dieser App Modelle im Raum zeichnen und durch Augmented Reality auf ihrem Smartphone sehen. Das System wurde anschließend um Funktionen erweitert, um die Erstellung beliebiger Geometrien zu ermöglichen. Da viele Fragen zu der Interaktion mit so einem beidhändigen System noch nicht klar beantwortet waren, wurde in Studien untersucht, mit welchen Techniken zum Beispiel virtuelle Objekte ausgewählt und bewegt werden können bzw. wie die Wahrnehmung der Tiefeninformationen verbessert werden kann.

Im Teilprojekt **(C) Photonik-Arduino-Workshops** wurden **deutschlandweite kostenfreie Workshops** angeboten, um mit Hilfe von Arduino-Mikrocontrollern Photonik-Aspekte einem breiten Publikum erfahrbar zu machen. Zusätzlich wurde ein **deutschlandweites Verleihsystem** etabliert, das von Initiativen wie beispielsweise Pfadfindern oder Flüchtlingsinitiativen genutzt werden kann. Teilnehmer wurden außerdem durch eine **Online-Plattform** unterstützt, die neben zahlreichen **Lernvideos** auch **Online-Support** in Form von (Video-)Telefonie, Chat oder Mail anbietet.

Im Teilprojekt **(D) Dissemination** wurde zum einen die Dokumentation zahlreicher **Beispielprojekte** als Open Source zur Verfügung gestellt, um der Community und neuen Nutzern das Potenzial von Personal Photonics aufzuzeigen. Diese Projekte wurden auf Messen, internationalen Konferenzen sowie in Workshops präsentiert. Zum anderen wurden **regelmäßige Community Events** wie der Open Lab Day im Fab Lab Aachen und das monatliche Aachen Maker Meetup organisiert, um die lokale Maker-Gemeinde zu vernetzen und einen direkten Transfer der Ergebnisse zu unterstützen. Schließlich wurden **Poster und Lernkartensets** gestaltet, um die Nutzung der wichtigsten Photonik-Werkzeuge einem breiten Kreis zu vermitteln. Die Lernkartensets zu 3D-Druck und Lasercutting wurden im bombini-Verlag als Printprodukte veröffentlicht

und gleichzeitig wie auch die Poster in PDF-Form online der Community kostenlos zur Verfügung gestellt.

## **Wissenschaftlicher und technischer Stand zum Projektstart**

Personal Fabrication hat seit der Prägung des Begriffs durch den MIT-Forscher Gershenfeld (2005) in der Wissenschaft zunehmend Fuß gefasst (Malone et al. 2007; Lipson et al. 2013). Auswirkungen auf Industrie und Gesellschaft ergeben sich unter anderem durch die Möglichkeit zur kosteneffizienten Fertigung individualisierter Produkte (Piller, 2010). Die grundlegende Frage des Antrags über neue Benutzerschnittstellen für photonische Werkzeuge der Personal Fabrication war dabei zum Projektstart erst kürzlich in den wissenschaftlichen Fokus gerückt.

### **Start Teilprojekt A: HaptiVision Toolkit**

Grundidee des HaptiVision Toolkits war die Entwicklung eines einfach zu verwendenden Sets von Hard- und Softwarekomponenten, um es Makern und anderen aus der Zielgruppe für Personal Photonics zu erleichtern, selbst Projekte zu entwickeln, die mit Photonik detektierte Informationen z.B. aus Tiefenkameras in haptische Signale umsetzen können. Der potenzielle Einsatzbereich für solche Projekte reicht von Systemen für Menschen mit Sehbehinderungen über Autositze, die haptisch auf Parkhindernisse hinweisen, bis hin zu Wearables für industrielle Arbeitsplätze.

Taktile Navigationshilfen sind ein verbreitetes Forschungsthema. Es gibt Systeme, die blinden Personen auf dem Rücken signalisieren, in welche Richtung sie gehen sollen und wann sie warten sollen (z.B. an einer Kreuzung) (Ross et al. 2000). Eine Erweiterung hierzu sind vibrotaktile Gürtel, die die Lage und Distanz zu einem Objekt in der Umgebung vermitteln. Die taktile Stimulation wurde dabei in der Intensität (Cardin et al. 2007; Mann et al. 2011) und Frequenz (Johnson et al. 2006) variiert. Ähnliche Ideen wurden mit Haptic Radar (Cassinelli et al. 2006) und SpiderSense (Dakopoulos et al. 2007) umgesetzt, oder auch durch taktiles Feedback am Kopf (Cassinelli et al. 2006; Mann et al. 2011) oder an Armen, Beinen und Torso (Mateevitsi et al. 2013). Mateevitsi et al. (2013), Segond et al. (2005) und Wu et al. (2011) bildeten (optische) Bilder auf eine niedrig auflösende vibrotaktile Matrix am Torso ab.

Alle o.g. Systeme benutzen verschiedene Abbildungsfunktionen, Intensitäten und Frequenzen, um Bildinformation haptisch abzubilden. Cardin et al. (2007) und Mateevitsi et al. (2013) bilden Änderungen in der Distanz zu Objekten linear ab, während Mann et al. (2011) und Johnson et al. (2006) eine nicht-lineare Abbildungsfunktion benutzen, um das logarithmische Verhältnis zwischen Umfang des Stimulus und der wahrgenommenen Intensität darzustellen.

Es sind auch Algorithmen bekannt, mit denen die Auflösung der Ausgabe einer niedrig-auflösenden Matrix von Aktoren mittels taktiler Illusionseffekte erhöht werden konnte, sodass glatte, kontinuierliche Vibrationsmuster erzeugt werden können (Israr et al. 2011).

An unserem eigenen Institut entwickelten Hamdan et al. (2016) den interaktiven textilen Controller „Grabrics“, der Falt-Gesten des Nutzers auf dem Textil erkennt. Zu Projektbeginn erforschte Hamdan die Integration von taktilen Komponenten, wie beispielsweise Bio-Metall-Fasern und Formgedächtnis-Polymeren, für haptisches Feedback. Diese Technologie kann dazu verwendet werden, vibrotaktilen Feedback leichtgewichtig in die Demonstratoren des HaptiVision Toolkits zu integrieren und zu skalieren.

## **Start Teilprojekt B: iWand**

Das 3D-Modellieren ist eine in der Forschung vielbetrachtete Tätigkeit. Protopiper (Agrawal et al. 2015) beispielsweise ist ein System, mit dem vor Ort Drahtgittermodelle im großen Skalierungsmaß erstellt werden können. Das mobile Gerät formt Röhren aus selbstklebender Kunststoffolie, die sich direkt miteinander verbinden lassen. So können mit dem Protopiper beispielsweise Drahtgittermodelle von Möbeln erstellt werden, um deren Anordnung im Raum vor Ort zu explorieren.

ModelCraft (Song et al. 2006) erlaubt es, 3D-Modelle von Objekten mittels Stift zu bearbeiten, indem der Nutzer mit dem Stift auf einem äquivalenten Papiermodell aus bedruckten Anoto-Papier Schnitte einzeichnet. Diese mobile Lösung kann vor Ort ohne Computer genutzt werden; die 3D-Modelle werden bei Synchronisation mit dem Computer entsprechend der Einzeichnungen auf dem Papiermodell aktualisiert.

Der 3Doodler ist ein kommerzieller 3D-Druck-Stift, der ähnlich wie eine Heißklebepistole funktioniert: Ein Kunststoffstäbchen wird in den Stift eingelegt und erhitzt, sodass der Kunststoff aus der Stiftspitze austritt und anschließend wieder verhärtet. So können 3-dimensionale physikalische Objekte im kleinen Maßstab gezeichnet werden. Das Prinzip ähnelt dem eines 3D-Druckers mit dem Unterschied, dass der Nutzer den Druckkopf durch Bewegen des Stifts selbst verschiebt.

KinectFusion erzeugt eine detaillierte 3D-Szene in Echtzeit mit Hilfe einer Tiefenkamera (Microsoft Kinect), die vom Nutzer durch die Szene bewegt wird. Ferner werden Multi-Touch-Interaktionen vom Nutzer innerhalb der Szene erkannt.

**Diese Übersicht verdeutlicht, wie sehr dieses Forschungsfeld begann, sich auf Photonik-Technologien zu fokussieren.** Grund dafür waren und sind die besonders „Informatik-freundlichen“ Eigenschaften der Photonik – so beeinflusst beispielsweise (im Gegensatz zu mechanischen Fertigungsmethoden wie dem CNC-Fräsen) bei Lasercuttern und Lasersinter-3D-Druckern das „Werkzeug“ viel weniger die Freiheitsgrade in der Fertigung, und Photonik-Werkzeuge sind damit für die Forschung leichter auf innovative Art computergesteuert zu kontrollieren.

**FuE-Aktivitäten:** In einem Workshop (Mellis et al. 2013) fand sich die internationale Forschergemeinde der Mensch-Computer-Interaktion erstmalig zusammen, um das Thema neuer Interaktionstechniken für Personal Fabrication fokussiert zu behandeln. Es waren daher international die ersten strukturiert finanzierten Forschungsprojekte explizit zu diesem Thema zu erwarten.

**Alternative** Ansätze zu diesem Problem wurden parallel kommerziell eruiert. So entwickelte Autodesk, langjähriger Produzent der professionellen 3D-Modelliersoftware AutoCAD, mit 123D gratis eine Familie neuer 3D-Modellieranwendungen für Nichtexperten. Allerdings greifen diese kommerziellen Produkte zumeist auf bestehende Benutzerschnittstellenkonzepte (Maus, Stift, Multitouch-Tablett) zurück, da sie versuchen, rasch einen großen Markt zu durchdringen. Die Innovationssprünge solcher Produkte fallen damit zwangsläufig kleiner aus, als es das vorliegende Projekt beabsichtigte.

### **Start Teilprojekt C: Photonik-Arduino-Workshops**

Dieses Teilprojekt wurde durch die InfoSphere der RWTH Aachen initiiert und durchgeführt und ist unten näher erläutert.

### **Start Teilprojekt D: Dissemination**

Dieses Teilprojekt entwickelte sich erst im Laufe des Projekts durch die erkannten Bedarfe und den Dialog mit dem Projektträger und ist unten näher erläutert.

## II. Eingehende Darstellung

### Erzieltes Ergebnis

#### Ergebnisse Teilprojekt A: HaptiVision-Toolkit

##### AP A.1: HaptiVest 1.0



Abb. 1: HaptiVision Vest 1.0

Wir haben die Anleitung zum Erstellen der Weste (s. Abb. 1) online verfügbar gemacht<sup>1</sup>. Sie enthält bereits Ergänzungen um die ersten Erweiterungen, um einen einfacheren Nachbau zu ermöglichen. Eine höhere haptische Auflösung ist durch die Begrenzung des haptischen Wahrnehmungsvermögens des Menschen nicht sinnvoll. Wir haben mit Tests das Setup am Arm mit den Ergebnissen der Fachliteratur verglichen und Zuverlässigkeitstests verschiedener Vibrationsmotoren durchgeführt (siehe u.a. Jodl, 2017). Präsentationen auf Makerfaires machten das System der Community bekannt und lieferten weiteres Feedback. Als wesentliche Kritikpunkte wurden die Lautstärke und das Aussehen angeführt.

##### AP A.2: HaptiVest 2.0

Diese Variante bot einen vereinfachten Aufbau (s. Abb. 2) mit dem Ziel verbesserter Reproduzierbarkeit mit verhältnismäßig einfachen Mitteln. Gleichzeitig wurde hier begonnen, das System im Team mit einer Designerin weiterzugestalten, um stärker auf Designaspekte zu achten, was auch das Feedback bei Präsentationen auf Fachmessen wie der Hannovermesse positiv beeinflusste.

Die Präsentationen der Weste setzten sich bis zum heutigen Tage erfolgreich fort. Der Haptik-Teil des Toolkits wurde auch über Hackaday online der Community zur Verfü-

<sup>1</sup><http://personalphotonics.de/haptichardwaretoolkit>



Abb. 2: HaptiVision Vest 2.0

gung gestellt<sup>2</sup>, wurde dort Semifinalist für den Hackaday-Preis, und er wurde auf der ISWC 2017 der wissenschaftlichen Wearables-Community präsentiert (Thar, Heller et al. 2017) sowie auf der FAB13 der Fab-Lab-Community. Das Feedback zeigte unter anderem, dass häufig Systeme mit wenigen Vibrationsmotoren benötigt werden. Die neue, kleinere Realsense-Tiefenkamera funktionierte nicht bei Tageslicht, auch einfache Time-Of-Flight-Kameras wie die Picco Flexx waren in diesem Anwendungsfall nicht verwendbar. Stereoskopiekameras wären die beste Lösung, allerdings waren diese noch relativ teuer bzw. benötigten (wie die ZED-Kamera) eine leistungsfähige Graphikkarte, was sie für den mobilen Einsatz untauglich machte. Ultraschall-3D- Bildgebung wurde wegen Problemen mit Blindenhunden von Sehbeeinträchtigten abgelehnt.

Im folgenden wurde somit eine Lösung für die Tiefensensorik gesucht. Der Aufbau eines eigenen Tiefenscanners auf Grundlage des Benewokes TFMINI Micro Lidar scheiterte als DIY-System am notwendigen Echtzeitscannen. Ein Raumscannen durch eine Montage auf zwei Servomotoren wäre möglich; für Echtzeitanwendungen müsste aber der Sensor schnell bewegt werden, um aufgrund der Updaterate des Sensors das Bild partiell mit niedrigerer Auflösung zu erneuern<sup>3</sup>. Abschließend erscheint eine Ankopplung einer solchen Weste an ein Smartphone die beste Lösung, da diese Systeme sich bezüglich Kameras und Prozessorleistung unter anderem dank des AR-Trends fortlaufend verbessern.

Der limitierte Sichtwinkel der Kamera ließe sich durch Tragen der Kamera am Kopf und damit vereinfachtes Umherschauen lösen, was instinktiv von den Trägern des Systems gemacht wird. Die Unsichtbarkeit von Glas bleibt allerdings ein Nachteil optischer Systeme.

### AP A.3: HaptiCam

Ziel der HaptiCam war ein Armband, das Tiefenkamera-Informationen in haptische Signale am Handgelenk verwandelt. Ein einfaches Arbandsystem wurde bereits relativ

<sup>2</sup><https://hackaday.io/project/27112-haptivision>

<sup>3</sup><https://hackaday.io/project/153211-lidareye-fast-3d-scanning>

früh zum Testen der Systemkomponenten und insbesondere der maximalen haptischen Auflösung am menschlichen Körper gebaut (siehe u.a. Jodl, 2017). Hier bestätigte sich bereits, dass aufgrund der geringen Auflösung und Fläche nur wenige Vibrationspunkte unterscheidbar sind. Somit ist neben den in AP 2 geschilderten Schwierigkeiten ein Tiefenkamerasystem für ein Armband nicht sinnvoll.

Stattdessen wurde eine veränderte Sensorik für einen anderen Anwendungsfall genutzt. Zum einen wurde eine Pixycam genutzt um optische Marker zu selektieren (Simulation eines einfachen Trackingsystems für Positionen im Raum). Somit könnten z.B. Türen erkennbar gemacht werden, die im geschlossenen Zustand für die HaptiVest als undurchdringliche Wand erscheinen. Hier wurden zwei Varianten getestet, einmal mit einer 4\*4 Pixel Vibrationsmatrix als Armband, einmal als Handscanner mit je vier Vibrationsmotoren auf beiden Seiten für die Finger.

Zwar konnte damit die Hand in die richtige Richtung geleitet werden, ein realer Einsatz ohne ein Bilderkennungssystem zeigte sich allerdings als nicht machbar. Dafür lassen sich beide Varianten<sup>4</sup> leicht als tragbares Brailledisplay nutzen.

#### AP A.4: HaptiSeat



Abb. 3: Textile

Der HaptiSeat als Autositz mit haptischem Feedback sollte als nächstes Projekt einen weiteren, andersgearteten Anwendungsfall erschließen, um so das HaptiVision Toolkit zunehmend generischer zu gestalten. Solche Sitze können auf vorhandene Fahrzeugsensorik zugreifen. Allerdings ergaben sich hier Schwierigkeiten durch die verwendeten Vibrationsmotoren, die aufgrund ihrer geringen Leistung durch Anpressdruck gestoppt werden können. Vor allem aber liegt der Körper nicht notwendigerweise gleichmäßig auf dem Sitz auf, insbesondere wenn man sich in unübersichtlichen Fahrsituationen orientieren muss - weswegen dann Warnimpulse nicht registriert werden könnten. Eine Lösung ist die Kombination des haptischen Feedbacksystems mit einem textilen Multitouchsensor<sup>5</sup>

<sup>4</sup><http://personalphotonics.de/hapticam>

<sup>5</sup><http://personalphotonics.de/textimu>

(s. Abb. 3), durch den die Lage des Körpers erfasst und damit die Warnsignale angepasst werden können. Einfacher ist allerdings, entweder eine haptische Warnweste wie aus AP 2 direkt am Körper zu tragen oder das Fahrzeug bei Gefahrensituationen direkt autonom in die Fahrzeugsteuerung eingreifen zu lassen.

#### AP A.5: Beliebige 3D-Formen



Abb. 4: Badgemaker

Durch den modularen Aufbau des HaptiVision-Toolkits waren auf der Haptikseite damit bereits recht flexible Formen von Systemen einfach konstruierbar. Allerdings zeigte das Nutzerfeedback, dass häufig ein einfaches haptisches Ausgabesystem genügt und eher die Erstellung des Hardware-Designs selbst die größte Herausforderung darstellt — insbesondere für Personen mit Sehbeeinträchtigung oder ohne Maker-Erfahrung. Um diesen Aspekt besser zu verstehen, wurden verschiedene Ansätze in Kooperation mit der Infosphere (Teilprojekt 3) verfolgt.

Eines der Ergebnisse ist der Badgemaker (Abb. 4), eine kinderleicht zu bedienende DIY-Fräse für beleuchtete Namensschilder (siehe u.a. Messerschmidt, 2017).

Für die 3D-Modellierung mit haptischem Feedback wurde ein Open-Source Skulpting-Programm VR-fähig gemacht (Abb. 5) und eine optionale Anbindung an ein Phantom-Touch-System für haptisches Feedback, um auch ohne Sicht modellieren zu können (siehe u.a. Zimmermann, 2018).

Das bereits am Lehrstuhl entwickelte CutCAD-Designsystem, um unkompliziert 3D-Objekte mit dem Lasercutter herzustellen wurde für das bessere Verständnis dieses Aspekts ebenfalls wissenschaftlich ausgewertet (Heller et al. 2018).

#### AP A.6: Mehrere Tiefenkameras

Neben den angesprochenen inhärenten Problemen von Tiefenkameras und der Tatsache, dass in den meisten Anwendungsfällen tatsächlich weniger Motoren ausreichen, zeigte sich, dass die unterschiedliche Sensorik je nach Anwendungsfall eine weitere zentrale



Abb. 5: VR Sculpting Programm

Herausforderung für Maker darstellt. Deswegen wurde das HaptiVision-Toolkit mit einem einheitlichen Bussytem inklusive Aktuator-Lokalisierung und Unterstützung weiterer Sensorklassen entwickelt (siehe u.a. Meiwes, 2019).

Im Projekt YAWN wurden darauf aufbauend die Grundlagen eines solchen modularen Systems auf der ISWC 2018, einer der wichtigsten weltweiten Konferenzen zu Wearable Computing, vorgestellt (Thar, Stoenner, Heller et al. 2018). YAWN bietet gute Möglichkeiten einer Anschlussverwertung, da es - abseits des Nachbaubarkeit als Open-Source-Toolkit - bereits auf Produktionstauglichkeit hin ausgelegt ist.

### **Vorstellungen auf Veranstaltungen**

Die Ergebnisse dieses Teilprojekts wurden auf zahlreichen Veranstaltungen umfassend demonstriert. Fachmessen wurden dabei meistens auf Einladung des BMBF oder Projektträgers, oder - wie bei Medica und X-Health – auf Einladung des Veranstalters besucht.

Die Fachmessen, Makerfaires und anderen Veranstaltungen dienten gleichzeitig als Feedbacksystem. Hervorzuheben ist dabei vor allem die Veranstaltung Inklusive von Menschen mit Sehschädigung durch Sport, in der Gehörlose die Anregung zum Haptiguard-System gaben und sich in der Folge eine Zusammenarbeit ergab. Auf der FAB13 und dem zugehörigen FabFestival konnten die Projekte der Öffentlichkeit präsentiert werden, und die Teilnahme am integrierten Hackathon führte zum HaptiGlove-Projekt, das insbesondere durch die dadurch angestoßenen Vorträge im Rahmen der internationalen Fabricademy für den weltweite Bekanntmachung des Projekts in der Fab-Community sorgte. Auf der MakerFaire Berlin schließlich erzielte das Projekt durch diese Aktivitäten 2018 die Auszeichnung „Maker Of Merit“.

Die Vorstellung der Projektergebnisse als Paper und Demonstrationen beispielsweise auf der ISWC 2018 brachten zwar erhöhten Personalbedarf, unterstützten aber den Open-

Innovation-Character des Projekts, und das auf der ISWC 2018 so vorgestellte YAWN-Toolkit wurde sogar in der Keynote der UIST 2018 zitiert, der weltweiten Top-Konferenz zur technischen Mensch-Computer Interaktion. Auf der CHIPlay-Konferenz wurde ausserdem die Demosession zusätzlich an einem weiteren Tag vor der Konferenz für die Öffentlichkeit zugänglich gemacht, was wir im Rahmen des Open-Innovation-Gedankens natürlich gerne unterstützten.

### **Fachmessen**

- October 12–18, 2015: Light Cares Exhibition (BMBF).
- April 24–28, 2017: Hannovermesse.
- June 26–29, 2017: Laser World of Photonics.
- August 26–27, 2017: BMBF - Tag der offenen Tür.
- October 4–7, 2017: RehaCare.
- February 1-2, 2018: X-Health.
- June 11-15, 2018: CeBit.
- November 13, 2018: Medica.
- February 19-23, 2019: Didacta.
- June 24-27, 2019: Laser World of Photonics.

### **Wissenschaftliche Konferenzen**

- September 13–17, 2017: ISWC 2017.
- June 9-13, 2018: DIS 2018.
- October 8–12, 2018: ISWC 2018.
- October 28–31, 2018: CHIPlay 2018.

### **Community-Veranstaltungen**

- August 17, 2016: WiLa Bonn.
- September 3, 2016: Minimakerfaire Mayrische, Essen.
- September 30–October 2, 2016: Makerfaire, Berlin.
- October 14–16, 2016: Makerfaire, Rome.
- November 5, 2016: Minimakerfaire, Cologne.
- November 17–20, 2016: Makerspace Messe, Stuttgart.
- May 6–7, 2017: Make Munich.
- June 8–9, 2017: WearIt.
- July 5–6, 2017: FAB13 - FabFestival.
- October 13, 2017: COF Digital Day.
- October 17, 2017: Inklusion von Menschen mit Sehschädigung durch Sport.
- January 25, 2018: Fabricademy Recitation.
- March 2-3, 2018: HelpCamp Kamp-Lintfort.

- Mai 25-27, 2018: MakerFaire Berlin.
- July 27, 2018: Meetup Co-creating Open Hardware for Health & Wellbeing - HAPTIC ORIENTATION.
- September 14-16, 2018: MakerFaire Hannover.
- September 21, 2018: COF Digital Day.
- March 2–3, 2019: Make Munich.
- April, 4-5, 2019 Aktion Mensch Jugendcamp
- Mai 17–19, 2019: MakerFaire Berlin.

### **Zusätzliche Präsentationen durch die Community über den Freie Maker e.V.**

- June 29, 2019 LothringAir Strassenfestival Aachen
- August 17-18, 2019: Makerfaire Hannover
- August 21-25, 2019: CCCamp Mildenberg
- September 18-19, 2019: W3+ Fair, Rheinbach

### **Ergebnisse Teilprojekt B: iWand/ARPen**

Das Teilprojekt iWand hatte als Ziel die Entwicklung einer 3D-Sketchinglösung für Marker, um einfach und „vor Ort“ 3D-Modelle erzeugen zu können, die anschließend mit photonischen Technologien gefertigt, z.B. gedruckt werden können. Wie in der Kurzdarstellung erläutert, war eines der wichtigsten Erkenntnisse in diesem Projekt die besondere Eignung von Smartphones für derartige Aufgaben, die sich im Laufe des Projekts durch den AR-Boom bei Smartphones entwickelte. Dieser „Pivot Point“ führte zur Anpassung der späteren APs in diesem Teilprojekt auf diese neu verfügbare Technologie.

#### **AP B.1: iWand: Stift zur 3D-Positionsmarkierung**

Um die Bewegungen eines Stifts in 3D zu verfolgen, wurden mehrere Techniken implementiert und evaluiert. Eine Möglichkeit, den Stift zu tracken, ist die Stereoskopie. Hierzu werden die Bilder von zwei kalibrierten Kameras verglichen, um die Tiefeninformationen der Objekte in den Bildern zu berechnen. Wir implementierten diese Lösung sowohl mit einfachen Kameras als auch mit PixyCams, die über einen eingebauten schnellen und robusten Algorithmus Objekte verfolgen können. Unsere Implementierungen ergab jedoch, dass die Kombination der Kamerabilder zu langsam ist und kleinste Ungenauigkeiten bei der Kalibrierung der Kameras die Genauigkeit der Tiefenbestimmung zu stark negativ beeinflussen, sodass dieser Ansatz keine praktikablen Lösungen liefern konnte.

Wir erforschten und entwickelten deshalb als nächstes ein Tracking mit einer Kinect 2.0 Time-of-Flight-Tiefenkamera, die keine Kalibrierung mit mehreren Kameras benötigt, um Tiefeninformationen zu bestimmen. Unsere Implementierung dieser Lösung ist als Open

Source online<sup>6</sup> und erlaubt es, beliebige Objekte im Raum zu verfolgen. Die Berechnungen erfordern allerdings eine sehr leistungsstarke Grafikkarte.

Parallel zu diesen Untersuchungen der technischen Trackingmöglichkeiten wurde von uns untersucht, mit welchen Gesten Nutzer Objekte mit dem iWand erstellen möchten. Hierzu wurden Studienteilnehmer gebeten, verschiedene Objekte mit einem Stift zu erstellen. Einer der zentralen Wünsche der Teilnehmer war, das Resultat der Stiftaktionen klarer sehen zu können. Eine Möglichkeit, um das erzeugte Modell direkt vor Ort sichtbar zu machen, bietet Augmented Reality (AR), bei der virtuelle Informationen und Objekte in die reale Umgebung eingebettet dargestellt werden. Dadurch können Nutzer sich an existierenden, physikalischen Objekten orientieren, um die Größe ihres Designs richtig abzuschätzen, und sie können genauer zeichnen, indem sie Kanten oder Oberflächen physikalischer Objekte mit dem Stift abfahren. Um dieses Potenzial zu untersuchen, verbanden wir eine Microsoft HoloLens als AR-Headset mit unserem bestehenden Vicon Motion-Tracking-System für präzise „Ground-Truth“-Ortsmessungen. Dies erlaubte uns eine genaue Verfolgung eines Stifts und die Darstellung der gezeichneten Linie in AR. Das zentrale Resultat einer Studie mit diesem System war, dass das Zeichnen auf einem physikalischen Objekt die Genauigkeit einer gezogenen Linie tatsächlich dramatisch verbessert im Vergleich zu einer Linie, die relativ zu einem virtuellen Objekt gezogen wird (Wacker, Wagner et al. 2018).

Obwohl mit der HoloLens Augmented Reality einem größeren Markt zugänglich gemacht wurde, sind solche Geräte jedoch noch nicht weit genug verbreitet, um als eine Lösung für Maker verwendet zu werden.

Zu diesem Zeitpunkt entwickelten sich jedoch gleichzeitig die Fähigkeiten von Smartphones in Bezug auf Augmented Reality massiv weiter, und die weite Verbreitung von Smartphones machte diese Option zu einer interessanten Alternative. Die Hersteller der großen Smartphone-Betriebssysteme iOS und Android veröffentlichten AR-Frameworks, mit denen die Position des Smartphones relativ zu Oberflächen in der Realität einfach berechnet werden kann. Gleichzeitig können Smartphones mit ihrer Kamera für AR auch Marker tracken. Hier sucht das System nach vorher definierten optischen Markern im live Kamerabild. Wird ein solcher Marker erkannt, kann aus dessen Größe und Verzerrung berechnet werden, wie und wo dieser Marker in Relation zur Kamera im Raum steht. Wir haben diese beiden Varianten von AR auf Smartphones verbunden und so das Zeichnen von Linien im Raum ermöglicht. Hierzu nutzen wir einen einfachen 3D-gedruckten Stift mit einem würfelartigen Ende, auf dem AR-Marker platziert sind, und ein iPhone mit Apples ARKit-Framework. Die Positionen der Marker auf dem Stiftwürfel werden in Relation zur iPhone-Kamera berechnet, und über ARKit wird wiederum die Position des iPhones in Relation zu den realen Objekten im Raum bestimmt. Dadurch kann auch die Stiftposition in Relation zur realen Umgebung berechnet werden. Da sowohl Stift als auch Smartphone frei in der Szene bewegt werden können und keine weiteren Trackingsysteme benötigt werden, ermöglicht es diese Variante an jedem beliebigen Ort einen Stift

---

<sup>6</sup><https://github.com/i10/3DTrackingViaKinect>

im Raum zu verfolgen. Wir nannten dieses System „ARPen“.

Da es in Genauigkeit und Kosten die anderen Tracking- und Visualisierungslösungen deutlich übertraf, verfolgten wir diese Variante weiter. Der Touchscreen des Smartphones bot hier zudem den Vorteil, dass eine bekannte Interaktion verwendet werden kann, um zum Beispiel durch Optionen zu navigieren oder verschiedene Modi auszuwählen, wie die 3D-Position des Stifts interpretiert werden soll.

Der Sourcecode der Kinect-Lösung und des ARPen mit allen folgenden Erweiterungen ist als Open Source verfügbar<sup>7</sup>. Die ARPen-Applikation ist sogar direkt in Apples App Store verfügbar<sup>8</sup>.

### AP B.2: Erweiterte 3D-Modellierung und Visualisierung

Mit dem ARPen implementierten wir zunächst eine elementare Zeichenoperation im Raum. Hierzu berechneten wir für jeden Frame, in dem der Stift im Blickfeld der Kamera ist, die Position der Stiftspitze und speicherten sie als einen neuen Punkt einer Linie. Um die Linie zu visualisieren, werden Zylinder zwischen dem vorherigen und neuen Punkt angezeigt. Hierfür verwendeten wir Apples SceneKit-Framework. Mit diesem Stand war es möglich, eine Linie im Raum zu zeichnen und mit dem Smartphone anzuschauen (Abb. 6). Damit der Nutzer kontrollieren kann, ab wann und wie lang die Linie gezeichnet wird, erweiterten wir den Stift mit Buttons und einem Bluetooth-Chip. Der Chip überträgt den Status der Buttons an das Smartphone.

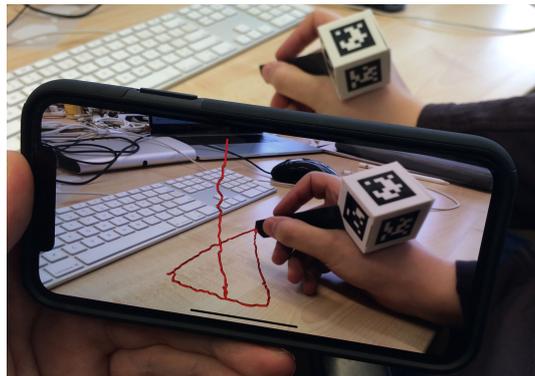


Abb. 6: Das ARPen-System mit iPhone und 3D-gedrucktem Stift

Auf ähnliche Weise implementierten wir anschließend die Erstellung elementarer Körper wie Würfel, Kugeln und Kegel. Die in der Szene platzierten Objekte und Linien konnten nun außerdem als STL-Datei exportiert werden, um sie direkt zu drucken oder in einem anderen Programm weiter zu bearbeiten.

<sup>7</sup>Kinect Tracking: <https://github.com/i10/3DTrackingViaKinect>

ARPen: <https://github.com/i10/ARPen>

<sup>8</sup><http://personalphotonics.de/arpn-ios>

Um mögliche Gesten für die Erzeugung komplexerer Geometrien zu ermitteln, recherchierten wir, welche elementaren Operationen für die Erzeugung von 3D-Objekten in Modeling-Software genutzt werden. Für diese Operationen (Sweeps, Revolutions, Lofts und Boolesche Operationen) führten wir ähnlich wie in AP B.1 eine Studie durch, in der Probanden die Operationen mithilfe des ARPen durchführen sollten. Die am meisten genutzten Gesten für diese Operationen implementierten wir dann für den ARPen.

Da die Erzeugung beliebiger Geometrien die Möglichkeiten von SceneKit und anderen Apple-nativen Frameworks übersteigt, integrierten wir in einem Folgeschritt den Modeling-Kernel „OpenCascade“ in das ARPen-System. Die Informationen der Gesten zur Geometrieerzeugung können an diesen Kernel weitergegeben werden, der dann die Operation ausführt und ein 3D-Objekt erzeugt.

### **AP B.3: iWand mit integrierter, verbesserter Tiefensensorik**

Ziel dieses APs war die Verbesserung der Erkennung von 3D-Geometrien durch den Stift, insbesondere beim „Eintauchen“ in Objekte wie z.B. eine Tasse.

Dank der Marker auf dem Würfel am Stiftende kann der ARPen aus vielen Blickwinkeln getrackt werden. Da zudem das Smartphone mit der Kamera ebenfalls frei bewegt werden kann, ist das Verfolgen des Stifts auch möglich, wenn sich die Stiftspitze innerhalb eines Objekts befindet. Damit war das Ziel dieses APs erreicht, ohne dass die Stiftspitze selbst mit zusätzlicher Tiefensensorik ausgestattet werden musste. Die einfache Nachbaubarkeit des Stifts konnte so gewährleistet werden.

### **Anpassung der APs B.4–6**

Die beschriebene Umsetzung des iWands mit Smartphone-AR in den APs B.1–3 ermöglichte eine stabile und leicht für Maker reproduzierbare Lösung für das 3D-Modellieren mit einem Stift, die nicht auf komplizierte nachzubauende Elektronik angewiesen ist. Diese Entwicklung spiegelte ein häufig zu beobachtendes Entwicklungsmuster in der Consumer Elektronik wider, in dem dedizierte Geräte, von der Stoppuhr über die Kamera und den Fitness-Tracker bis zum Maßband, durch den Einsatz eines modernen Smartphones mit seiner umfangreichen Sensorik, Rechenleistung und Touchscreen-Eingabe ersetzt werden können.

Gleichzeitig „entdeckten“ wir mit diesem Konzept eine neue, bislang weitgehend unerforschte Interaktionsform. Als Nutzer interagiert man mit dem System beidhändig, und zwar mit unterschiedlichen Werkzeugen (iPhone in der einen, Stift in der anderen Hand). Zu dieser asymmetrischen bimanualen Interaktion kommt hinzu, dass man als Nutzer zum einen den visuellen Fokus auf dem Smartphone-Screen hat, zum anderen auf der realen Stiftspitze im Raum. Außerdem ist die Ansicht der realen Szene durch die Smartphone-Kamera auf den Smartphone-Bildschirm bereits eine Abbildung in den 2D-Raum; diesen Bildschirm aber betrachtet der Nutzer in dieser Anwendung oft selbst noch einmal schräg von der Seite. All dies führt zu teilweise überraschenden Effekten beim Nutzer. Insbeson-

dere fiel rasch auf, dass viele grundlegende Interaktionen mit solch einem System (z.B. die Selektion und Manipulation virtueller Objekte) für Nutzer gar nicht klar definiert oder offensichtlich sind und neu gedacht werden müssen.

Daher passten wir AP B.4–6 an diese neue Entwicklung an, indem wir verschiedene Möglichkeiten für diese Interaktionen implementierten und in Studien testeten und so das ARPen-System weiterentwickelten. Diese APs finden sich im folgenden als AP B.4\*–6\*.

#### **AP B.4\*: Auswahl und Bewegung virtueller Objekte**

Im ARPen-System kann der Nutzer nicht nur mit dem Stift 3D-Eingaben erzeugen, sondern auch den Touchscreen des Smartphones zur Eingabe nutzen. Da der Nutzer allerdings in einer Hand den Stift hält, muss er in der anderen das Smartphone halten und mit einem Finger derselben Hand bedienen. Dies erfordert eine spezielle Handhaltung, und nicht der ganze Screen ist zur Interaktion erreichbar. Wir baten deshalb Probanden in einer Studie, das Smartphone in die Hand zu nehmen und den erreichbaren Bereich des Screens abzufahren. Die beliebteste Methode, das Smartphone zu halten, war, es in der horizontalen Ausrichtung (Landscape-Rotation) zwischen Zeige- und kleinen Finger zu klemmen. Das lässt die Bedienung des Touchscreens mit dem Daumen für einen Bereich an der gegriffenen Seite des Screens zu. Hier können zum Beispiel Menüs untergebracht werden (Abb. 9).

Die Auswahl und das Bewegen von Objekten ist zentraler Bestandteil der Interaktion jeder 3D-Modellierungssoftware. Wir implementierten verschiedene Möglichkeiten, mit denen Objekte ausgewählt werden können, und baten Probanden in einer Studie, diese für die Manipulation virtueller Objekte zu nutzen. Die Ergebnisse zeigten, dass die Darstellung der virtuellen Informationen auf dem 2D-Screen des Smartphones dafür sorgt, dass die Tiefeninformationen, also die Abstände virtueller Objekte zur Kamera, sehr schwer wahrzunehmen sind. Dies führte bei Auswahlvarianten, bei denen der Stift in das Objekt bewegt werden sollte, dazu, dass visuelle Hinweise notwendig waren, um den passenden Ort zu finden. Methoden, bei denen Objekte mithilfe eines *Raycasts* ausgewählt wurden, konnten von den Probanden deutlich schneller ausgeführt werden und wurden auch bevorzugt. Hierbei wird ein Strahl von der Kameraposition in die Szene projiziert und das erste Objekt ausgewählt, das getroffen wird. Im ARPen-System nutzten wir dies z.B. für die Touchscreen-Interaktion, sodass das Berühren eines Objekts auf dem Screen es auswählt. Analog kann der Strahl auch von der Kamera aus durch die Spitze des Stiftes geleitet werden. Das bedeutet dann, dass man das Objekt hinter der Stiftspitze auswählt. Diese Selektionsmethode („pen-ray“) zusammen mit der Auswahl auf dem Touchscreen wurde von unseren Probanden bevorzugt und lieferte gute Performance in den Studien.

Auf ähnliche Weise verglichen wir Techniken, mit denen Objekte bewegt werden können. Hier wurde von unseren Probanden eine Technik bevorzugt, bei der das Objekt mithilfe der „pen-ray“-Methode ausgewählt wird und es dann an die Spitze des Stiftes springt, von wo aus es an den Zielort bewegt werden kann.

Die Ergebnisse dieses Arbeitspakets präsentierten wir 2019 in Glasgow auf der ACM CHI, der internationalen Topkonferenz im Bereich Mensch-Computer-Interaktion (Wacker, Nowak et al. 2019).

### Der ARPen für's Portemonnaie

Auf jener CHI-Konferenz wollten wir das ARPen-System möglichst vielen anderen Konferenzteilnehmern aus Forschung und Praxis demonstrieren und selbst zugänglich machen. Die App fand sich bereits im App Store, aber 3D-gedruckte Stifte mit Elektronik waren für eine Massenproduktion wenig geeignet. Das verwendete Markertracking erlaubte jedoch auch die zuverlässige Verfolgung einer Stiftspitze, wenn nur ein einziger QR-Code sichtbar ist. Daraus entstand die Idee, den QR-Code auf einen kleinen, günstigen Stift aus Karton im Scheckkartenformat zu drucken. Auf die Rückseite druckten wir eine Kurzanleitung und einen kleineren QR-Code, um die App herunterzuladen. Eine Variante dieses Stifts fertigten wir als Visitenkarte. In die App integrierten wir einen Link, um den Stift auch als PDF herunterzuladen und selbst auf Papier auszudrucken. Natürlich können auf diesem Stift keine elektronischen Knöpfe gedrückt werden, doch diese ersetzen wir durch Touchscreen-Buttons in der App.

Das Ergebnis war ein Überraschungserfolg, denn wir konnten so nicht nur Hunderte dieser ARPens an andere Konferenzteilnehmer verteilen, sondern wir hatten so nebenbei die wohl weltweit erste Möglichkeit geschaffen, mit einem AR-fähigen Smartphone, das man ohnehin dabei hat, und einem Stift, den man sich selbst auf dem 2D(!)-Drucker zu Hause ausdrucken kann und der buchstäblich ins Portemonnaie passt, jederzeit und überall 3D-Modellierung zu betreiben, was den Projektzielen eines niedrigschwelligen Einsatzes photonischer Technologien perfekt entspricht (Abb. ??).



Abb. 7: Der ARPen im Einsatz mit dem auf Karton gedruckten Stift. Zeichenfunktionen wählt man auf dem Smartphone-Touchscreen aus. Diese Variante erlaubt das 3D-Modellieren in AR überall mit dem eigenen Smartphone und einem Stift, der in jedes Portemonnaie passt. Download der iOS-App genügt; der Stift ist in der App als PDF zum Ausdrucken verfügbar.

### AP B.5\*: Verbesserung der Tiefenwahrnehmung

Die Ergebnisse der Selektionsstudie in AP B.4\* zeigten, dass die Tiefenwahrnehmung ein Problem für die Interaktion mit einem System wie dem ARPen ist. Während manche Operationen durch Raycasting-Varianten ersetzt werden können, um die Notwendigkeit der Tiefenspezifikation zu vermeiden, ist es gerade bei Modellierungsarbeiten oftmals notwendig, den Stift an eine bestimmte Position relativ zu virtuellen Objekten zu bewegen (z.B., um eine Verbindung zwischen zwei virtuellen Objekten zu erstellen). Wir implementierten mehrere Techniken, mit denen die Position des Stifts in Relation zu anderen virtuellen Objekten in der Szene visualisiert werden kann. In unserer anschließenden Studie bevorzugten die Nutzer eine Heatmap-Visualisierung (Abb. 8), bei der die Objekte der Szene relativ zu ihrer Distanz zum Stift eingefärbt werden. Weit entfernte Objekte sind rot gefärbt, und je näher der Stift ihnen kommt, desto mehr verändert sich ihre Farbe in Richtung grün. Diese Visualisierung könnte ein aktivierbarer Modus des ARPen sein, wenn eine genaue Platzierung des Stiftes notwendig ist.

Die Ergebnisse dieses APs konnten 2020 wiederum auf der ACM CHI veröffentlicht werden (Wacker, Wagner et al. 2020).

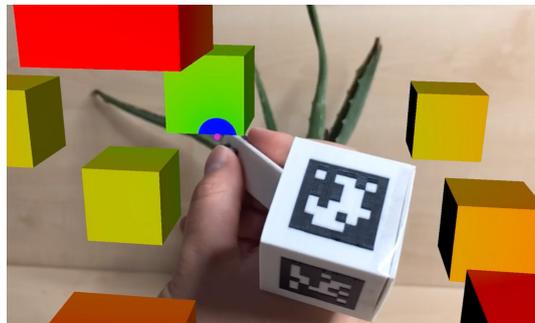


Abb. 8: Die Heatmap-Visualisierung aus AP B.5\*

### AP B.6\*: Interaktion mit Kontextmenüs im ARPen-System

Menüs sind für komplexere Gestaltungs-Apps essenziell. Viele Funktionen werden z.B. über Kontextmenüs aufgerufen. Im ARPen-System könnten zum Beispiel mithilfe der „pen-ray“-Methode Menüs in-place geöffnet und Einträge ausgewählt werden. Mit dem gleichen Menü könnte auch über den Touchscreen oder mithilfe der Bewegung des Smartphones interagiert werden. Da der Ort des Menüs frei wählbar ist, könnte es z.B. auch in AR auf einer physikalischen Oberfläche visualisiert werden, damit es per Antippen bedient werden kann, oder es kann auf dem Touchscreen so angezeigt werden, dass es mit dem Daumen der haltenden Hand erreichbar ist (Abb. 9). Wir implementierten diese Varianten und evaluierten sie in einer Studie. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Interaktion mit dem Touchscreen von Nutzern bevorzugt wird. Allerdings sind die Unterschiede in Erfolg und benötigter Zeit gering, sodass keine der Menüvarianten von vornherein vermieden werden sollte. Die Ergebnisse dieses Arbeitspaketes werden Ende 2020 auf der ACM MobileHCI-Konferenz vorgestellt (Wacker, Nowak et al. 2020).



Abb. 9: Menü-Interaktion mit dem Stift (links) oder an der Seite des Touchscreens (rechts)

Wir haben, zusätzlich zu den Studien, auch Möglichkeiten untersucht, wie Designs in einer Szene gespeichert und sogar mit anderen Nutzern zeitgleich betrachtet werden können. Eine erste Version dieser Features ist bereits im Github-Projekt des ARPen verfügbar. Allerdings ist es problematisch, die Objekte, die von OpenCascade berechnet werden, zu speichern und zu teilen. Daher sind diese Funktionen noch nicht in die ARPen-App integriert.

### Ergebnisse Teilprojekt C: Photonik-Arduino-Workshops

Ziel dieses Teilprojekts war, Photonik-Aspekte mit Hilfe von Arduino-Mikrocontrollern einem breiten Zielpublikum erfahrbar zu machen. Dabei wurden die erfolgreichen Maßnahmen aus dem Pilotprojekt „Informatik Enlightened deutschlandweit“, das Schülerinnen und Schülern sowie ihre Lehrkräfte als Zielgruppe hatte, einer breiteren Zielgruppe aus Kindern, Jugendlichen wie auch Erwachsenen aller Altersstufen und Vorwissenstände zugänglich gemacht.

#### AP C.1: Zielgruppengerechte Arduino-Photonik-Workshops

Kern dieses Teilprojekts waren ein- und zweitägige Mitmach-Workshops, die für Kinder, Jugendliche gemeinsam mit Erwachsenen (u.U. auch ihren eigenen Eltern oder sogar Großeltern) geöffnet sind. Sie wurden deutschlandweit an öffentlich zugänglichen Orten (z.B. Museen, Messen und außerschulischen Lernorten) kostenfrei angeboten. Im Rahmen dieser Workshops erarbeiten sich die Teilnehmerinnen und Teilnehmer mittels zielgruppenspezifischer Anleitungen und didaktischer ausgewählter Bauteile die Grundlagen der Photonik wie der Arduino-Programmierung. Insbesondere in die Entwicklung und Evaluation zielgruppengerechter Lernmaterialien fließen die fachdidaktischen Kompetenzen des Fachdidaktikteams der RWTH Aachen rund um das Schülerlabor Informatik „InfoSphere“ ein. In den Workshops wurden beispielsweise LDR-Lichtsensoren, LEDs – mit sichtbarem und unsichtbarem Licht - wie auch NeoPixel und IR-Distanzsensoren thematisiert. Nach dem Besuch eines Workshops waren die Teilnehmerinnen in der Lage, selbstständig kleine Arduino-Projekte mit photonischen Komponenten umzusetzen.

Die folgende Liste der Veranstaltungen (neueste zuerst) findet sich auch unter <http://schuelerlabor.informatik.rwth-aachen.de/personal-photonics>:

### Events in 2019

- 06. Juni 2019: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n des BK Gestaltung und Technik Aachen im InfoSphere (Aachen)
- 14. Mai 2019: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n des Bernadinus Colleq Heerlen im InfoSphere (Aachen)
- 06. Mai 2019: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n des Lycee Robert-Schuman Luxembourg im InfoSphere (Aachen)
- 02. Mai 2019: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n des BK Geilenkirchen im InfoSphere (Aachen)
- 30. April 2019: Arduino-Workshop mit Teilnehmer-inne-n des Zertifikatskurses Kempen im InfoSphere (Aachen)
- 09. April 2019: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n des Louise-von-Duisberg-Gymnasiums Kempen im InfoSphere (Aachen)
- 20. März 2019: Arduino-Workshop mit den MINT-Scouts der Städteregion im InfoSphere (Aachen)
- 17. - 19. März 2019: LernortLabor-Jahrestagung (Paderborn)
- 13. März 2019: Arduino-Lehrerfortbildung (Dresden)
- 18. - 20. Februar 2019: Didacta (Köln)
- 12. Februar 2019: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n des Gymnasiums am Turmhof Mechernich im InfoSphere (Aachen)
- 11. Februar 2019: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n des Ritzefeld-Gymnasiums Stolberg im InfoSphere (Aachen)
- 06. Februar 2019: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n des Friedrich-Spee-Gymnasiums Geldern im InfoSphere (Aachen)
- 08. Januar 2019: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n der städtischen Realschule Korschenbroich im InfoSphere (Aachen)

### Events in 2018

- 18. & 20. Dezember 2018: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n des Berufskolleg Eschweiler im InfoSphere (Aachen)
- 14. November 2018: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n des Couven Gymnasiums im InfoSphere (Aachen)
- 30. Oktober 2018: Vortrag „Informatische Bildung von der Grundschule bis zum Abitur“ in der Reihe Schule 4.0 (Darmstadt)
- 19. September 2018: Arduino-Workshop im Rahmen der fraMediale (Frankfurt)
- 15. & 16. September 2018: Arduino-Workshop auf der Maker Faire Hannover
- 15. September 2018: Vortrag „Maker werden ist nicht schwer“ auf der Maker Faire Hannover

- 03. März 2018: Arduino-Workshop für interessierte Schüler-inne-n der Region im InfoSphere (Aachen)
- 22. Februar 2018: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n der Europaschule Langerwehe im InfoSphere (Aachen)
- 17. Januar 2018: 3D-Druck-Workshop mit Schüler-inne-n der Hugo-Junkers-Realschule im InfoSphere (Aachen)

### **Events in 2017**

- 16. Dezember 2017: Arduino-Workshop für interessierte Schüler-inne-n der Region im InfoSphere (Aachen)
- 10. November 2017: RWTH-Wissenschaftnacht (Aachen)
- 03. Oktober 2017: „3D-Druck“ für Kids ab der 8. Klassenstufe (in Aachen)
- 08. September 2017: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n der Waldschule Eschweiler im InfoSphere (Aachen)
- 28. August 2017: Arduino-Workshop für interessierte Schüler-inne-n der Region im InfoSphere (Aachen)
- 05. August 2017: „3D-Druck“ für Kids ab der 8. Klassenstufe (in Aachen)
- 15.-16. Juli 2017: Maker Faire Bodensee (in Friedrichshafen)
- 01. Juli 2017: Paderborner Wissenschaftstage
- 06.-07. Mai 2017: Maker Faire München
- 23. Mai 2017: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n des Adolf-Kolping-Berufskolleg im InfoSphere (Aachen)
- 25. Mai 2017: „3D-Druck“ für Kids ab der 8. Klassenstufe (in Aachen)
- 09. Mai 2017: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n des Rhein-Maas-Gymnasiums im InfoSphere (Aachen)
- 08. Mai 2017: Arduino-Workshop mit dem Verein zur Weiterbildung im InfoSphere (Aachen)
- 26.-28. April 2017: Tec2You auf der Hannover Messe
- 27. April 2017: GirlsDay - MINT-Workshop rund um Arduinos (in Aachen)
- 18.-20. April 2017: Mädels-Workshop „Informatik-Desingerin“ mit Arduino Lilypads (in Aachen)
- 06.-10. April 2017: MNU Bundestagung (in Aachen)
- 25. & 26. März 2017: Maker Faire Ruhr (Dortmund)
- 21. März 2017: Arduino-Workshop mit dem Verein zur Weiterbildung im InfoSphere (Aachen)
- 10. Februar 2017: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n des Bernardinuscollege aus Heerlen im InfoSphere (Aachen)
- 27.-28. Januar 2017: Buch-Projekt zum Calliope Mini (Lemiers)
- 19. Januar 2017: Arduino-Workshop mit Schüler-inne-n des Couven-Gymnasiums im InfoSphere (Aachen)

## Events in 2016

- 07. November 2016: RWTH-Wissenschaftnacht (Aachen)
- 05. November 2016: Mini Maker Faire (Köln)
- 29. Oktober 2016: Workshop für Lehrkräfte beim MNU-Landestagung Rheinland-Pfalz (Emmelshausen)
- 14. Oktober 2016: Workshop für Lehrkräfte am 5. Informatiklehrertag BW (Heidelberg)
- 07. Oktober 2016: Übergabe von InfoSphere-Kits ans FabLab (Nürnberg)
- 01. Oktober 2016: Maker Faire (Berlin)
- 30. September 2016: WissensNacht Ruhr (Dortmund)
- 23.-25. September 2016: Aachen 2025 (Aachen)
- 26. + 27. Juni 2016: Paderborner Wissenschaftstage (Paderborn)
- 05. Juni 2016: Tag der Neugier im Forschungszentrum (Jülich)



Abb. 10: InfoSphere-Stand auf der MakerFaire Dortmund

Um die Umsetzung eigener Projekte den Workshopbesucher-inne-n auch ohne eigene Investitionen zu ermöglichen, wurde ein deutschlandweites Verleihsystem von Arduino-Kits aufgebaut. Durch die Bereitstellung des Leihsystems konnten sich Interessierte unabhängig von ihrer finanziellen Lage aktiv an diesem Projekt beteiligen. Für Initiativen wie offene Türen, Jugendverbände (z.B. Pfadfinder) oder auch Flüchtlingsinitiativen wurden ganze Sets als Leihgabe bereitgestellt. Um die Arduino-Kits auszuleihen, mussten Interessierte lediglich ein Online-Formular unter <http://schuelerlabor.informatik.rwth-aachen.de/index.php/materialverleih> ausfüllen und bekamen die Kits anschließend per Post zugestellt.

Bei der Projektumsetzung wurden die Einzelpersonen oder Teams durch eine Online-Fortbildung mit zahlreichen Lernvideos unterstützt. Diese und mehr sind auch über den YouTube-Channel des InfoSphere zugänglich. Dies hatte den Vorteil, dass die Teilnehmenden ganz nach ihren eigenen Interessen und Bedürfnissen die Videos auswählen und anschauen konnten. Darüber hinaus standen den Teilnehmerinnen und Teilnehmern ein

Online-Support per (Video-)Telefonie oder Mail zur Verfügung. Für ihre Anfragen nutzten die meisten Teilnehmerinnen und Teilnehmer Emails. Dort formulierten sie ihre Probleme oder Fragestellungen und fügten bei Bedarf Bilder oder Code bei. Allerdings zeigte sich während des Projekts, dass der Bedarf an Präsenzworkshops sowohl für Schülerinnen und Schüler wie auch für die (begleitenden) Lehrkräfte deutlich höher war. Die Hemmschwelle und Probleme, gerade bei dem Umgang mit der Arduino-Hardware, machten die Vorteile von Präsenzveranstaltungen im Gegensatz zu dem Online-Angebot deutlich.

Die so entstandenen Projekte konnten von den Entwicklern mitsamt Dokumentation (Hard- und Softwarehinweise) auf einer Austauschplattform online präsentiert werden, um die eigenen Inhalte anderen Interessierten frei zugänglich zur Verfügung zu stellen und diese so zum Nachahmen einzuladen. Diese Austauschplattform wurde in die kostenlose Online-Fortbildung integriert. Auch die Lehrkräfte, die bereits entsprechende Fortbildungen besucht hatten, profitierten von diesen Projektideen, indem so die bisherigen fünf Stationen des „Informatik Enlightened“-Moduls durch neue Ideen erweitert wurden.

Die Informatik Enlightened-Materialien sind als OER (Open Educational Resources) veröffentlicht und allen Lehrkräften und weiteren Interessierten steht eine kostenlose Online-Schulung mit entsprechenden Materialien zur Verfügung. Die während des Projekts entstandenen Lehr-Videos sind die Online-Fortbildung integriert und stehen darüber hinaus auf dem YouTube-Channel des Schülerlabors InfoSphere zur freien Verfügung

## **Ergebnisse Teilprojekt D: Dissemination**

Während einige Aspekte der Dissemination von Anfang an Teil des Projekts waren, entwickelten sich im Laufe des Projekts durch unsere Erkenntnisse und im Dialog mit dem Projektträger weitere Aufgaben, die es sinnvoll machten, diese Arbeiten in einem eigenen Teilprojekt zusammenzufassen. Die Finanzierung zusätzlicher Aufgaben war dabei durch Entsperrung und Umwidmung von Mitteln möglich.

Zum einen wurde in diesem Track ab Juli 2019 das monatliche „Aachen Maker Meetup“-Treffen<sup>9</sup> unterstützt, in dem sich Maker aus der Region trafen, um direkt die Ergebnisse unserer Teilprojekte kennenzulernen und auszuprobieren sowie eigene Projekte vorzustellen und sich zu einer lokalen Community zu vernetzen.

In Events wie *Helle Köpfe* und *Girls Day* sowie einzelnen Veranstaltungen im Bachelor-Praktikum „Multimodal Media Madness“ und Master-Praktikum „Media Computing Project“ wurden die Möglichkeiten von Personal Fabrication und Personal Photonics und die Ergebnisse der anderen Teilprojekte Schülern und Studierenden nähergebracht.

**Poster & Lernkarten:** Zur Schaffung von Open Educational Resources zu Personal Photonics wurden zunächst Poster für verschiedene Hard- und Softwarewerkzeuge wie

---

<sup>9</sup><https://hci.rwth-aachen.de/amm>

Lasercutter, 3D-Drucker, Inkscape, Microcontroller u.a. erstellt<sup>10</sup>. Im Rahmen der Entwicklung des Workshops Digitale Fabrikation (s.u.) wurden aktualisierte Versionen dieser Poster erstellt.<sup>11</sup>

Diese Poster können in Fab Labs und ähnlichen Umgebungen aufgehängt werden, um wichtige Schritte in der Nutzung von Personal-Photonics-Technologien zu vermitteln.

Zwei auch in Printform veröffentlichte Lernkartensets<sup>12</sup> vermitteln praxisnah Wissen über zwei zentrale Personal-Photonics-Prozesse, 3D-Druck und Lasercutting, und sind ideal für das Selbststudium oder als Klassenmaterialien.

**Workshop Digitale Fabrikation:** Dieser Workshop wurde von uns konzipiert, um an einem einzigen Abend in gut drei Stunden interessierten Gründern die Grundlagen der digitalen Fertigung zu vermitteln. Der Workshop wurde 2019 konzipiert und mit Teilnehmern des etablierten Aachener ac<sup>2</sup>-Startup-Wettbewerbs sowie mit ihren Mentoren insgesamt dreimal durchgeführt.

Im Zentrum des Workshops stand jedesmal der selbständige Zusammenbau des **Photonik-Baums**, den wir eigens für diese Workshops konzipierten und mit dem Feedback jedes Workshops optimierten. Dieser Baum besteht aus einem 3D-gedruckten Stamm mit transparenten Spitzen aus Silikon, die mit Hilfe von 3D-gedruckten Formen gegossen werden. Der Sockel ist mit dem Lasercutter hergestellt. Im Baum arbeitet ein Arduino-Microcontroller, der serielle RGB-LEDs ansteuert. Auf dem Sockel sitzt ein optischer Farbsensor, der über den Arduino die Farbe der Blätter kontrolliert. Legt man zum Beispiel einen roten Gegenstand auf den Sensor, färben sich die LED-Blätter ebenfalls rot. Jeder Teilnehmer konnte seinen Baum am Ende mitnehmen und bei Interesse zu Hause umprogrammieren.

Nach einer Willkommensrunde durften die Teilnehmer sich beliebig an aufgebauten Lernstationen zu 3D-Druck, Lasercutting, 3D-Scanning, Arduinoprogrammierung, Elektronik und 3D-Design über die Maschinen und Prozesse informieren, die die Teile des Photonik-Baums darstellen, und sich an jeder Station die entsprechenden Komponenten für ihren eigenen Baum einsammeln. Die Lernstationen wurden durch Mitarbeiter betreut. Zu 3D-Design und Programmierung fanden rotierend 30-min-Workshops statt.

Die Workshops erforderten insbesondere für die Zusammenstellung der Kits viele Arbeitsstunden, aber alle Workshops waren überaus erfolgreich; an allen Abenden gelang es sämtlichen Teilnehmern, einen funktionierenden Baum mit nach Hause zu nehmen, und das Feedback der Teilnehmer war überwältigend positiv.

Jeder Teilnehmer erhielt ein Workshop-Büchlein zum Mitnehmen, das die Inhalte der Poster während des Workshops widerspiegelt und zusätzliche Informationen bereithält.

---

<sup>10</sup><https://hci.rwth-aachen.de/makercheatsheets>

<sup>11</sup><https://hci.rwth-aachen.de/ac2>

<sup>12</sup><http://personalphotonics.de/lernkarten>

Das gesamte Workshop-Konzept mit allen Dateien, dem Workshop-Buch, den Designdateien für den Photonik-Baum, aber auch ausführliche Workshopberichte mit Lessons Learned und wichtigen Hinweisen zur erfolgreichen Durchführung finden sich auf der Workshop-Homepage<sup>13</sup>. Hier ist auch ein Video mit Impressionen des Abends zu sehen.



Abb. 11: Der Photonik-Baum, der als Kit für die Workshops Digitale Fabrikation entwickelt wurde.



Abb. 12: Links: An Lernstationen zu 3D-Druck, Lasercutting, 3D-Scanning, Arduinoprogrammierung, Elektronik und 3D-Design lernten Teilnehmer des ac<sup>2</sup>-Workshops Digitale Fabrikation die Maschinen und Prozesse kennen, die die Teile des Photonik-Baums darstellen. Rechts: Teilnehmer bauen ihren eigenen Photonik-Baum zusammen und nehmen ihn in Betrieb.

<sup>13</sup><https://hci.rwth-aachen.de/ac2>

**Make Light Aktion: Calliope Buch:** Im Rahmen der Make-Light Aktion zur Entwicklung eines Buches zur Verwendung des Calliope-Boards waren auch Autoren aus dem Personal-Photonics-Projekts und dem Aachener Makerumfeld beteiligt (Bergner et al. 2017).

Schließlich entstanden im Teilprojekt A (Haptivision Toolkit) mehrere kleinere Photonik-Projekte, die im folgenden genauer beschrieben werden. Sie entstanden unter anderem bei Gesprächen mit Personen z.B. mit Sehbehinderungen als Ideen, die einfach mithilfe der Personal-Photonics-Technologien umzusetzen waren. Hierdurch konnten die Möglichkeiten dieser Techniken demonstriert werden. Die Projekte sind teilweise durch studentische Abschlussarbeiten ergänzt und wissenschaftlich aufbereitet worden und wurden vielfach auf Messen demonstriert. Nicht alle Projekte kamen zu einem vollständigen Abschluss. Die einzelnen Projekte und Links zu Code und Anleitungen finden sich auf der Projektseite<sup>14</sup>.

### HapticGames

In Kommunikation mit Sehgeschädigten ergab sich, dass interessante Spiele für Blinde Mangelware sind, da die meisten Spiele mit optischen Anreizen funktionieren. Aufgrund der vorhandenen Technologie wurde hier versucht, einfach nachbaubare haptische Spiele zu entwickeln, die einerseits auf einer wissenschaftlichen Fachtagung (Thar, Stoenner und Borchers, 2018b; Thar, Stoenner und Borchers, 2018a), andererseits auf Messen präsentiert wurden. Die Anleitungen sind frei verfügbar über die Projektseite.



Abb. 13: BrailleMemory

**BrailleMemory:** Als Spiel, um Brailleschrift zu lernen, wurde hier ein Memoryspiel aus Schwarz- und Blindenschriftkarten entwickelt, die 3D-druckbar sind (Abb. 13). Ein eingedruckter RFID-Tag erlaubt dabei ein Vorlesen der Karte, um passende Buchstabenpaare zu finden. Haupthaken an dieser Idee ist vor allem, dass Memory ein nicht durchgehend beliebtes Spiel ist...

<sup>14</sup><http://personalphotonics.de/haptic-vest>

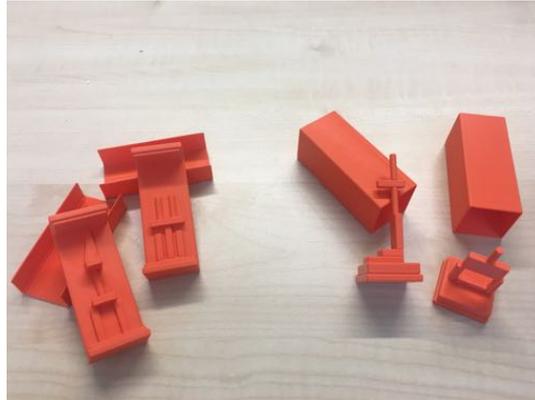


Abb. 14: Construction Game

**Construction Game:** Ein weiteres Spiel war ein Konstruktionsspiel, in dem Objekte auf einer Spielkarte nachgebaut werden sollen (s. Abb. 14). Während ein Bauen selber möglich ist, ist die Spielkarte nicht blindengeeignet. Hier wurde die Spielkarte einfach als 3D-Skulptur bzw. Relief nachgebildet. Bei einer Skalierung in Spielkartengröße ist die Skulptur zu zerbrechlich, während das Relief nicht gut genug ertastbar ist. Eine größere Skalierung macht allerdings das System unhandlich.



Abb. 15: HapticKniffel

**HapticKniffel:** Auch ein Kniffelblock ist blind nur schwer auszufüllen. Durch 3D-Druck in Kombination mit Magnetkugeln wurde ein haptisch greifbarer Block entwickelt, auf dem durch die Kugeln erfüllte Teile abgehakt und der Punktestand mittels Abakus nachgehalten werden kann (Abb. 15).

**HaptiPong:** Auch die HaptiVest kann als Spielfeld verwendet werden (Abb. 16). Allerdings ist die Auflösung mit  $16 \times 8$  Pixeln nicht besonders hoch und auch nicht sehr präzise. Pong bietet sich hierfür an, weil es einfach durch Tausch des Controllers in einen Arduino Nano und zwei Schiebepotentialmeter als Controller realisiert werden konnte.



Abb. 16: HaptiPong

### Hilfsmittel

Durch den Kontakt mit Menschen mit Behinderung kamen auch weitere Hilfsmittelideen auf, die in unterschiedlichen Reifegraden realisiert wurden.

**BigButtons:** Ein vom Hals abwärts gelähmter Rollstuhlfahrer steuert seinen Rollstuhl und andere Systeme durch einen Ring von großen Buttons hinter seinem Kopf. Kommerziell erhältliche Buttons sind jedoch teuer und auch nicht zuverlässig. Hier wurde ein möglichst robuster Button entwickelt, der leicht nachbaubar ist (Abb. 17). Dabei existieren zwei Varianten in unterschiedlicher Ansprechhärte je nach Anwendungsfall.

**HaptiTilt:** Durch einem Bauchgurt wird mittels Gyroskop und zwei Vibrationsmotoren gewarnt, sich wieder aufzurichten (Abb. 18). Dieses System ist gedacht für Leute mit Haltungsschäden sowie Spastik (seitliches Absacken beim Sitzen).



Abb. 17: Big Buttons



Abb. 18: HaptiTilt



Abb. 19: HaptiGuard

**HaptiGuard:** Als Erweiterung von AP A.3 wurde aufgrund Feedback von Hörgeschädigten ein Seitwärtswarner entwickelt, der vor herannahenden Autos warnen soll (Abb. 19). Hier werden nur wenige Motoren als Feedback benötigt, womit wir deutlich unter einer sinnvollen Verwendungsgrenze des eigentlichen haptischen Toolkit lagen. Wir haben ein derartiges System aufgebaut und auf einem Laufband getestet, um auch gleichzeitig verschiedene Distanzsensorsysteme zu vergleichen (siehe u.a. Krispradhana, 2018). Auch wenn die Laufbandversion grundsätzlich funktioniert, ist auch hier die reale Verwendbarkeit eingeschränkt – insbesondere bei Verwendung von Time-Of-Flight-Sensoren statt der Ultraschallsensoren ist wieder eine extrem eingeschränkte Reichweite bei Tageslicht erzielbar. Weiterhin ergeben Armbewegungen auch bei statischen Objekten eine Relativbewegung und damit einen Warnfall. Auch hier ist somit eine eigentlich eine komplexe Bildanalyse notwendig.

**Krückenhalter:** Um eine Hand kurzfristig freizubekommen, während man mit zwei Krücken läuft, kann man eine Krücke mittels 3D-gedrucktem Haken in die Hosentasche oder den Gürtel einhaken.



Abb. 20: OpenLights Modifikation

**OpenLights-Modifikation:** Bei Teilnahme an einem Jugendcamp der Aktion Mensch wurden auch die OpenLights aus der Light-Cares-Initiative vorgestellt. Beim Bau derselben wurde auch über eine Erweiterung nachgedacht: Eine modifizierter Wattuino Nanite erlaubt ein direktes Anlöten an einen LED-Streifen in passender Größe. Durch Einlegen des Streifens in ein 3D-Gehäuse wird damit eine senkrecht stehende Plexiglasplatte beleuchtet, was zusätzliche Lichteffekte beispielsweise am Rollstuhl ermöglicht (Abb. 20).

**Telekom/Merck-Makeathon:** Mitarbeiter aus dem Projekt haben auf dem Telekom/Merck Marathon 2018 in der Gruppe SpektralPals einen Prototyp eines tragbaren Messgeräts zur Bilirubinbestimmung bei Leberschädigung entwickelt (Abb. 21). Das System wurde auf der Veranstaltung mit dem Preis „Best Business Impact“ ausgezeichnet.

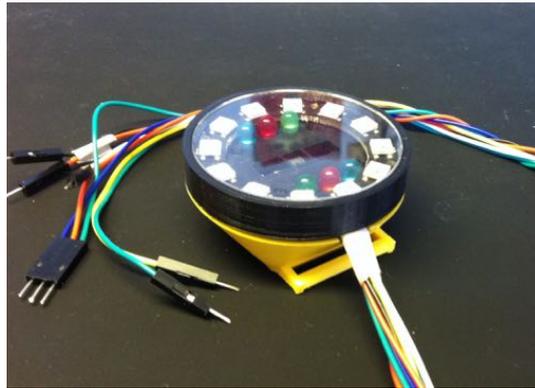


Abb. 21: Prototyp

### **SchnorchelNavi**

Als Nebeneffekt der Technikentwicklungen wurde hier einmal versucht, die Navigation beim Schnorcheln zu vereinfachen. Durch ein GPS-System am Schnorchel kann durch haptisches Feedback eine Richtungskorrektur erfolgen. Hier wurde zunächst verglichen, welche Feedbackmöglichkeiten tatsächlich sinnvoll sein können (siehe u.a. Schmidt, 2018). Dabei zeigte sich, dass zur Richtungskorrektur bereits zwei Motoren ausreichen. Entgegen der ursprünglichen Überlegungen war die Nutzung des Toolkits damit nicht sinnvoll.

Die dafür geplante Sensorik wurde auch für ein Lokalisationsspiel ausprobiert, das in Zusammenarbeit mit dem deutschen Museum für Technik in Berlin entwickelt wurde, um moderne Technik und alte Handwerkskunst zusammenzuführen.

### **Schulische Ausbildung**

Abseits der Verwendung der hier gewonnenen Ergebnisse im Makerumfeld wurden insbesondere durch die Kooperation mit der Infosphere auch hier in Richtung Bildungsumfeld Ergebnisse erzielt.

**3D-Druckerbauworkshops (OpenBadges):** Mit steigender Zuverlässigkeit preisgünstiger 3D-Drucker wurden 3D-Druckerbauworkshops angeboten. Ziel war hier der Test, ob derartige Workshops genutzt werden können, um 3D-Drucker in Schulen zu etablieren, allerdings zeigte sich, dass die hier verwendeten kostengünstigen Bausätze für Anfänger noch zuviel Nacharbeit erfordern — von den in 3 Runden gebauten 14 Druckern sind nur sehr wenige im Dauereinsatz, und auch nur bei Personen, die bereits vorher damit Erfahrung haben. Zwar erlaubt der Preis bspw. des *Geeetech i3* eine einfache Einstiegshürde, für den angedachten Zweck erfüllen die Drucker aber nicht ihren Zweck. Zusätzlich wurde bei diesen Workshops die Vergabe von Open Badges an die Workshopteilnehmer erprobt.

## Messeexponate

Um auf Veranstaltungen Personen anzulocken, wurden weiterhin diverse Ausstellungstücke aus der Makercommunity Aachen für Veranstaltungen mitbenutzt. Hier stand somit vor allem das Heranlocken von Nachwuchs zum Selberbauen im Vordergrund, daher wurden auch künstlerische Ansätze verfolgt:

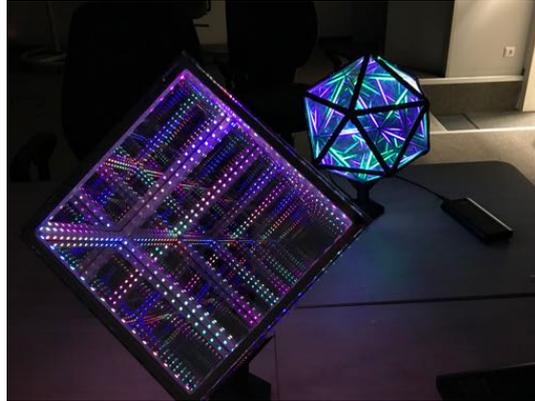


Abb. 22: Messeexponate

**Endless-Mirror-Objekte:** Ein laserschneidbarer Spionspiegel erlaubt relativ einfach den Bau faszinierender Demonstratoren, insbesondere als 3D-Formen, die vor allem als Eyecatcher genutzt wurden (Abb. 22 & 23). Das Interesse zum Nachbau war hoch, allerdings schreckten die Kosten etwas ab.



Abb. 23: Links: MirrorClock. Rechts: InfinityEarrings.

**SlateLite** ist ein Echtsteinfurnier einer deutschen KMU<sup>15</sup>. Es ist durchscheinend und auch flexibel erhältlich, außerdem laserschneidbar. Hier wurden Exponate mit einer LED-Matrix erstellt (s. Abb. 24).

<sup>15</sup><https://www.slate-lite.com/index.php>



**Fabscan Mobile:** Der an unserem Lehrstuhl entwickelte Fabscan<sup>16</sup>, ein kostengünstiger 3D-Scanner, wurde in diesem Projekt in eine faltbare Version des Fabscan Pi umgebaut, um für ein verkleinertes Transportvolumen zu sorgen (Abb. 26).



Abb. 27: TEDx Buchstaben

**TEDx Aachen Support:** Für das Bühnenbild der studentischen TEDx Aachen wurden große Buchstaben aus Plexiglas gelasert (Abb. 27).



Abb. 28: CHIO-Modelle

**CHIO Aachen:** Wir konnten dieses historische Reiterevent in Aachen dafür gewinnen, als Kommunikationsplattform für moderne Möglichkeiten der digitalen Fabrikation zu fungieren. Publikumswirksam wurden Hindernismodelle und Logos als Beispiele Verwendung moderner Produktionstechnologie präsentiert und teilweise während der Pressekonferenzen 3D-gedruckt; eine Siegerin wurde 3D-gescannt (Abb. 28).

## Verwertbarkeit der Ergebnisse

In allen Teilbereichen konnten interessante und neuartige Demonstratoren entwickelt werden, um die Möglichkeiten von Photonik-Techniken zu zeigen. Dadurch, dass die Ergebnisse frei verfügbar sind, gibt es zahlreiche Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte.

<sup>16</sup><https://hci.rwth-aachen.de/fabscan>

Besonders im Bereich HaptiVision-Toolkit und in Zusammenarbeit mit der Community sind zahlreiche Hardware-Demonstratoren entstanden, von der HaptiVest bis zu Spielen für Blinde, die die Bandbreite der Möglichkeiten darstellen. Durch das YAWN-Framework können neue Projekte, in denen Sensoren und Aktuatoren auf Textilien verbunden werden sollen, einfacher umgesetzt werden.

Das ARPen-System stellt eine interessante neue Interaktionsmöglichkeit mit Augmented Reality auf Smartphones dar. Es ermöglicht bereits, Skizzen und einfache Modelle in Augmented Reality zu erstellen. Die AR-Fähigkeiten von Smartphones entwickeln sich derzeit rapide weiter, was dem ARPen-Ansatz zugutekommt. In den aktuellen iPad Pros von Apple sind z.B. spezielle LIDAR-Sensoren verbaut, die die Stabilität des Trackings verbessern sollen. Da die initialen Interaktionsfragen mit einem solchen System in diesem Forschungsprojekt untersucht wurden, können nun konkretere Designaufgaben, wie ursprünglich in den Paketen AP B.4-6 geplant, implementiert und evaluiert werden. Die Materialien der Arduino-Workshops und das deutschlandweite Verleihnetzwerk werden weiterhin genutzt, um neuen Nutzern Photonik-Wissen zu demonstrieren und ihnen zu ermöglichen, ihre eigenen Projekte umzusetzen.

### **Weiterführende Forschungsarbeiten**

Auf den Ergebnissen von Personal Photonics wird in weiteren Forschungsprojekten aufgebaut. So entsteht derzeit basierend auf den Forschungsarbeiten im Teilprojekt iWand/ARPen eine Dissertation über die Interaktionsmöglichkeiten von Bimanual Handheld Augmented Reality.

Besonders im Bereich der Lehre werden die Prototypen als Grundlage für Praktika und Abschlussarbeiten weiterverwendet, um neue Interaktionmöglichkeiten zu entwickeln und zu untersuchen.

### **Open-Source Releases**

Die in Personal Photonics entstandenen Tools, Hard-&Software-Prototypen sowie Lernmaterialien in Form von Videos, Postern oder Lernkarten sind allesamt für Interessenten frei verfügbar. Somit können andere Forscher, Lernlabore, Lehrende, Fab Labs und andere diese Ergebnisse nutzen. Alle Ergebnisse aus den Teilprojekten A HaptiVision-Toolkit, B iWand, C InfoSphere-Workshops und D Dissemination sind auf der Projektseite zu finden.<sup>17</sup>

---

<sup>17</sup><http://personalphotonics.de>

## Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Projekts wurden iterativ in folgenden Veröffentlichungen publiziert:

### Teilprojekt A: HaptiVision-Toolkit

#### 2017

- Moritz Messerschmidt. **Badge Maker Developing an Easy-to-use System to Design and Build Illuminated Acrylic Name Tags for Children**. Bachelor's Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, April 2017.
- Jan Thar, Florian Heller, Sophy Stoenner und Jan Borchers. **HapticToolkit: Easily Integrate and Control Vibration Motor Arrays for Wearables**. In *ISWC '17: Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers*, pages 249–253, September 2017.
- Max Jodl. **Haptic sense - Evaluating the reliability and perception of vibration motor arrays on the human body**. Bachelor's Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, March 2017.

#### 2018

- Dimitri Zimmermann. **HaptiSculptVR - Virtual Reality Open Source 3D-Design with Haptic Feedback**. Bachelor's Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, September 2018.
- Jan Thar, Sophy Stoenner, Florian Heller und Jan Borchers. **YAWN: Yet Another Wearable Toolkit**. In *Proceedings of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers, ISWC '18*, pages 232–233, ACM, New York, NY, USA, 2018.
- Florian Heller, Jan Thar, Dennis Lewandowski, Mirko Hartmann, Pierre Schoonbrood, Sophy Stoenner, Simon Voelker und Jan Borchers. **CutCAD - An Open-source Tool to Design 3D Objects in 2D**. In *DIS '18: Proceedings of the 2018 Conference on Designing Interactive Systems, DIS '18*, ACM, New York, NY, USA, 2018.

#### 2019

- Timm Meiwes. **Userfriendly Wearable Networking for Interactive Fashion**. Bachelor's Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, May 2019.

## Teilprojekt B: iWand/ARPen

### 2017

- Luisa Hoffmann. **Eliciting User Gestures for the Interaction with a Pen-Based 3D Modeling Device**. Bachelor's Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, March 2017.

### 2018

- Philipp Wacker, Adrian Wagner, Simon Voelker und Jan Borchers. **Physical Guides: An Analysis of 3D Sketching Performance on Physical Objects in Augmented Reality**. In *Proceedings of the 6th Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '18, pages 10, ACM, New York, NY, USA, October 2018.
- Adrian Wagner. **Analyzing 3D Sketching Performance on Physical Objects in Augmented Reality**. Masters's Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, April 2018.
- Philipp Wacker, Adrian Wagner, Simon Voelker und Jan Borchers. **Physical Guides: An Analysis of 3D Sketching Performance on Physical Objects in Augmented Reality**. In *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '18, pages LBW626:1–LBW626:6, ACM, New York, NY, USA, April 2018.
- Felix Wehnert. **Pen-based Drawing in Augmented Reality on Mobile Phones**. Bachelor's Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, April 2018.

### 2019

- Jan Benschaid. **Making Sense of Lines: Interaction Sequences for 3D Modeling with Mid-Air Sketches**. Masters's Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, October 2019.
- Donna Klamma. **Rotating Objects: Implementation and Evaluation of Rotation Techniques for the ARPen System**. Bachelor's Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, August 2019.
- Oliver Nowak. **ARMenus: An Evaluation of Menu Interfaces in Pen-based AR Applications on Smartphones**. Masters's Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, February 2019.
- Philipp Wacker, Oliver Nowak, Simon Voelker und Jan Borchers. **ARPen: Mid-Air Object Manipulation Techniques for a Bimanual AR System with Pen & Smartphone**. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pages 619:1–619:10, ACM, New York, NY, USA, May 2019.

## 2020

- Philipp Wacker, Adrian Wagner, Simon Voelker und Jan Borchers. **Heatmaps, Shadows, Bubbles, Rays: Comparing Mid-Air Pen Position Visualizations in Handheld AR.** In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, pages 719:1–719:11, ACM, New York, NY, USA, April 2020.
- Philipp Wacker, Oliver Nowak, Simon Voelker und Jan Borchers. **Evaluating Menu Techniques for Handheld AR with a Smartphone & Mid-Air Pen.** To appear in *22nd International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '20, ACM, New York, NY, USA, October 2020.

## Teilprojekt D: Dissemination

### 2017

- Nadine Bergner, Patrick Franken, Julia Kleeberger, Thiemo Leonhardt, Mario Lukas, Mario Pesch, Natalia Prost, Jan Thar und Lina Wassong. **Das Calliope-Buch: Spannende Bastelprojekte mit dem Calliope-Mini-Board.** dpunkt, Book, July 2017.

### 2018

- Christian Schmidt. **Comparing feedback techniques for underwater navigation.** Masters's Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, September 2018.
- Aderick Krispradhana. **HaptiGuard: Sideway Detection Armband for Hearing-Impaired People.** Masters's Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, September 2018.
- Jan Thar, Sophy Stoenner und Jan Borchers. **HapticPong: Low Resolution Games for Visual Impaired.** In *Proceedings of the 2018 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play Companion Extended Abstracts*, CHIPlay '18, pages 133–136, ACM, New York, NY, USA, 2018.
- Jan Thar, Sophy Stoenner und Jan Borchers. **HaptiGames - Personally Fabricated for Visual Impaired.** In *Proceedings of the 2018 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play Companion Extended Abstracts*, CHIPlay '18, pages 137–141, ACM, New York, NY, USA, 2018.

### 2019

- Jan Thar. **Maker Cheat Sheets.** <http://personalphotonics.de/makercheatsheets> (Zugriff am 26.06.2020), RWTH Aachen University, Aachen, 2019.

**2020**

- Jan Borchers, Anke Brocker und Marcel Lahaye. **Flash Cards to Learn 3D Printing and Lasercutting**. <http://personalphotonics.de/lernkarten> (Zugriff am 26.06.2020), RWTH Aachen University, Aachen, 2020.

## Abbildungsverzeichnis

1.	HaptiVision Vest 1.0 . . . . .	7
2.	HaptiVision Vest 2.0 . . . . .	8
3.	Textile . . . . .	9
4.	Badgemaker . . . . .	10
5.	VR Sculpting Programm . . . . .	11
6.	Das ARPen-System mit iPhone und 3D-gedrucktem Stift . . . . .	15
7.	Der ARPen im Einsatz mit dem auf Karton gedruckten Stift. Zeichenfunktionen wählt man auf dem Smartphone-Touchscreen aus. Diese Variante erlaubt das 3D-Modellieren in AR überall mit dem eigenen Smartphone und einem Stift, der in jedes Portemonnaie passt. Download der iOS-App genügt; der Stift ist in der App als PDF zum Ausdrucken verfügbar. . . .	18
8.	Die Heatmap-Visualisierung aus AP B.5* . . . . .	19
9.	Menü-Interaktion mit dem Stift (links) oder an der Seite des Touchscreens (rechts) . . . . .	20
10.	InfoSphere-Stand auf der MakerFaire Dortmund . . . . .	23
11.	Der Photonik-Baum, der als Kit für die Workshops Digitale Fabrikation entwickelt wurde. . . . .	26
12.	Links: An Lernstationen zu 3D-Druck, Lasercutting, 3D-Scanning, Arduinoprogrammierung, Elektronik und 3D-Design lernten Teilnehmer des ac <sup>2</sup> -Workshops Digitale Fabrikation die Maschinen und Prozesse kennen, die die Teile des Photonik-Baums darstellen. Rechts: Teilnehmer bauen ihren eigenen Photonik-Baum zusammen und nehmen ihn in Betrieb. . . . .	26
13.	BrailleMemory . . . . .	27
14.	Construction Game . . . . .	28
15.	HapticKniffel . . . . .	28
16.	HaptiPong . . . . .	29
17.	Big Buttons . . . . .	30

18.	HaptiTilt . . . . .	30
19.	HaptiGuard . . . . .	30
20.	OpenLights Modifikation . . . . .	31
21.	Prototyp . . . . .	32
22.	Messeexponate . . . . .	33
23.	Links: MirrorClock. Rechts: InfinityEarrings. . . . .	33
24.	SlateLite Exponat . . . . .	34
25.	Peppers Ghost Modell . . . . .	34
26.	Fabscan Mobile . . . . .	34
27.	TEDx Buchstaben . . . . .	35
28.	CHIO-Modelle . . . . .	35

## Literatur

- Agrawal, Harshit, Udayan Umapathi, Robert Kovacs, Johannes Frohnhofen, Hsiang-Ting Chen, Stefanie Mueller und Patrick Baudisch (2015). „Protopiper: Physically sketching room-sized objects at actual scale“. In: *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, S. 427–436.
- Cardin, Sylvain, Daniel Thalmann und Frédéric Vexo (2007). „A wearable system for mobility improvement of visually impaired people“. In: *The Visual Computer* 23.2, S. 109–118.
- Cassinelli, Alvaro, Carson Reynolds und Masatoshi Ishikawa (2006). „Augmenting spatial awareness with haptic radar“. In: *2006 10th IEEE International Symposium on Wearable Computers*. IEEE, S. 61–64.
- Dakopoulos, Dimitrios, Sanjay K Boddhu und Nikolaos Bourbakis (2007). „A 2D vibration array as an assistive device for visually impaired“. In: *2007 IEEE 7th International Symposium on BioInformatics and BioEngineering*. IEEE, S. 930–937.
- Gershenfeld, Neil (2005). „Fab“. In: *The Coming Revolution on Your Desktop. From Personal Computers to Personal Fabrication Basic Books*.
- Hamdan, Nur Al-huda, Florian Heller, Chat Wacharamanotham, Jan Thar und Jan Borchers (2016). „Grabrics: A foldable two-dimensional textile input controller“. In: *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, S. 2497–2503.
- Israr, Ali und Ivan Poupyrev (2011). „Tactile brush: drawing on skin with a tactile grid display“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, S. 2019–2028.
- Johnson, Lise A und Charles M Higgins (2006). „A navigation aid for the blind using tactile-visual sensory substitution“. In: *2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. IEEE, S. 6289–6292.
- Lipson, Hod und Melba Kurman (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing*. John Wiley & Sons.
- Malone, Evan und Hod Lipson (2007). „Fab@Home: the personal desktop fabricator kit“. In: *Rapid Prototyping Journal*.
- Mann, Steve, Jason Huang, Ryan Janzen, Raymond Lo, Valmiki Rampersad, Alexander Chen und Taqveer Doha (2011). „Blind navigation with a wearable range camera and vibrotactile helmet“. In: *Proceedings of the 19th ACM international conference on Multimedia*, S. 1325–1328.
- Mateevitsi, Victor, Brad Haggadone, Jason Leigh, Brian Kunzer und Robert V Kenyon (2013). „Sensing the environment through SpiderSense“. In: *Proceedings of the 4th augmented human international conference*, S. 51–57.
- Mellis, David, Sean Follmer, Björn Hartmann, Leah Buechley und Mark D Gross (2013). „FAB at CHI: digital fabrication tools, design, and community“. In: *CHI'13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, S. 3307–3310.
- Piller, Frank T (2010). *Handbook of research in mass customization and personalization*. Bd. 1. World scientific.

- Ross, David A und Bruce B Blasch (2000). „Wearable interfaces for orientation and wayfinding“. In: *Proceedings of the fourth international ACM conference on Assistive technologies*, S. 193–200.
- Segond, Hervé, Déborah Weiss und Eliana Sampaio (2005). „Human spatial navigation via a visuo-tactile sensory substitution system“. In: *Perception* 34.10, S. 1231–1249.
- Song, Hyunyoung, François Guimbretière, Chang Hu und Hod Lipson (2006). „Model-Craft: capturing freehand annotations and edits on physical 3D models“. In: *Proceedings of the 19th annual ACM symposium on User interface software and technology*, S. 13–22.
- Wu, Juan, Zhenzhong Song, Weixiong Wu, Aiguo Song und Daniela Constantinescu (2011). „A vibro-tactile system for image contour display“. In: *2011 IEEE International Symposium on VR Innovation*. IEEE, S. 145–150.