

Technische Universität Kaiserslautern

Fernstudium Medizinische Physik

Masterarbeit

**Evaluation der Möglichkeiten von 3D-Druck in der Konstruktion von digitalen,
mikrofluidischen Gerätschaften basierend auf einer Open-Source Plattform**

von

Wilhelm Hilger

Betreuer:

Herr Urs Gaudenz

Ich versichere, dass ich diese Masterarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift

Biberist, 20.09.2017

XXXXXXXXXX

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Motivation und Danksagung	iii
Glossar	1
1 Einleitung	2
1.1 Überblick und Stand der Technik	2
1.1.1 Überblick „Elektrowetting“	2
1.1.2 Theorie des EW-Effekts:	4
1.1.3 Stand der „Electrowetting“-Technik	4
1.1.4 Überblick „3D-Druck“	7
1.1.5 Stand der 3D-Druck-Technik	7
1.2 Abgrenzung des Ziels	10
1.3 Ziel der Arbeit	11
2 Theorie und Übersicht genutzter Materialien und Gerätschaften	12
2.1 Kapitelkurzübersicht	12
2.2 Geräte und Materialien	12
2.2.1 Einleitung	12
2.2.2 3D-Drucker	13
2.2.3 Kunststofffilamente	13
2.3 Genutzte Software	14
2.4 Zusammenfassung und Diskussion des Kapitels	16
3 Praktische Durchführung	17
3.1 Übersicht des Kapitels	17
3.2 Versuche	18
3.2.1 Herstellung einer EWoD-Platine als Prototyp für „Proof-of-concept“-Test:	18
3.2.2 Reproduzierbarkeit des EWoD-Prototypen	23
3.2.3 Weitere 3D-gedruckte Platinen	26
3.2.4 3D-gedrucktes EWoD-Device	35
4 Zusammenfassung	42
4.1 Zusammenfassung der Versuche	42

4.1.1	Proof-of-Concept (Versuche der Kapitel 3.2.1 und 3.2.2)	42
4.1.2	Weitere 3D-gedruckte Platinen (Versuch Kapitel 3.2.3):	42
4.1.3	3d-gedrucktes EWoD-Device (Versuch Kapitel 3.2.4):	42
4.2	Aufgetauchte Herausforderungen:	43
4.2.1	Oberflächenbeschaffenheit (keine ebene Fläche)	43
4.2.2	Kontaktprobleme mit leitfähigem Kunststoff	43
4.2.3	Druckprobleme, aufgrund von Druckstopps oder Abbrüchen beim leitfähigen Filament	44
4.2.4	Unerwünschte Verbindungen zwischen den Elektroden	44
4.2.5	Ungenügende Druckgenauigkeit	45
4.3	Weitere offene Fragestellungen/Ideen für zukünftige Arbeiten:	45
4.3.1	Wie hoch darf der maximale Widerstand sein, damit der EW-Effekt erzeugt werden kann? Und was ist das Optimum?	45
4.3.2	Nutzung anderer leitfähiger Filamente mit Füllstoffen wie z.B. mit Graphen oder Kupfer	45
4.3.3	Intrinsisch leitfähige Kunststoffe als Elektrodenmaterial	46
4.3.4	3D- Formen (Wellen, Kanäle, Pumpen etc.)	46
4.3.5	Modularer Aufbau von Platinen und Devices	47
4.4	Ausblick:	47
5	Abkürzungs – und Symbolverzeichnis	49
6	Abbildungsverzeichnis	50
7	Literaturverzeichnis	51
8	Anhang	53

Motivation und Danksagung

Nach 3 Jahren Fernstudium ist es Zeit mich an dieser Stelle bei denjenigen zu bedanken, die mich unterstützt und motiviert haben.

An erster Stelle möchte ich mich bei meiner langjährigen Partnerin bedanken. Ohne Ihre Unterstützung und Geduld wäre es unmöglich gewesen, dieses Studium zu absolvieren.

Meinen Eltern und Geschwistern möchte ich ebenfalls Dank aussprechen, da sie ebenfalls zurückstecken musste, wenn es dann mal wieder hiess: Sorry, dieses Wochenende bin ich in Kaiserslautern.“.

Für die Betreuung der Arbeit möchte ich mich bei Urs Gaudenz bedanken, der mich mit seiner Arbeit fasziniert und inspiriert hat und mir während der Durchführung dieser Arbeit mit Rat und Tat zur Seite stand.

Danke auch an die DISC und deren Mitarbeiter für die Betreuung während des gesamten Studiums.

Glossar

Bowden-Extruder/ Direct-Drive-Extruder:

Dabei handelt es sich um die unterschiedlichen Aufbauten des Extruders und der Hotenddüse. Die folgende Abbildung zeigt diese verschiedenen Arten.

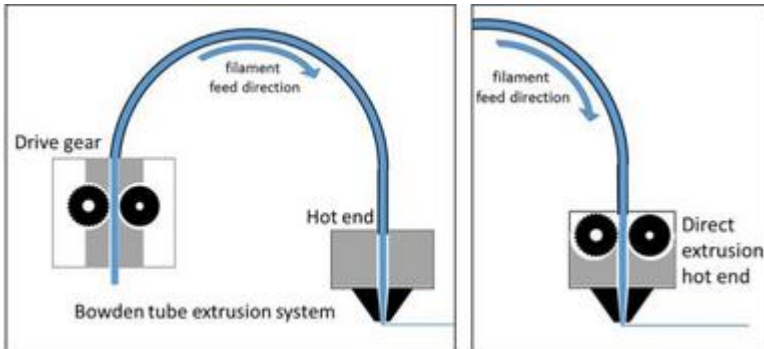


Abbildung 1: Bowden-Extruder vs. Direct-Drive-Extruder (1)

Breadboard:

Steckplatinen für elektrische Verbindungen oder Aufbauten

Heatbed:

Dabei handelt es sich um die Druckplatte in einem 3D-Drucker, welche beheizt werden kann. Durch die Temperatur bleiben die Drucke auf dem Heatbed „kleben“ und sie verziehen sich nicht.

Hotend (-Düse):

Beim Hotend oder der Hotenddüse handelt es sich um den Teil, welcher das Kunststofffilament aufschmilzt und auf der Druckplatte verteilt. Der Düsendurchmesser ist essentiell für die minimale Schichtbreite des Druckes.

Oozing/ Stringing:

Unter Oozing versteht man das Herausquellen von Filament. Dies spielt vor allem bei den Dual-3D-Druckern resp. Mehrfach-3D-Druckern eine wichtige Rolle, da das Herausquellen von Filament aus dem ungenutzten Extruder zu unerwünschten Filament-Verschleppungen führen kann.

Unter Stringing versteht man die Fäden, die bei falschen Druckeinstellungen entstehen können. Dabei wird Restkunststoff durch die Hotenddüse in die Länge gezogen und es entstehen unerwünschte Fäden.

G-Code:

Es handelt sich dabei um eine einfache Steuerungsprogrammiersprache, welche ursprünglich für das CNC-Fräsen genutzt wurde. (2)

1 Einleitung

1.1 Überblick und Stand der Technik

1.1.1 Überblick „Elektrowetting“

Der Elektrobenetzungseffekt (englisch „Electrowetting“, im Weiteren mit EW abgekürzt) ist ein physikalischer Effekt, welcher durch Anlegen einer Spannung auf einen Flüssigkeitstropfen entsteht.

Der EW wird durch Anlegen eines elektrischen Spannungsfeldes herbeigeführt, welches die Oberflächenspannung des Flüssigkeitstropfens beeinflusst, genauer gesagt, diese herabsetzt. Beschrieben wird dies durch die Verkleinerung des Kontaktwinkels θ . Dies führt dazu, dass die Flüssigkeit auf der Auflagefläche „zerfließt“, d.h. sie benetzt mehr Fläche als vorher. Der Effekt, wie man im Folgenden erkennt, lässt sich am besten visuell erläutern:

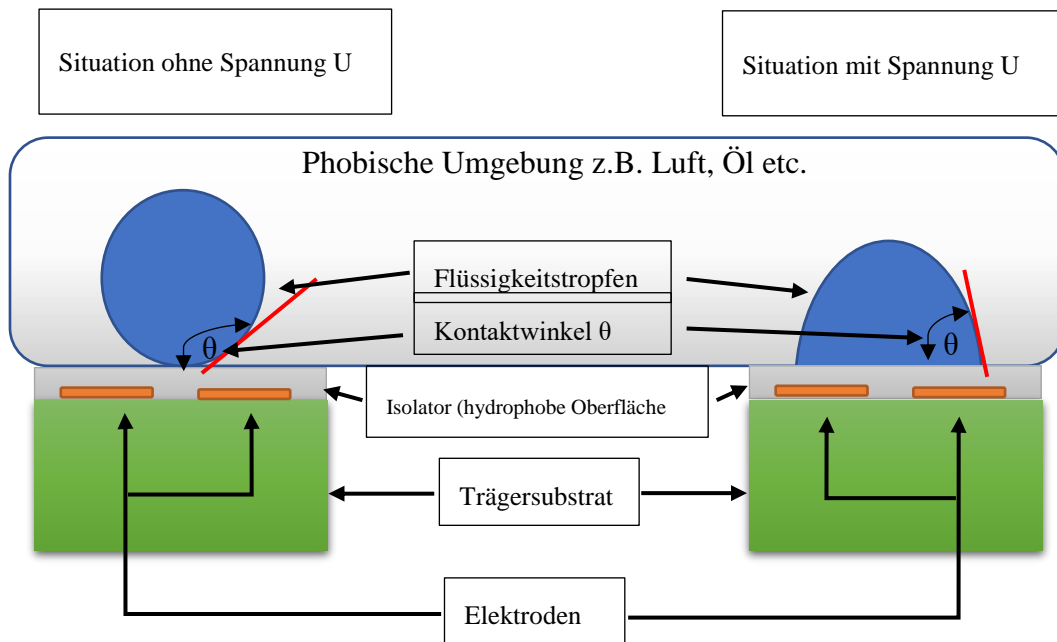


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Elektrowetting-Zelle (links: ohne angelegte Spannung/ rechts: mit angelegter Spannung)

Abbildung 2 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer Elektrowetting – on – Dielectric Zelle (im Folgenden mit EWoDZ abgekürzt) und die Situation ohne resp. mit angelegter Spannung an den Elektroden. Der hier gezeigte Aufbau zeigt eine sogenannte spontane EW-Konfiguration, da der Flüssigkeitstropfen auf parallele Elektroden platziert wird. Bei der klassischen Anordnung würde eine der Elektroden direkten Kontakt mit dem Flüssigkeitstropfen haben (3).

Eine EWoDZ besteht aus ca. vier-fünf einzelnen Schichten, welche im Folgenden, mit einer kurzen Erklärung, bezüglich des Beitrags zur Funktion der EWoDZ, aufgelistet sind:

1.1.1.1 Trägersubstrat

Das Trägersubstrat dient in erster Linie zur Stabilität und zur Formgebung der EWoDZ. Es können dabei die unterschiedlichsten Materialien verwendet werden, von Papier bis hin zu Kunststoff sind dort verschiedene Möglichkeiten gegeben. Bei genügender Abschirmung zwischen den Elektroden wäre auch Metall möglich. Der Einsatz von flexiblen Materialien (v.a. Kunststoff) erlaubt biegsame Arrays von EWZ herzustellen, welche dann z.B. für flexible Displays genutzt werden können. Das Trägersubstrat ist an der Funktion der EWoDZ nur passiv beteiligt, indem es ihr eine Form verleiht.

1.1.1.2 Isolationsschicht

Die Isolationsschicht kann aus einem Isolationsmaterial oder zwei Materialien (Einer Isolationsschicht und einer hydrophoben Schicht) bestehen. Prinzipiell könnte sie auch weggelassen werden. Ursprünglich wurde mit dem Term Electrowetting die Nutzung einer EWoDZ ohne Isolationsschicht, was dann einer Electrowettingzelle entspräche, bezeichnet.

Die Isolationsschicht hat einen grossen Einfluss auf die benötigte Spannung, welche notwendig ist, um einen Elektrobenetzungseffekt herbeizuführen. (4)

1.1.1.3 Elektroden

Die Elektroden sind das Herzstück der EWoDZ. Mit ihnen wird das für den Elektrobenetzungseffekt notwendige elektrische Feld aufgebaut. Als Materialien für die Elektroden werden häufig bekannte Materialien aus der Platinenherstellung genutzt (3). Einige Arbeiten verwenden für die Elektroden neuartige Materialien wie z.B. leitfähige Tinte (5) oder Nanomaterialien (6).

1.1.1.4 „Flüssigkeitstropfen“

Der Flüssigkeitstropfen ist dasjenige Medium, welches durch das elektrische Feld beeinflusst werden soll. Für den EW muss die Flüssigkeit aus dem der Tropfen besteht polar sein, sonst würde er durch die angelegte Spannung keine Änderung erfahren. Um einen unpolaren Tropfen zu beeinflussen ist es jedoch möglich den Tropfen mit einem nicht mischbaren, polaren Stoff zu umgeben, sodass diese durch die Spannung beeinflusst werden kann, was indirekt auch den unpolaren Tropfen beeinflusst. (3)

Durch Aneinanderreihung von EWoDZ, kann der Flüssigkeitstropfen entlang des Spannungsverlaufs verschoben werden. D.h. durch Abschalten und Anschalten einer Spannung kann ein Tropfen über ein Elektrodenfeld gesteuert direkt gesteuert werden.

1.1.1.5 „Phobische Umgebung“

Unter „phobischen“ Umgebung ist diejenige Umgebung gemeint, die den zu manipulierenden Flüssigkeitstropfen umgibt. Der Ausdruck „Phobisch“ dient hier zur Hervorhebung der Eigenschaft der Umgebung gegenüber des Flüssigkeitstropfens. Explizit heisst dies am Beispiel eines Wassertropfens, welcher durch die EWoDZ manipuliert werden soll, dass seine direkte Umgebung hydrophob (d.h. Luft oder Öl) sein muss. Die phobische Umgebung hat einen direkten Einfluss auf die Ausbildung eines grossen Kontaktwinkels θ . (3)

1.1.2 Theorie des EW-Effekts:

Der Electrowettingeffekt basiert, wie bereits erwähnt, auf den Einfluss eines elektrischen Spannungsfeldes auf die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit d.h. letztendlich kommt es zu einer Veränderung des Kontaktwinkels θ der Flüssigkeit. Unterschiedliche Spannungen U führen somit zu unterschiedlichen Kontaktwinkeln θ . Dies kann mithilfe der Lippmann Gleichung vorhergesagt werden:

$$\cos\theta_U = \cos\theta_0 + \frac{\epsilon_0 * \epsilon}{2d\gamma} * U^2 \quad \text{Formel 1}$$

θ_U = Kontaktwinkel Flüssigkeit ohne Spannung

ϵ_0 = Dielektrizitätskonstante der Umgebung

ϵ = Dielektrizitätskonstante Isolation

d = Dicke der Isolation

γ = Oberflächenspannung der Flüssigkeit

Man könnte nun davon ausgehen, dass je grösser das Delta zwischen dem Kontaktwinkel θ_0 (Spannungsloser Zustand) und θ_U (Angelegte Spannung), desto grösser ist der EW-Effekt. Jedoch tritt ab einem bestimmten Zeitpunkt eine Sättigung auf, was zu einer Einschränkung des EW-Effektes führt. (3), (7)

1.1.3 Stand der „Electrowetting“-Technik

Der Elektrobenetzungseffekt wird vorwiegend in elektrooptischen Geräten wie Linsen und Displays verwendet. Er findet jedoch auch in der Mikrofluidik Anwendungen und ist die Grundlage der sogenannten digitalen Mikrofluidik (im weiteren DMF genannt). In der Mikrofluidik werden Flüssigkeitsvolumen im Mikroliterbe-

reich verarbeitet d.h. es werden verfahrenstechnische Manipulationen, wie z.B. Fördern, Mischen, Erhitzen, Sortieren mithilfe entsprechender Gerätschaften, an diesen sehr kleinen Volumina ausgeübt. Derzeit findet man für die Umsetzung in dieser Größenordnung in erster Linie statische Gerätschaften wie z.B. Mikroreaktoren aus Glas, welche verbunden sind via Schläuchen und in denen Fördergut mittels Hochpräzisionspumpen gefördert wird.

Bei der DMF hingegen sind keine Pumpen und Schläuche notwendig. Durch die Nutzung des EW können Flüssigkeiten auch ohne diese Hilfsmittel entsprechend manipuliert werden. In der Praxis werden dafür (z.T. grossflächige) Elektroden-Arrays in Zusammenarbeit mit einer entsprechenden Software genutzt. Diese Systeme werden dann als Elektrowettingdevices, genauer EWoD-Devices, bezeichnet.

In der Forschung werden diese EWoD-Devices oftmals für den Transport oder der Manipulation von minimalen Mengen an Flüssigkeiten genutzt. Mit ihnen lassen sich Mikroreaktoren realisieren, welche die zu manipulierenden Flüssigkeiten direkt angesteuert und manipuliert werden können. Diese aktive Manipulation erlaubt es präzise die Reaktionen oder die Transportwege zu steuern, was die EWoD-Devices so flexibel macht. Anders als die bekannten, statischen Mikroreaktoren können mit einem EWoD-Devices mehrere unterschiedliche Reaktionen durchgeführt werden, wobei man nicht für jede neue Reaktion die Flussrate, die Mikrofluidikdevices oder die Länge der Schläuche anpassen muss. (8), (9)

Auf dem freien Markt existierte ein Gerät (*Illumina - NeoPrep System*), das den EW-Effekt zum Transport und Mischen von Flüssigkeiten nutzte. Es diente zur automatischen Herstellung von DNA-Bibliotheken für sogenannte Next-Generation-Sequencing Analysen und erlaubte damit eine Standardisierung des Präparierungsprozesses. Der Vertrieb des Gerätes wurde jedoch Anfang des Jahres 2017, genauer 31.01.2017, eingestellt. Die Gründe hierfür sind jedoch unbekannt. (10)

1.1.3.1 Beispiele für EWoD-Gerätschaften

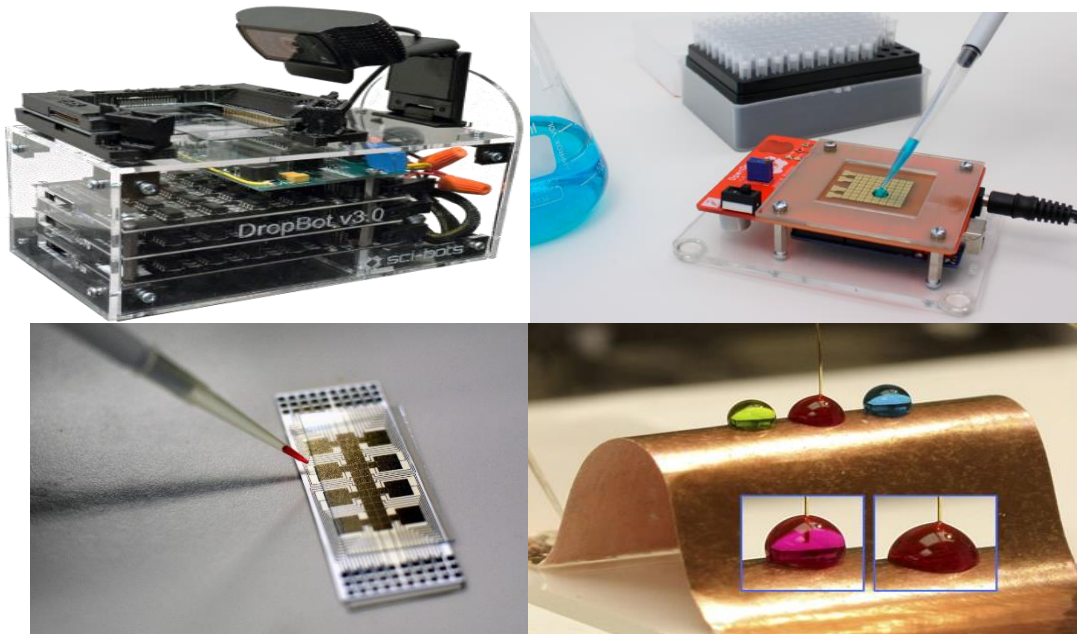


Abbildung 3: V.l.o.n.r.u.: Dropbot, ein Open-Source Gerät des Wheeler Microfluidics Laboratory (24)/ OpenDrop-EWoD-Device von Gaudilabs (11)/ Paper-based digital microfluidics (25)/ Flexible electro- n-ic paper technology (26))

In Abbildung 3 sind diverse Beispiele für Elektrodenarrays und für EWoD-D zu sehen. Das Bild links oben zeigt die DNA-Bibliothek des NeoPrep-Gerätes der Fa. Illumina. Das Bild oben rechts, zeigt ein EWoD-D namens OpenDrop, welches als Inspiration für diese Masterthesis gedient hat. In der Quelle (11) wird der Open-Drop und dessen Funktionen und Spezifikationen erläutert. Es handelt sich dabei um eine „Open-Source“. D.h. es handelt sich um ein quelloffenes Gerät, welches durch interessierte Personen nachgebaut und beliebig verbessert und umgestaltet werden kann.

Die beiden unteren Bilder zeigen Beispiele für Elektrodenarrays, wie sie in der Praxis umgesetzt wurden.

Für die bisherige Herstellung eines EW-Elektrodenarrays, werden üblicherweise klassische Verfahren zur Platinenherstellung (Photochemische Verfahren, Fräsen u.a.) und klassische Materialien genutzt. Diese Verfahren sind etabliert, günstig und erlauben sehr komplexe Elektrodenarrays. Jedoch sind diese Arrays in erster Linie auf zwei Dimensionen beschränkt und ihre Komplexität beschränkt sich auf diese beiden Ebenen. Dies reicht für die meisten Anwendungen aus, jedoch birgt die Erweiterung um eine weitere Dimension die Chance neue mögliche Anwendungen mithilfe des EW zu realisieren. Die grundsätzliche Realisierbarkeit der Herstellung von EW-Arrays und schlussendlich auch von EWoD-D mittels 3D-Druck ist das Ziel dieser Masterthesis. Genauer wird im Kapitel 1.3 ausführlicher erläutert.

1.1.4 Überblick „3D-Druck“

Kein anderes Herstellungsverfahren hat in den letzten Jahren so viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen wie die des 3D-Drucks. Nach jahrelanger Stagnation in der Entwicklung (erster 3D-Drucker wurde bereits 1981 durch Charles W. Hull entwickelt, jedoch kamen diese Geräte nie über ihr Nischendasein hinaus (12)), konnte sich der 3D-Druck, vor allem mithilfe der aufkommenden Open-Source Community zu einem echten alternativen Herstellungsverfahren im Bereich additive Manufacturing und Rapid Prototyping etablieren. Derzeit hält er in immer mehr Industrien Einzug und immer neuere Anwendungen kommen hinzu (z.B. Bioprinting von Organen, Lebensmitteldruck etc.). In erster Linie ist der Erfolg darauf zu begründen, da der 3D-Druck viele Vorteile gegenüber anderen Verfahren wie z.B. Spritzguss hat. Zu den Vorteilen zählen unter anderen die Flexibilität, Genauigkeit und Geschwindigkeit bis ein Prototyp hergestellt ist.

1.1.5 Stand der 3D-Druck-Technik

Im 3D-Druck werden 4 Arten unterschieden, welche sich durch das Material und die Art der Materialauftragung unterscheiden:

3D-Druck mit Pulver

- 3DP/ SLS/ EBM

3D-Druck mittels geschmolzenen Materialien

- FFF/FDM

3D-Druck mittels flüssigen Materialien

- STL/ SLA/DLP
- Multi Jet Modeling/Polyjet
- Film Transfer Imaging

Weitere Verfahren

- Laminated Object Modeling (Papier/Folie zusammenkleben z.B.: Mcor IRIS siehe (13))

Die Entwicklung im 3D-Druck ist jedoch weiterhin rasant, sodass man davon ausgehen kann, dass die oben aufgestellte Liste in naher Zukunft um weitere Drucktechniken anwächst.

Da in dieser Arbeit der 3D-Druck mittels geschmolzenem Material (FDM/FFF) verwendet wird, so wird diese Drucktechnik im Weiteren näher erläutert.

1.1.5.1 3D-Druck mittels geschmolzenen Materialien

Diese Art des 3D-Drucks ist die wahrscheinlich am meisten verwendete im Hobbybereich. Dies ist v.a. aufgrund der einfachen Handhabung, des günstigen Anschaffungspreises und der Flexibilität des zu deruckenden Materials. Üblicherweise werden hier Filamente unterschiedlicher Kunststoffsorten mit unterschiedlichen Füllstoffen genutzt. Die Sorten des Kunststoffes sind dort weitestgehend auf die thermoplastischen (d.h. Kunststoffe, welche unter thermischer Einwirkung sich verflüssigen ohne sich zu zersetzen) beschränkt, wobei diese Beschränkung immer noch eine grosse Anzahl an industriell verwendeten Kunststoffen erlaubt. Die bekanntesten und wahrscheinlich meist genutzten Sorten sind die Kunststoffe PLA und ABS.

Bei PLA handelt es sich um Polylactide, einem Polymer bestehend aus dem Monomer Milchsäure, welches durch Vergärung gewonnen werden kann. Es zählt zu den biokompatiblen Kunststoffen und lässt sich somit auch biologisch abbauen.

ABS steht für Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer. Es handelt sich bei diesem um ein sogenanntes Terpolymer, da es aus drei verschiedenen Monomeren besteht. ABS ist ein nicht biologisch abbaubarer Kunststoff. Obwohl er sehr anfällig gegenüber Lösungsmitteln wie Aceton oder Dichlormethan ist, ist ABS ein weit in der Industrie verbreiteter Kunststoff. (14)

Weitere bekannte Kunststoffe, welche im 3D-Druck verwendet werden, sind HIPS, PVA, PC, Nylon, PEEK u.a. Zu diesen gesellen sich aufgrund der raschen Entwicklung immer mehr Kunststoffe hinzu, sodass die Bandbreite immer grösser wird und somit auch die Anwendungsmöglichkeiten.

Neben dem (Grund)-Polymer selber sind die Füllstoffe entscheidend für die Eigenschaften des Filaments und schlussendlich für das gedruckte Objekt. Auch hier werden alle erdenklichen Möglichkeiten angeboten von verschiedenen Farben über Holz, Gips etc. bis hin zu funktionalen Füllstoffen wie z.B. Silber, Kupfer, Graphene etc. Dadurch bietet diese Art des 3D-Drucks dem Anwender einen grossen Spielraum an Möglichkeiten für seine eigene Kreationen und Ideen.

1.1.5.2 Infografik 3D-Druck mittels FFF Verfahren:

Die folgende Infografik soll die Funktionsweise und die Vor- und Nachteile des 3D-FFF-Drucks in Kürze aufzeigen, um ein grundsätzliches Verständnis der Technik zu vermitteln. Weitere Details und Funktionsbeschreibungen sind in entsprechender Fachliteratur zu finden.

FDM/FFF 3D Druck

3D-Druck mit Kunststofffilamenten (am Beispiel des CEL ROBOX RBX02 der Firma CEL UK)

Kunststofffilamente

Das Analogon zur Tinte im Papierdrucker, ist im FDM/FFF 3D Druck das Kunststofffilament. Die Palette der Filamente ist umfangreich und im folgenden werden einige Beispiele aufgelistet:

- Kunststoffarten: PLA; ABS; ASA; PC; PET; PEEK; PVA; HIPS; NYLON

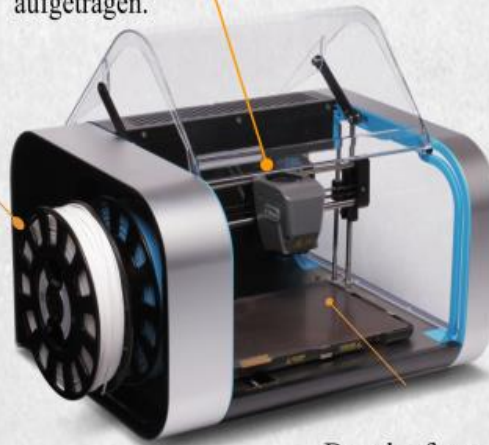
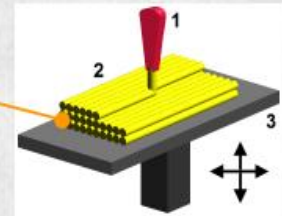
- Eigenschaften (z.T. durch Füllstoffe): Leitfähig; Carbonverstärkt; Luminiszierend; Flexibel; Verformbar

Filamente werden ständig weiterentwickelt, wie auch die Extruder um diese zu drucken. Durch Mischungen von zwei verschiedenen Kunststoffen können neue Eigenschaften erzeugt werden. Dafür werden sogenannte Mischextruder wie z.B. der Diamond Extruder (siehe reprap.me).

Extruder

Die Extruder sind die Druckelemente des 3D-Druckers. Hier werden die Kunststofffilamente aufgeschmolzen und durch eine Düse (1) auf die Bauplattform (3) Schicht für Schicht (2) aufgetragen.

Prinzip



Bauplattform

Auf der Bauplattform werden die Schichten zu der jeweiligen Form aufeinandergelegt. Um die Haftung zwischen Kunststoff und Oberfläche der Plattform zu verbessern werden entweder Haftvermittler (z.B. Haarspray) genutzt oder die Plattform kann beheizt werden.

Quellen:

- Prinzipskizze: <http://s630617833.online.de/3d-print-service-wien>, Retrieved 26.06.2017
- 3D-Drucker Foto: <http://www.cel-robox.com/>, Retrieved 26.06.2017
- Inhalt: <https://3druck.com/grundkurs-3d-drucker/teil-2-uebersicht-der-aktuellen-3d-druckverfahren-462146/>, Retrieved 26.06.2017

Abbildung 4: Infografik FDM/FFF 3D-Druck

1.2 Abgrenzung des Ziels

	3D-Druck	EW/EWoD	Mikrofluidik	PCB- Herstellung	Elektroni- sche Bau- teile
3D-Druck		-	++	+	+
EW/EWoD	-		++	++	++
Mikrofluidik	++	++		+	n.a.
PCB- Herstellung	+	++	+		n.a.
Elektronische Bauteile	+	++	n.a.	n.a.	

Tabelle 1: Literatur- und Stand der Technik Vergleich

Legende:

++	-	viel Literatur vorhanden (>50 verschiedene Quellen)
+	-	wenig Literatur (1-50 Quellen)
-	-	keine Literatur vorhanden
n.a.	-	nicht genutzte Suchkriterien

In der obenstehenden Korrelationsmatrix ist die Literaturrecherche zusammengefasst und soll über die Ausbeute der gefundenen Literaturstellen informieren. Es handelt sich bei den Bezeichnungen um die Suchwörter, welche genutzt wurden (deutsche und englische Suche) um die Literaturrecherche durchzuführen. Das Symbol in der korrelierenden Zelle zeigt die Ausbeute, welche die Suchkombination in unterschiedlichen Online-Bibliotheken (JSTOR, IEEE Xplor Digital Library, ScienceDirect, PubMed NCBI) brachte.

Auswertung:

Es zeigte sich, dass es sehr viel Literatur zu den Kombinationen EW/EWoD/Mikrofluidik, EW/EWoD/PCB-Herstellung, EW/EWoD/elektronische Bauteile, Mikrofluidik/3D-Druck gab. Weitaus weniger Literatur konnte zu der Kombination Mikrofluidik/PCB-Herstellung gefunden werden (oftmals handelte es sich um dieselbe Literatur wie bei der Kombination EW/EWoD/Mikrofluidik). Zu der Kombination EW/EWoD/ 3D-Druck kam es zu keinen Treffern. Das heisst, es wurde keinerlei Literatur gefunden, die dieses Thema als Forschungsfrage behandelt haben.

Ergebnis:

Basierend auf der Literaturrecherche ist die Schnittstelle zwischen 3D-Druck und EW/EWoD bisher kein Thema in der Forschung. Somit wäre auch die Herstellung

von DMF-Geräten mithilfe dieses Ansatzes etwas vollkommen Neues. Die grundlegende Machbarkeit soll Thema dieser Masterthesis sein und als Grundlage für weitere Forschungen auf diesem Gebiet dienen.

1.3 Ziel der Arbeit

Die Masterarbeit hat das Ziel, die „Medizinische Physik“ um grundlegende Erkenntnisse zu bereichern. Dies betrifft insbesondere die Schnittstelle zwischen Electrowetting und 3D-Druck. Hierzu wurden bis zum Zeitpunkt der Thesis keine Literatur und weitere Informationen gefunden, die dieses Themenfeld bearbeiten resp. die zu diesem Thema etwas aussagen. Forschungsarbeiten die diese Schnittstelle näher betrachten sind keine bekannt.

Aufgrund der somit bevorstehenden Grundlagenarbeit wird wie folgt vorgegangen:

Zuerst werden die theoretisch notwendigen Grundlagen für die Herstellung einer EWZ mittels 3D-Druck analysiert und dargestellt.



Der nächste Schritt wäre die Herstellung von Prototypen zur Überprüfung der Machbarkeit, sowie Darstellung der aufgetretenen Probleme, Schwierigkeiten und Hürden die die Herstellung mit sich bringt.



Am Ende der Thesis soll geklärt sein, ob mit den vorhandenen Mitteln eine funktionsfähige EWZ resp. ein funktionsfähiges EWZ-Array hergestellt werden kann.



Eine der Hauptmotivationen dieser Arbeit, ist es den Grundstein für die Entwicklung von EWoD-Devices mittels 3D-Druck zu legen und somit eine Möglichkeit zu schaffen, dass interessierte Personen sich selbst dreidimensional verlaufende EWoD-Devices erschaffen können und somit neue, interessante Anwendungen erschaffen werden. Das Ziel wird es nicht sein die bestehende, günstige Platinenherstellungstechnik abzulösen, jedoch diese bei Bedarf zu ergänzen. Es liessen sich mithilfe des 3D-Drucks auch neue Formen für EWDs erschaffen, an die man bisher noch gar gedacht hat oder für die man bisher viel Aufwand betreiben muss (z.B. Mikropumpen).

Als Anstoss dieser Arbeit diene das Gerät „OpenDrop“, welches von A.Mirelar und U. Gaudenz (11) entwickelt wurde und welches aus einem Hackerspacelabor

entstammt. „Open Source“ und die Makerszene spielen in dieser Arbeit insofern eine entscheidende Rolle, als das man mit Gerätschaften und Materialien arbeitet, welche man als Privatperson beziehen kann, ohne dass man ein eigenes Gewerbe resp. Labor besitzt oder für eines arbeitet.

2 Theorie und Übersicht genutzter Materialien und Gerätschaften

2.1 Kapitelkurzübersicht

Dieses Kapitel stellt eine Übersicht darüber dar, welche theoretischen Voraussetzungen gelten müssen, damit eine EWZ und ein ganzes Array funktioniert. Diese theoretischen Voraussetzungen werden mit den vorhandenen Mitteln verglichen und analysiert. Die hier offenen Fragen werden dann z.T. mithilfe der praktischen Versuchsdurchführungen empirisch beantwortet.

Ebenfalls in diesem Kapitel zu finden, sind die vorhandenen Materialien und Geräte mit ihren Eigenschaften. Aufgrund der Arbeiten mit elektrischer Spannung, wird am Ende kurz auf die Sicherheit eingegangen, da die hier durchgeführten Experimente auch zuhause nachgebaut werden könnten.

2.2 Geräte und Materialien

2.2.1 Einleitung

Im Folgenden werden die genutzten Geräte und Materialien, samt ihrer Spezifikationen dargestellt.

Bezeichnung	Spezifikationen	D/Fn
Spez. 1		
Spez. 2		

Legende:

- Bezeichnung
 - Bezeichnung des Gerätes, Filaments oder Zubehörs
- Spezifikationen
 - wichtigsten Spezifikationen für die Arbeiten (weitere Informationen können bei den Herstellern direkt abgerufen werden)
- „D/Fn“
 - Im weiteren Verlauf genutzte Abkürzung für entsprechendes Gerät/ Filament (D für Drucker/ F für Filament/ n = fortlaufende Nummerierung)

Generell genutzt werden, über die gesamte Arbeit hinweg, Softwareanwendungen zur Erstellung der CAD-Zeichnungen (Autodesk Fusion 360), zur Bearbeitung, Optimierung und Transformation der CAD-Modelle in druckbare stl.- oder obj.-Dateien (Mesh-Mixer, Autodesk Netfabb, Slic3r) und die Steuerungssoftware für die 3D-Drucker (Automaker). Wichtige Aspekte dieser Arbeit bleibt der Open-Source Gedanke, aus diesem Grund werden auch Materialien, Geräte und Software verwendet, welche im Handel oder frei erhältlich sind.

2.2.2 3D-Drucker

Als 3D-Drucker werden FDM-3D-Drucker genutzt. Als „Besonderheit“ dieser Masterarbeit sei hier das genutzte Dualextruder-Verfahren erwähnt, welches es erlaubt mehrere Filamente innerhalb eines Drucks zu verwenden.

Die Daten entstammen den Spezifikationen, welche durch die Hersteller mitgeliefert wurden und sind auch auf dessen Homepage zu finden (15)

Robox Cel RBX2	Spezifikationen	D1
Build Volume:	210x150x100 mm	
Minimale Z-Auflösung:	0.02 mm	
Düsendurchmesser:	2x 0.4mm	
Max. Temp. Extruder:	280°C	
Extruder:	2	
Multimaterial:	Ja	

2.2.3 Kunststofffilamente

Im Folgenden werden die bekannten und wichtigsten Spezifikationen der während der Durchführung genutzten Kunststofffilamente aufgelistet. Es sei nochmals erwähnt, dass es sich bei den Filamenten um frei im Handel erhältliche Filamente handelt.

Robox Cel PLA	Spezifikationen	F1
Kunststoff:	PLA	
Füllstoff:	div. Farbpigmente	
Durchmesser:	1.75mm	

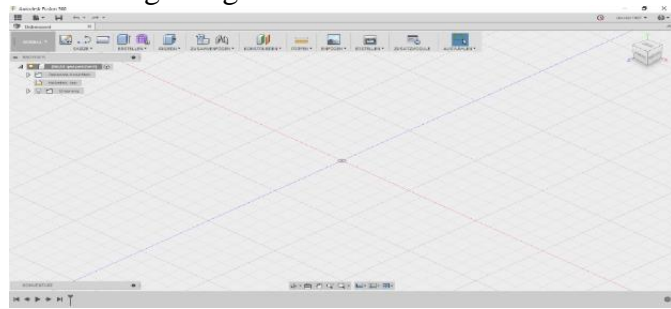
Proto Pasta Conductive Filament	Spezifikationen	F2
Kunststoff:	PLA	
Füllstoff:	Conductive carbon black (Leitruß)	
Widerstand:	ca. 30 Ω /cm	
Durchmesser	1.75 mm	

Robox Cel ABS	Spezifikationen	F3
Kunststoff:	ABS	
Füllstoff:	div. Farbpigmente	
Durchmesser	1.75 mm	

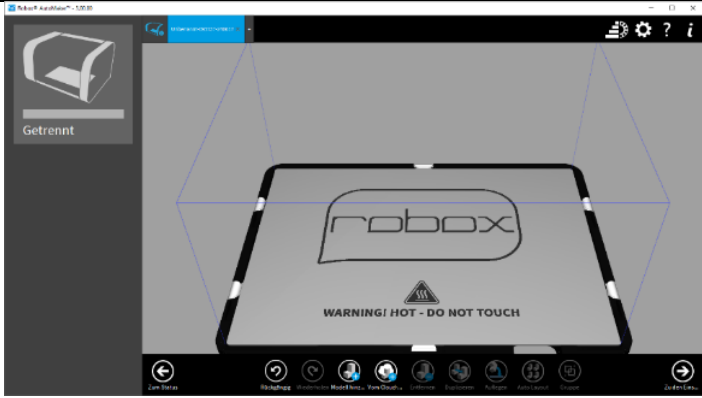
Weitere Materialien

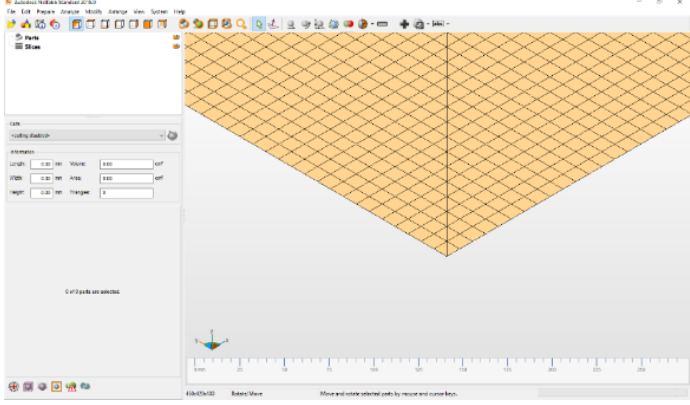
Bezeichnung	Spezifikationen
Hochspannungsquelle	Einstellbare Spannungsquelle 0-250V
Parafilm M	Polyethylen-Paraffinfilm als Isolationsschicht.
Weitere Materialien	Lötkolben und div. Kupferkabel etc., Open Drop EWoD-Device, Silikonöl, Messschieber (Anzeige: 0.1mm), Tinte, deionisiertes Wasser.

2.3 Genutzte Software

Autodesk Fusion 360 Ultimate Student	Version: 2.0.3174
Kurzbeschreibung: CAD-Zeichensoftware	Arbeitsumgebung: 

Robox AutoMaker	Version: 3.00.00
Kurzbeschreibung:	Arbeitsumgebung:

<p>Steuersoftware für Cel-Robox 3D-Drucker</p>	
--	--

<p>Autodesk NetFabb Standard</p>	<p>Build: 1608 Version:2018.00</p>
<p>Kurzbeschreibung:</p> <p>3D-Druckersoftware zur Bearbeitung, Reparatur und Optimierung von CAD-Dateien</p>	<p>Arbeitsumgebung:</p> 

<p>Autodesk Mesh Mixer</p>	<p>Version: 3.2</p>
<p>Kurzbeschreibung:</p> <p>3D-Druckersoftware zur Bearbeitung und Optimierung von CAD-Dateien</p>	<p>Arbeitsumgebung:</p> 

2.4 Zusammenfassung und Diskussion des Kapitels

Für diese Arbeit werden verschiedene handelsübliche oder kostenlose Geräte, Materialien oder Software genutzt. Warum diese genutzt werden liegt zum einem daran, dass es sich um eine Arbeit handelt, welche hauptsächlich nicht in einem Labor durchgeführt wurde und zum anderen, um zu beweisen, dass mit diesen erschwinglichen Materialien und Geräten, Platinen entwickelt werden können, die den EWoD – Effekt erzeugen können, um so Flüssigkeiten im Milli- .resp. Mikroliter Bereich zu transportieren. Hauptsächlich unterscheiden sich diese Geräte, Materialien und Software für den Heimgebrauch in ihrem Funktionsumfang und von ihrer Genauigkeit von den industriellen Geräten. Letztere Einschränkung ist beim genutzten 3D-Drucker von Cel Robox insbesondere bei der genutzten Extruderdüse zu spüren. Diese besitzt mit 0.4mm Durchmesser eine Standardgrösse, kann jedoch nicht einfach durch eine Düse mit kleinerem Durchmesser ausgetauscht werden, da der CEL Robox RBX2, wie alle 3D-Drucker der Firma Cel, ein Ventil besitzen und die Extruderdüse spezifisch für diesen Aufbau hergestellt worden ist. Dadurch werden die erreichbare Genauigkeit und auch die Flexibilität des Druckers eingeschränkt. Weiter ist der Funktionsumfang der Steuerungssoftware soweit eingeschränkt, dass tiefere Eingriffe in den G-Code¹ nur äusserst begrenzt und nur mit sehr viel Fachwissen möglich sind. Das genutzte leitfähige Filament von ProtoPasta ist ein Filament, welches sich noch auf Versuchsebene befindet. Es ist kein häufig und schon gar kein industriell genutztes Filament, sodass man mit diversen Problemen während des Drucks rechnen muss.

¹ Rechnergesteuerte Programmiersprache

3 Praktische Durchführung

3.1 Übersicht des Kapitels

Dieses Kapitel zeigt die verschiedenen Versuchsreihen, welche während der Dauer der praktischen Durchführung aufgestellt und ausgewertet worden sind.

Der Aufbau der Versuchsdarstellung ist wie folgt:

- Ziel des Versuchs
Hier werden das/ die Ziel/-e des jeweiligen Versuches aufgezeigt. Weiter können hier ebenfalls die im Vorfeld definierten Akzeptanzkriterien aufgelistet werden.
- Materialien
Hier werden die Materialien, welche für den Versuch verwendet wurden, aufgelistet. Die Abkürzungen der Materialien und deren Spezifikationen sind im Kapitel 2.2 aufgelistet.
- Aufbau (Skizze)
Hier sind die wichtigsten Daten der genutzten STL- oder OBJ-Datei zusammengefasst, sowie Abbildungen der CAD-Datei.
Da die Inspiration dieser Forschungsarbeit aus dem Opensource-Bereich stammt, sind hier auch QRC-Tags zu einer der grössten 3D-Modelldatenbanken (Thingiverse) zu finden, sodass interessierte Personen auf die Modelle zugreifen können und diese zuhause ausdrucken und weiterentwickeln können.
- Durchführung
In diesem Kapitel werden die wichtigsten Schritte und Auffälligkeiten während der praktischen Durchführung beschrieben.
- Auswertung und Ergebnis
In diesem Kapitel werden die während der Durchführung beobachteten, gemessenen oder ermittelten Daten ausgewertet, analysiert und in einem Ergebnis zusammengefasst.

3.2 Versuche

3.2.1 Herstellung einer EWoD-Platine als Prototyp für „Proof-of-concept“-Test:

3.2.1.1 Ziel des Versuchs

Ziel dieses ersten Versuches ist es zu beweisen, dass mit den verwendeten Materialien ein EWoD-Effekt zur Manipulation von Flüssigkeiten erzeugt werden kann. Dieser erste Versuch ist daher die Grundlage für alle weiteren Überlegungen, Versuche und Konzepte. Um dies zu zeigen, wurde ein bekanntes und funktionierendes Design (16) verwendet, welches einen einfachen 2D-Aufbau aufweist.

3.2.1.2 Materialien

Gerät	Filament(-e)
D1	F1
	F2

3.2.1.3 Aufbau (Skizze)

Name: Versuch 1

Beschrieb: Leiterplatte (analog Quelle (16))

Grunddaten (Ausschnitt Netfabb Software) :

	X	Y	Z
Minimum:	0.00	0.00	0.00
Maximum:	55.00	69.10	3.30
Size:	55.00	69.10	3.30

Volume:	11.0275 cm ³	Area:	106.2060 cm ²
---------	-------------------------	-------	--------------------------

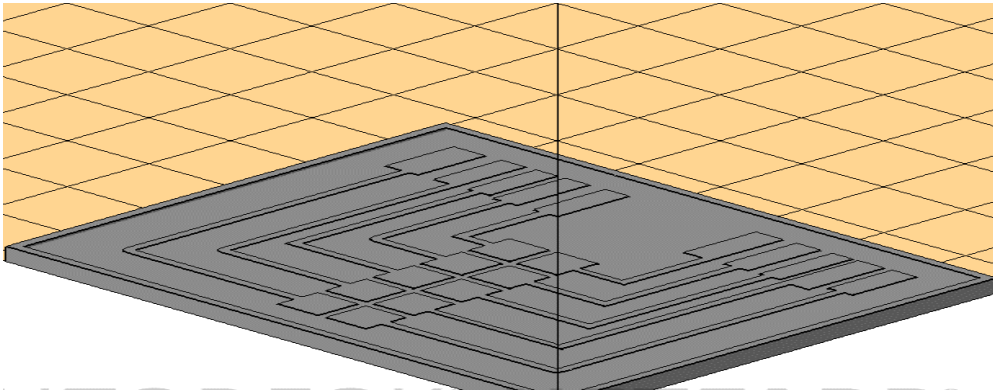
Points:	414	Edges:	1176
Triangles:	784	Shells:	11

Holes:	0	Bad Edges:	0
Boundary Edges:	0	Boundary Length:	0.00 mm
Flipped Triangles:	0		

Surface is closed:	Yes
Surface is orientable:	Yes

	Min:	Max:	Ø:	Dev:
Edges/Point	4.00	21.00	5.68	2.07
Triangles/Edge	2.00	2.00	2.00	0.00
Triangle Quality	0.01	1.00	0.28	0.25
Edge Length	0.02	55.10	6.57	10.65

Skizze:



Einstellungen 3D-Drucker

Anhang 1

Einstellungen Filament:

Anhang 1

www.thingiverse.com/thing:2591389



3.2.1.4 Durchführung

Der hergestellte EWoD-Prototyp wurde an das Design von Daniel Winters (16) angelehnt. Es soll als Proof of concept dienen, um die grundsätzliche Machbarkeit der Herstellung einer EWoD-Platine mittels 3D-Druck zu zeigen. Der Aufbau besteht aus einer Grundplatte (orange) und den Elektroden, Leitungen und Kontakten (schwarz). Der erhöhte Rand auf der Grundplatte soll als Hilfe dienen die Isolations-, wie auch die hydrophobe Schicht auf die Platte zu applizieren.

Der Druck der Platte dauerte ca. eine halbe Stunde. Als Isolationsschicht wurde Parafilm® M und als hydrophobe Schicht ein Silikonöl verwendet. Die sehr aufgeraute Elektrodenoberfläche wurde mittels eines feinen Schleifpapiers abgeflacht, zum einen um die Isolationsschicht beim Aufspannen nicht zu verletzen, zum anderen um möglichst ein geringes Luftpolster zwischen Isolationsschicht und Elektrode zu realisieren. Geringe Lufteinschlüsse zwischen der Isolationsschicht und der Elektrodenoberfläche führen zu einem drastischen Abfall des EWoD-Effektes, wodurch eine mögliche Manipulation des Tropfens verhindert werden würde.

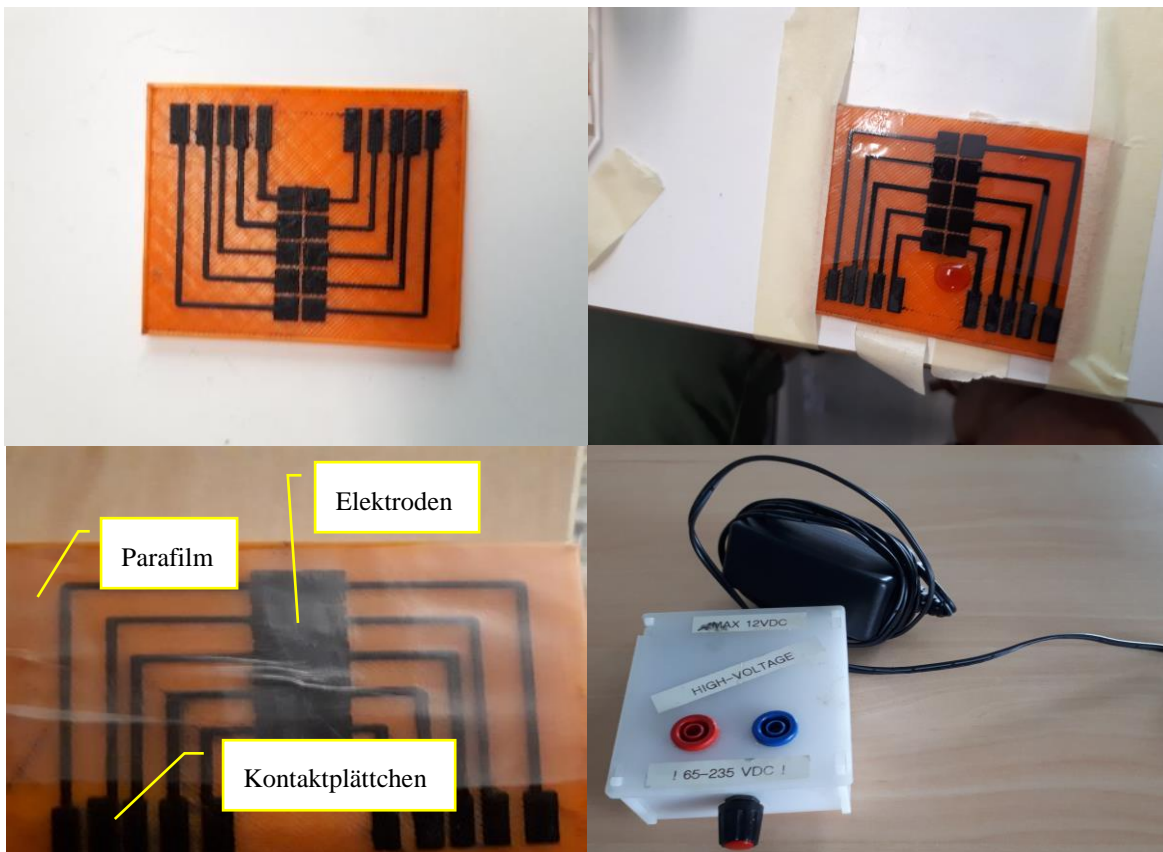


Abbildung 5: v.l.o.n.r.u.: Prototyp Rohfassung / Prototyp präpariert mit Parafilm und Silikonöl für Testlauf/Beschrifteter Prototyp(nicht sichtbar Silikonölfilm)/ Hochspannungsgenerator

Als Spannungsquelle wurde ein Hochspannungsgenerator verwendet auf dem eine Spannung von ca. 280 Volt eingestellt wurde. (ACHTUNG Sicherheitshinweis: Hochspannung kann bei falscher Handhabung lebensgefährlich sein. Bitte keine leichtfertigen Handhabung an den Tag legen und entsprechende Schutzmassnahmen treffen). Die Spannung wurde mithilfe zweier Elektrodenkabel auf die Kontakte des EWoD-Protoyps übertragen (Anwendung ist Abbildung 6 zu sehen). Der Tropfen besass ungefähr ein Volumen von 1ml.

3.2.1.5 Auswertung und Ergebnis

Ausmessung EWoD-Prototyp Versuch 1:

Merkmal	SOLL	IST
Dimensionen (lxbxh) in mm	69.10 x 55.00 x 3.30	69.2 x 55.1 x 3.3
Leitfähigkeit ²		
E1 ³ /6: 7.14 cm	0.24	$4.9 \cdot 10^{-5}$
E2/7: 5.98 cm	0.20	$6.5 \cdot 10^{-5}$
E3/8: 5.12 cm	0.17	$9.3 \cdot 10^{-5}$
E4/9: 4.12 cm	0.14	$1.1 \cdot 10^{-4}$
E5/10: 3.14 cm	0.10	$2.2 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 2: Auswertungen Dimensionen und Widerstandsmessung Versuch 1

Die Abweichung der Dimensionen ist für die Arbeit vernachlässigbar und es zeigt, dass man mithilfe eines 3D-Druckers ausreichend genaue Modelle herstellen kann.

Die theoretische Leitfähigkeit ergibt sich aus den Daten des Herstellers und den im CAD errechneten Volumen. Die Leitfähigkeit wurde mittels eines Widerstandsmessgeräts (Multimeter) gemessen und gemäss dem folgenden Zusammenhang entsprechend berechnet:

$$G = \frac{1}{R}$$

Formel 2

G = Leitwert in S/m

R = Widerstand in Ω

Die Unterschiede zwischen theoretischem und gemessenem Widerstand sind mit Faktor 10^4 - 10^5 enorm hoch. Dies lässt sich damit erklären, dass der angegebene theoretische Widerstand von $30 \Omega/\text{cm}$ nur in der x-y-Ebene gilt. Das wiederum zeigt, dass sich der Stromfluss nicht innerhalb einer Ebene bewegt und aufgrund der hinzukommenden z-Widerstände (Schichtübergänge) sich enorm erhöht. Um den EW-Effekt zu erzeugen, ist dies trotz allem vollkommen ausreichend.

² Höhe Elektroden: 0.2 mm // Filamentwiderstand: $30 \Omega/\text{cm}$ (x/y-Ausrichtung) // Leitwert: 0.033 S/cm $10,42 / \text{mm}^2$

³ E=Elektrode / E 1/6 etc. = Elektrodenpaar mit derselben Länge und somit dem theoretisch gleichem Widerstand. Ist-Wert entspricht Mittelwert aus der Messung des Elektrodenpaars.

Wie bereits erwähnt, war das Ziel des Versuches die grundsätzliche Machbarkeit der Herstellung einer EWoD-fähigen Elektrodenplatine zu zeigen. Dadurch konnte jegliche zu beobachtende Manipulation des Tropfens durch die angelegte Spannung als Erfolg gewertet werden.

Nach anfänglichen Problemen, aufgrund von Lufteinschlüssen zwischen Elektrodenoberfläche und Isolationsschicht, konnte eindrücklich nachgewiesen und bestätigt werden, dass der Tropfen auf der Oberfläche durch die angelegte Spannung manipuliert wurde. Der Tropfen bewegte sich entsprechend der angelegten Spannung auf den Elektroden hin und her. Von diesem Versuch wurde ein Video zur Dokumentation aufgenommen.

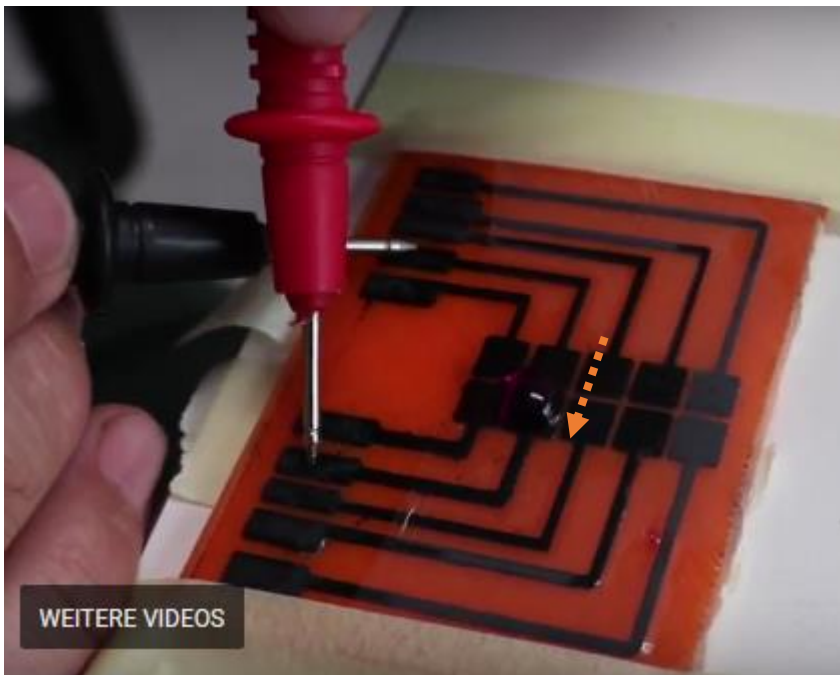


Abbildung 6: Ausschnitt aus dem Video -Versuch 1 – Tropfenbewegung (oranger Pfeil zeigt Tropfenbewegung) (17)

Somit konnte bewiesen werden, dass es grundsätzlich möglich ist mit einem handelsüblichen 3D-Drucker zusammen mit einem leitfähigen Filament, ein EWoD-fähiges Elektrodenarray herzustellen. Diese Grundlage kann nun genutzt werden, um entsprechende weitere Versuche und Prototypen herzustellen.

Weitere wichtige Punkte, die in diesem ersten Versuch beobachtet wurden:

- Druckfähigkeit des leitfähigen Filaments
Das genutzte leitfähige Filament zeigte verschiedene Probleme während des Drucks:
 - o Filamentbruch: Die Leitfähigkeit des Filaments (F2) wird durch sog. Leitruß erzeugt. Dieser Leitruß führt jedoch dazu, dass das Filament gegenüber herkömmlichen 3D-Druck Filamenten äußerst steif ist. Dies führt insbesondere bei einem sog. Bowden-

Extruder⁴, wie er beim genutzten 3D-Drucker verwendet wird, oftmals zu einem Bruch im Filamentstrang, sodass der Vorschub des Extruders nicht mehr gewährleistet und so der Druck abgebrochen wird.

- Oberflächengenauigkeit

- Für das leitfähige Filament (F2) wurden analoge Druckereinstellungen verwendet wie es das Filament (F1) nutzt, da es sich bei beiden Filamenten um den Kunststoff PLA handelt. Jedoch zeigte sich, dass der Filamentvorschub und die Temperatur noch nicht optimal waren, da grössere Filamenthaufen (rote Kreise auf Elektroden) und dünne, überlappende Fäden (grösster roter Kreis) auf dem ausgedruckten Objekt (sog. Stringing⁵) zu finden waren wie man es in Abbildung 7 sieht.



Abbildung 7:
Druckfehler
Versuch 1

3.2.2 Reproduzierbarkeit des EWoD-Prototypen

3.2.2.1 Ziel des Versuchs

Das Ziel des Versuches war es zu zeigen, dass die im ersten Versuch hergestellte Platine wieder aus dem 3D-Drucker ausgedruckt werden kann und dabei dieselbe Funktionalität besitzt wie der Prototyp aus Versuch 1.

3.2.2.2 Materialien

Gerät	Filament(-e)
D1	F1
	F2

⁴ Siehe Glossar

⁵ Siehe Glossar

3.2.2.3 Aufbau (Skizze)

Name: Versuch 2

Beschrieb: Leiterplatte (analog Quelle (16))

Grunddaten (Ausschnitt Netfabb Software) :

	X	Y	Z
Minimum:	0.00	0.00	0.00
Maximum:	55.00	69.10	3.30
Size:	55.00	69.10	3.30

Volume:	11.0275 cm ³	Area:	106.2060 cm ²
Points:	414	Edges:	1176
Triangles:	784	Shells:	11
Holes:	0	Bad Edges:	0
Boundary Edges:	0	Boundary Length:	0.00 mm
Flipped Triangles:	0		

Surface is closed:	Yes
Surface is orientable:	Yes

	Min:	Max:	Ø:	Dev:
Edges/Point	4.00	21.00	5.68	2.07
Triangles/Edge	2.00	2.00	2.00	0.00
Triangle Quality	0.01	1.00	0.28	0.25
Edge Length	0.02	55.10	6.57	10.65

Skizze (Netfabbausschnitt):

Analog Versuch 1

Einstellungen 3D-Drucker

Anhang 1

Einstellungen Filament:

Anhang 1

3.2.2.4 Durchführung

Analog zum Versuch 1 wurden weitere Platinen mit demselben Elektrodenmuster ausgedruckt. Einziger Unterschied bestand darin, dass anstatt einer Platine drei Platinen auf einmal gedruckt wurden. Dies war die maximale Anzahl die der Bauraum des 3D-Druckers (D1) zuließ. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurden diese drei neuen Platinen gegen den bestehenden Prototypen überprüft und die Dimensionen verglichen. Weiter wurde überprüft, ob die Elektroden sich nicht aufgrund von fehlerhaften Verbindungen durch überlappendem leitfähigen Filament haben.

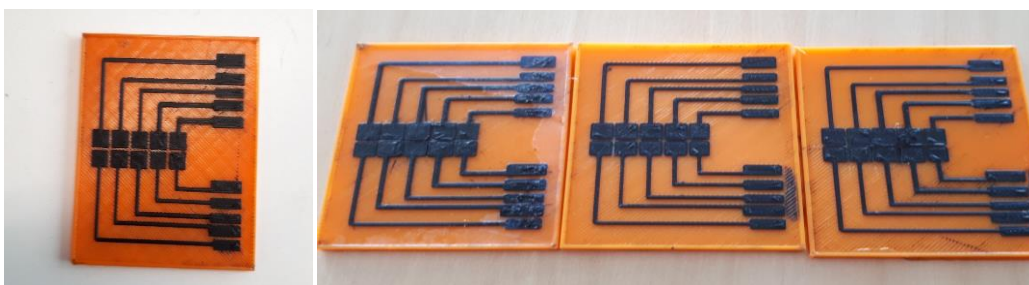


Abbildung 8: links: Prototyp / rechts: Nachgedruckten Prototypen (v.l.n.r. 1,2,3)

Merkmal	SOLL (CAD- Zeichnung)	Prototyp 1	Nachdruck 1	Nachdruck 2	Nachdruck 3
Dimen- sionen (lxbxh) in mm	69.10 x 55.00 x 3.30	69.2 x 55.1 x 3.3	68.5 x 55.0 x 3.2	68.7 x 55.3 x 3.2	69.2 x 55.1 x 3.2
Abwei- chung Länge	n.a.	0%	1,1%	0,7%	0%
Abwei- chung Breite	n.a.	0%	0,2%	0,3%	0%
Abwei- chung Höhe	n.a.	0%	4,1%	4,1%	4,1%
Elektro- den feh- lerhaft	n.a.	0	0	4	4

Tabelle 3: Dimensionsvergleiche aus dem Versuch 2

3.2.2.5 Auswertung und Ergebnis

Die Nachdrucke zeigten sich optisch identisch zu dem Prototypen. Jedoch wiesen sie kleinere Abweichungen in den Massen auf. Diese Abweichungen sind weitestgehend akzeptabel und für die hier hergestellte Platine nicht funktionsrelevant. Anders wäre es jedoch im Fall von zusammengesetzten Bauteilen.

Die Auswertung, ob die Elektroden nicht miteinander verbunden waren, erfolgte wieder mittels Multimeter. Es zeigte sich, dass bei zwei der drei Nachdrucke je 4 Elektroden miteinander verbunden waren. Der Grund waren Verschleppungen von leitfähigem Filament, welches die Elektroden miteinander verband und diese somit nicht mehr nutzbar waren.

Nach Präparation des einzigen Nachdrucks, dessen Elektroden nicht fehlerhaft waren, zeigte sich analog zum ersten Versuch, dass der EW-Effekt erzeugt und ein Wassertropfen bewegt werden konnte.

3.2.3 Weitere 3D-gedruckte Platinen

3.2.3.1 Ziel des Versuchs

Basierend auf der Grundlage aus Versuch 1 konnten nun weitere Designs für Platinen ausprobiert werden, sodass die Möglichkeiten des 3D-Drucks gegenüber den üblichen 2D-Herstellungsverfahren besser dargestellt werden können. Das Ziel dieses Versuches war es verschiedene Designs zu erstellen und diese auszudrucken und diese zu charakterisieren und auf ihre Funktionalität zu überprüfen. Dafür wurden drei verschiedene Wege eingeschlagen:

Im ersten Versuch wurde eine Multilayer-Platine kreiert. Das Ziel war es zu zeigen, ob dieses Design mit dem 3D-Drucker realisierbar ist und ob die ausgedruckte Platine funktionstüchtig ist. In diesem Versuch sind vor allem die folgenden Kriterien von Bedeutung

- Keine Verbindung der Elektroden untereinander
- Leitfähigkeit des Filament auch in Z-Richtung

Im zweiten Versuch wurde eine Platine gedruckt deren Elektroden einen Kanal bilden, in dem sich der Flüssigkeitstropfen bewegen kann. Hauptziel war es einen Mikrofluidikkanal auszudrucken und anstelle einer Pumpe den EW-Effekt zur Fortbewegung zu nutzen.

Im dritten Versuch wurde ein gesamthafter Aufbau eines EWoD-Device kreiert und ausgeruckt. Mit diesem Versuch sollte gezeigt werden, wie es mittels 3D-Druck möglich ist, ein vollständiges EWoD-Gerät zu erstellen.

3.2.3.2 Materialien

Versuch 3.1

Gerät	Filament(-e)
D1	F1
	F2

Versuch 3.2

Gerät	Filament(-e)
D1	F1
	F2

Versuch 3.3

Gerät	Filament(-e)
D1	F3
	F2

3.2.3.3 Aufbau (Skizze) - Versuch 3.1

Name: Versuch 3.1

Beschrieb: Multilayerplatine (eigenes Design)

Grunddaten (Ausschnitt Netfabb Software) :

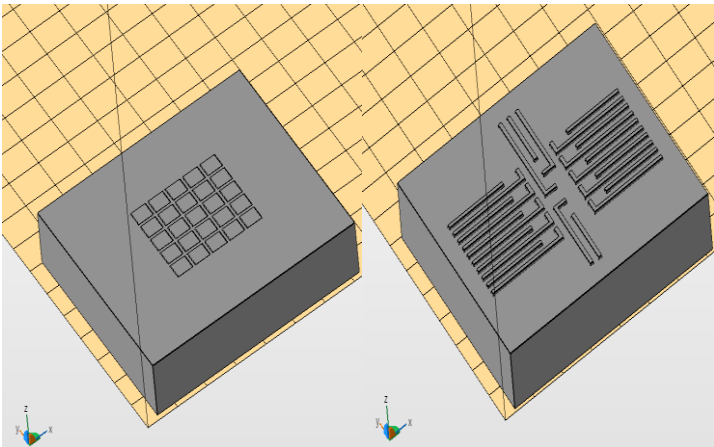
	X	Y	Z
Minimum:	0.00	0.00	0.00
Maximum:	70.00	10.49	70.00
Size:	70.00	10.49	70.00

Volume:	49.2906 cm³	Area:	230.5213 cm²
Points:	2509	Edges:	7953
Triangles:	5302	Shells:	26
Holes:	0	Bad Edges:	0
Boundary Edges:	0	Boundary Length:	0.00 mm
Flipped Triangles:	0		
Surface is closed:	Yes		
Surface is orientable:	Yes		

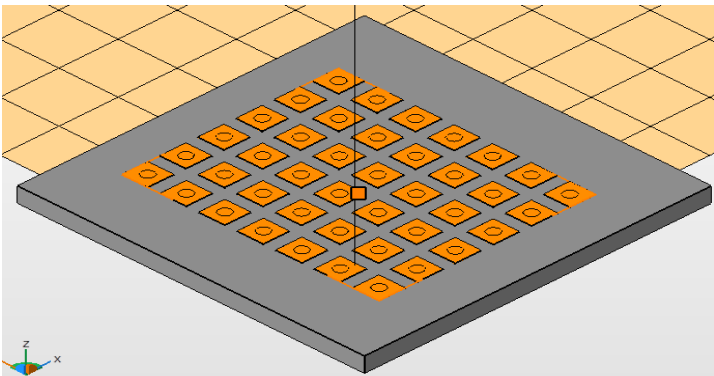
	Min:	Max:	Ø:	Dev:
Edges/Point	3.00	33.00	6.34	2.93
Triangles/Edge	2.00	2.00	2.00	0.00
Triangle Quality	0.00	1.00	0.30	0.30
Edge Length	0.00	30.00	4.17	5.24

Skizzen:

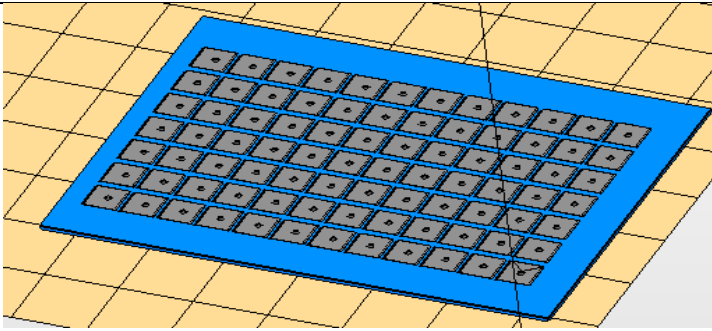
Prototyp 1



Prototyp 2:



Prototyp 3:



Einstellungen 3D-Drucker

Anhang 1

Einstellungen Filament:

Anhang 1

www.thingiverse.com/thing:2591389



3.2.3.4 Durchführung

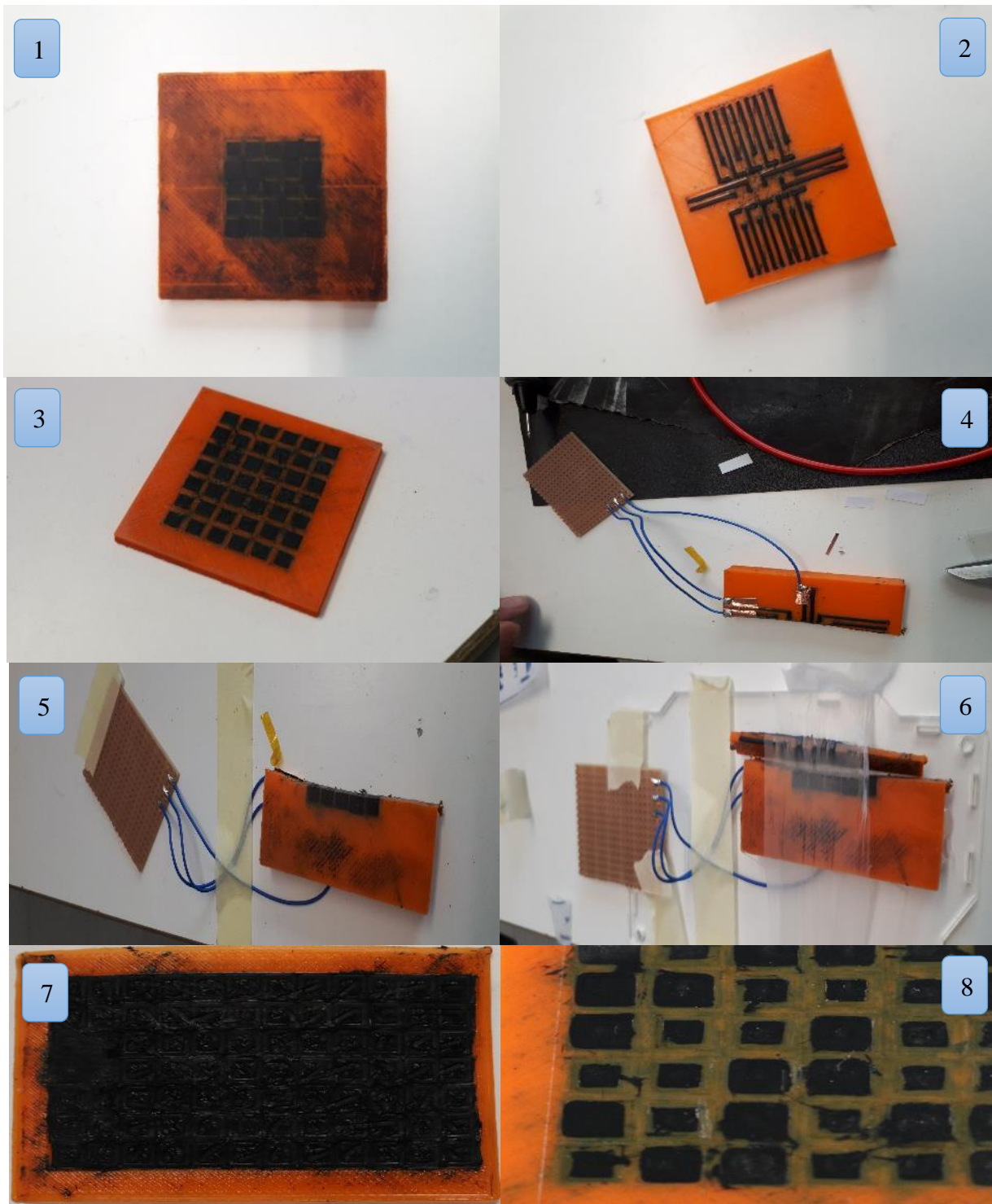


Abbildung 9: v.l.o.n.r.u.: Multilayerplatine Elektrodenoberfläche/ unterer Teil der Multilayerplatine mit Leitungen/ Weitere Multilayerplatine (Kaptonband auf Heatbed)

In Abbildung 9 sind die verschiedenen Prototypen des Versuches 3.1 abgebildet.

Auf Bild 1 und 2 ist ein erster Prototyp einer Multilayerplatine zu sehen. Dieser Prototyp wurde direkt auf die Druckplatte des Druckers (D1) gedruckt. Man sieht in diesem Fall, schwarze Spuren auf der orangenen Oberfläche, welche durch Russ-

reste von den vorherigen Experimenten auf der Druckplatte (GFK, rauhe Oberfläche) entstanden sind. Dies zeigt, dass ohne eine Schutzbeschichtung der Oberfläche (wie z.B. Kaptonband) der Leitruss des Filaments sich auf einer rauhen Oberfläche verteilt und sich von dieser nur sehr schwer zu entfernen lässt. Die Auswertung mittels Multimeter zeigte, dass die Elektroden z.T. miteinander verbunden waren, wodurch diese nicht als gesamthaftes Elektrodenarray zu gebrauchen waren. Als Grund wurde vermutet, dass der Russ auf der Oberfläche dies verursachte. Darum wurde die Oberfläche mittels Schleifpapier bearbeitet bis die schwarze Oberfläche weitestgehend frei von Russ war. Trotz dieser Bearbeitung waren diverse der Elektroden immer noch miteinander verbunden, wodurch der Verdacht aufkam, dass die Verbindung nicht allein nur durch den Russ auf der Oberfläche entstanden. Diese Platte wurde im Anschluss aufgeschnitten, was in den Bildern 4, 5 und 6 zu sehen ist.

Bild 3 zeigt einen der Prototypen, bei der ein grösserer Abstand zwischen den Elektroden versucht wurde. Dies war die logische Konsequenz aus dem ersten Prototyp, da man vermuten konnte, dass durch den geringen Abstand zwischen den Elektroden, diese durch überschüssiges, leitfähiges Filament miteinander verbunden werden. Die Elektroden wurden im Anschluss wieder mit dem Multimeter gemessen und erneut waren einige der Elektroden miteinander verbunden, wodurch diese wieder nicht für den Transport mittels EWoD geeignet waren. Es wurden mehrere Platinen mit unterschiedlichem Abstand zwischen den Elektroden gedruckt.

Folgende Abstände wurden dabei geprüft:

Abstand in mm	Verbundene Elektroden (max. 25 Stk.)
0.1	18
0.2	15
0.3	14
0.4	10
0.5	11
0.75	7
1	6

Tabelle 4: Versuch 3.1 verbundene Elektroden in Abhängigkeit des Abstandes der Elektroden

Aufgrund der negativen Ergebnisse der Separierung der Elektroden bei den gedruckten Prototypen wurde der erste Prototyp näher untersucht. Bild 4, 5 und 6 zeigen diesen aufgeschnittenen Prototyp. Mithilfe dieses Schnittes wurde geprüft, ob erkennbare Verbindungen zwischen den miteinander verbundenen Elektroden zu finden waren. Gleichzeitig konnten so einige nicht miteinander verbundene Elektroden isolieren und ein Versuch zur Erzeugung des EWoD-Effektes durchgeführt werden. Dafür wurden die schwarzen Leiterbahnen (siehe Bild 2) mittels Kupferklebeband und Draht mit einem Breadboard⁶ verbunden. Das Breadboard diente als Kontaktfläche für die Elektroden zur Übertragung der Hochvolt-Spannung von 250 V. As Tropfenvolumen betrug hier in etwa 500µl.

Bild 7 und 8 zeigen den Versuch dünne Platinen (Versuche mit Höhe 0.5mm/ 0.3 mm) mit geringem x-y-Abstand zwischen den einzelnen Elektroden herzustellen. Wie man deutlich erkennt, hat sich das leitfähige Filament über die gesamte Fläche miteinander verbunden, was dazu führte, dass keine Elektrode vereinzelt war. Diese Versuche wurden aus diesem Grund nicht weitergeführt, da es sich auch zeigte, dass die dünnen Platinen sich beim Ablösen von der Druckplatte sich verbogen oder einrissen.

3.2.3.5 Auswertung und Ergebnis

Positives Ergebnis war, dass die verschiedenen Multilayerplatinen mittels 3D-Druck erzeugt werden konnten. Des Weiteren konnte mithilfe des Multimeters gemessen werden, dass die Elektroden in Z-Richtung leitfähig waren.

Dadurch konnte mithilfe des aufgeschnittenen ersten Prototyps gezeigt werden, dass ein EWoD-Effekt erzeugt werden kann und dieser ausreichend stark ist einen Flüssigkeitstropfen zu bewegen.

Jedoch kam es während des Versuches zu unerwünschten Verbindungen zwischen den Elektroden:

Abstand zwischen den Elektroden – Problem: Verbundene Elektroden

Wie im Kapitel 3.2.3.4 beschrieben, wurden alle Elektroden auf Kurzschluss überprüft. Es zeigte sich, dass dies häufig der Fall war. Teilweise waren nahezu alle Elektroden miteinander verbunden. Die Versuche, dies mithilfe von grösserem Abstand zu lösen, zeigten sich nur bedingt erfolgreich, da ein grösserer Abstand zwar eine Reduktion der miteinander verbundenen Elektroden mit sich brachte, sich dieser grössere Abstand jedoch letztendlich auf die Möglichkeit kleine Flüssigkeitstropfen zu bewegen auswirkte. Der Tropfen muss sich, wie bereits erwähnt, für die Bewegung zwischen zwei Elektroden befinden. In anderen Worten heisst das, dass man grössere, heisst voluminösere, Tropfen nutzen muss, was dann nicht mehr in die Dimensionen der Mikrofluidik passt.

⁶ Siehe Glossar

3.2.3.6 Aufbau (Skizze) - Versuch 3.2

Name: Versuch 3.2

Beschrieb: Kanal (eigenes Design)

Grunddaten (Ausschnitt Netfabb Software) :

	X	Y	Z
Minimum:	0.00	0.00	0.00
Maximum:	34.00	25.00	2.02
Size:	34.00	25.00	2.02

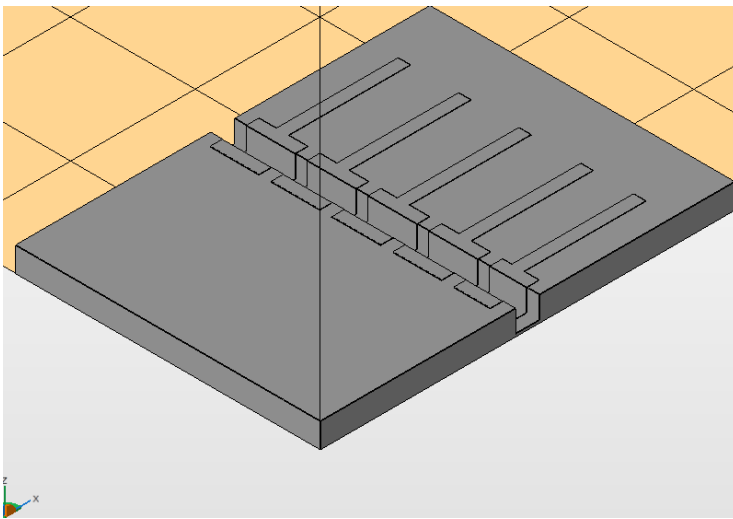
Volume:	1.6100 cm ³	Area:	25.5880 cm ²
Points:	256	Edges:	762
Triangles:	508	Shells:	6
Holes:	0	Bad Edges:	0
Boundary Edges:	0	Boundary Length:	0.00 mm
Flipped Triangles:	0		

Surface is closed:	Yes
Surface is orientable:	Yes

	Min:	Max:	Ø:	Dev:
Edges/Point	3.00	12.00	5.95	1.72
Triangles/Edge	2.00	2.00	2.00	0.00
Triangle Quality	0.00	1.00	0.52	0.30
Edge Length	0.76	34.00	4.31	5.04

Skizze:

Kanal-Platine Prototyp:



Einstellungen 3D-Drucker

Anhang 1

Einstellungen Filament:

Anhang 1

www.thingiverse.com/thing:2591389


3.2.3.7 Durchführung

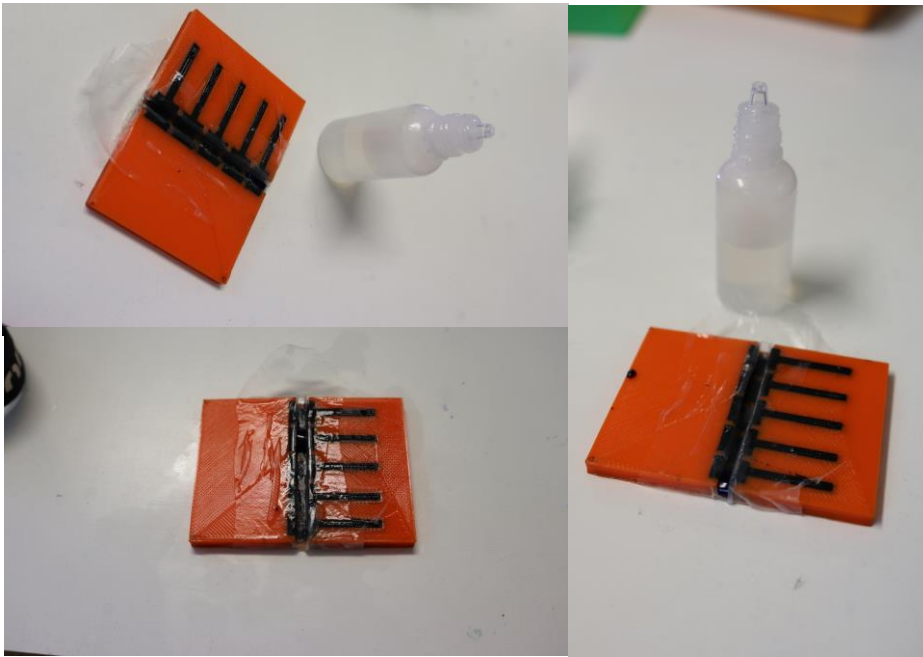


Abbildung 10: Versuch 3.2 Elektrodenplatine mit Kanal (2x2mm)

Für diesen Versuch wurde ein einfaches Design mit 5 Elektroden und einem geraden 2x2mm grossen Kanal gewählt. Die Grösse wurde so gewählt, um genügend Spielraum zu haben, damit der Parafilm als Isolationsschicht eingepasst werden kann. Um einen Effekt zu erkennen, wurde ein möglichst grosser Tropfen gewählt.

In Abbildung 10 sieht man den ausgedruckten Prototypen mit Parafilm und einem gefärbten Wassertropfen. Die kleine Dosierflasche ist mit dem Silikonöl gefüllt, welches als hydrophobe Schicht diente. Auf dem Foto dient die Flasche als Grössenvergleich. Die kleinen Leiterbahnen dienten als Kontaktflächen für die Hochspannungselektroden.

Vor dem Versuch wurden die Elektroden wieder auf Leitfähigkeit und auf nicht erwünschte Verbindungen untereinander überprüft. Es zeigte sich wieder, dass von 5 Elektroden, 2 miteinander verbunden waren, was wiederum zu einer Verminderung der Leistungsfähigkeit führte. Jedoch konnten die drei nicht miteinander verbundenen Elektroden für diesen Versuch genutzt werden, da es in erster Linie darum ging, zu beweisen, dass der EWoD-Effekt sich auch bei diesem Design einstellt und der Tropfen bewegt werden kann. Die genutzte Spannung betrug wiederum 250 V.

3.2.3.8 Auswertung und Ergebnis

Dieser Versuch zeigte, dass das Design durchaus funktionierte, jedoch mit diversen Problemen:

a) Einpassen des Parafilms

Trotz der Grösse des Kanals war die Einpassung des Parafilms als Isolations-schicht äusserst diffizil. Zum einen konnte die Oberfläche nicht eben geschliffen werden, sodass sich zwischen Parafilm und Elektrodenoberfläche immer wieder Lufteinschlüsse bildeten und so die Hochspannung nicht aufgebaut werden konnte. Durch vorheriges Auftropfen von Silikonöl direkt auf die Elektrode und nach Auflegen des Parafilms, konnte beobachtet werden, dass durch Verdampfen des Silikonöls der Parafilm an die Elektroden „angesaugt“ werden.

b) Grosser Abstand zwischen den Elektroden

Aufgrund der vorherigen Versuche, wurde der Abstand der Elektroden 0.5 mm gewählt, um sicherzustellen, dass die Elektroden sich nicht miteinander verbinden, was jedoch nicht zur Gänze funktionierte.

Aufgrund der etwas komplizierteren Geometrie, ist die Wahrscheinlichkeit von überschüssigem, leitfähigem Filament, welches zu diesen fehlerhaften Verbindungen führt, deutlich höher.

c) Einfluss des Designs auf den EWoD-Effektes

Die Elektroden wurden so konzipiert, dass der Kanal durch die Elektroden führt. Dadurch erfuhr der Wassertropfen von drei Seiten die Hochspannung. Ob dies positive oder negative Einflüsse auf den EWoD-Effekt hat oder nicht konnte während der Dauer der Thesis nicht weiter eruiert werden. Hier könnten weitere Überlegungen angestellt werden oder weitere Tests mit anderen Kanal-Geometrien durchgeführt werden.

3.2.4 3D-gedrucktes EWoD-Device

3.2.4.1 Ziel des Versuchs

Dieser Versuch vereint die Erkenntnisse und Ergebnisse aus den vorherigen, um eine 3D-gedrucktes EWoD-Device herzustellen. Dafür wurden eine Platine, ein Support für die Federpins und ein Halter kreiert und ausgedruckt.

Das Hauptziel des Versuches war es zu zeigen, dass es möglich ist ein gedrucktes EWoD- Device (Halteung und Platine) herzustellen. Die Steuerung und Spannungsversorgung sollte über einen modifizierten OpenDrop (11) erfolgen.

3.2.4.2 Materialien

Versuch 3D-EWoD-Device

Gerät	Filament(-e)
D1	F1
	F3

3.2.4.3 Aufbau (Skizze) - Versuch 3.3

Name: Versuch 3.3

Beschrieb: 3D-gedrucktes EWoD-Device (bestehend aus 3 Teilen)

Grunddaten (Ausschnitt Netfabb Software) :

3D- Holder:

	X	Y	Z
Minimum:	0.00	-12.64	12.65
Maximum:	60.00	74.51	74.51
Size:	60.00	87.15	61.86

Volume:	34.0426 cm ³	Area:	233.9948 cm ²
Points:	508	Edges:	1518
Triangles:	1012	Shells:	1
Holes:	0	Bad Edges:	0
Boundary Edges:	0	Boundary Length:	0.00 mm
Flipped Triangles:	0		

Surface is closed:	Yes
Surface is orientable:	Yes

	Min:	Max:	Ø:	Dev:
Edges/Point	3.00	35.00	5.98	3.32
Triangles/Edge	2.00	2.00	2.00	0.00
Triangle Quality	0.00	1.00	0.27	0.30
Edge Length	0.01	60.40	14.52	21.10

3D-Elektrodenplatte:

	X	Y	Z
Minimum:	-11.63	-18.25	24.48
Maximum:	48.37	41.75	27.48
Size:	60.00	60.00	3.00

Volume:	4.7251 cm ³	Area:	87.3000 cm ²
Points:	656	Edges:	2448
Triangles:	1632	Shells:	1
Holes:	0	Bad Edges:	0
Boundary Edges:	0	Boundary Length:	0.00 mm
Flipped Triangles:	0		
Surface is closed:	Yes		
Surface is orientable:	Yes		

	Min:	Max:	Ø:	Dev:
Edges/Point	5.00	23.00	7.46	1.75
Triangles/Edge	2.00	2.00	2.00	0.00
Triangle Quality	0.00	0.81	0.56	0.25
Edge Length	0.87	60.07	4.80	5.80

Support für Federpins:

	X	Y	Z
Minimum:	-11.87	-20.44	25.69
Maximum:	48.13	39.56	27.69
Size:	60.00	60.00	2.00

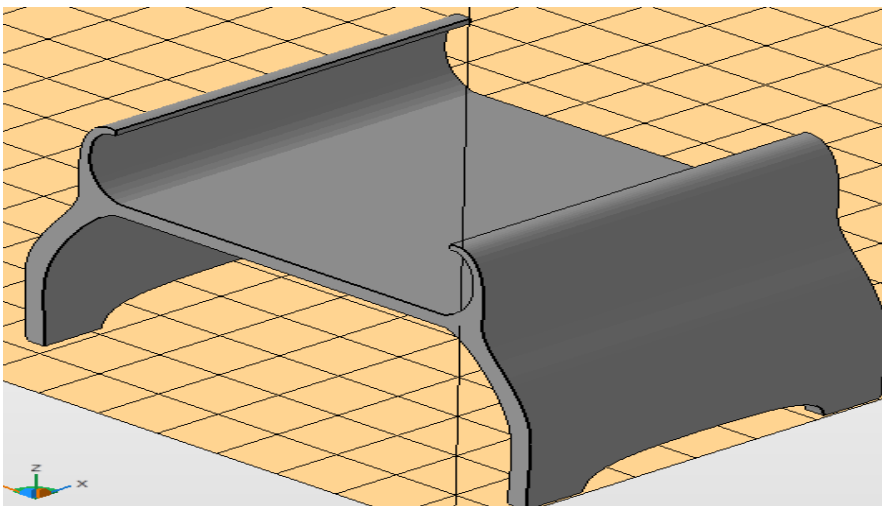
Volume:	6.0679 cm ³	Area:	80.7048 cm ²
Points:	3896	Edges:	12168
Triangles:	8112	Shells:	1
Holes:	0	Bad Edges:	0
Boundary Edges:	0	Boundary Length:	0.00 mm
Flipped Triangles:	0		
Surface is closed:	Yes		
Surface is orientable:	Yes		

	Min:	Max:	Ø:	Dev:
Edges/Point	5.00	25.00	6.25	1.04
Triangles/Edge	2.00	2.00	2.00	0.00
Triangle Quality	0.02	0.86	0.27	0.14
Edge Length	0.39	60.03	2.27	2.79

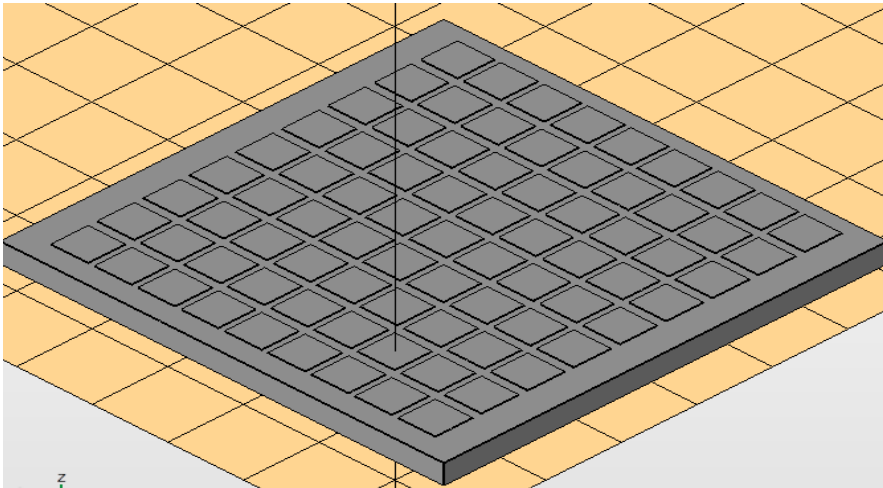
Skizze:

3D-gedrucktes EWoD-Device (bestehend aus den folgenden 3 Teilen)

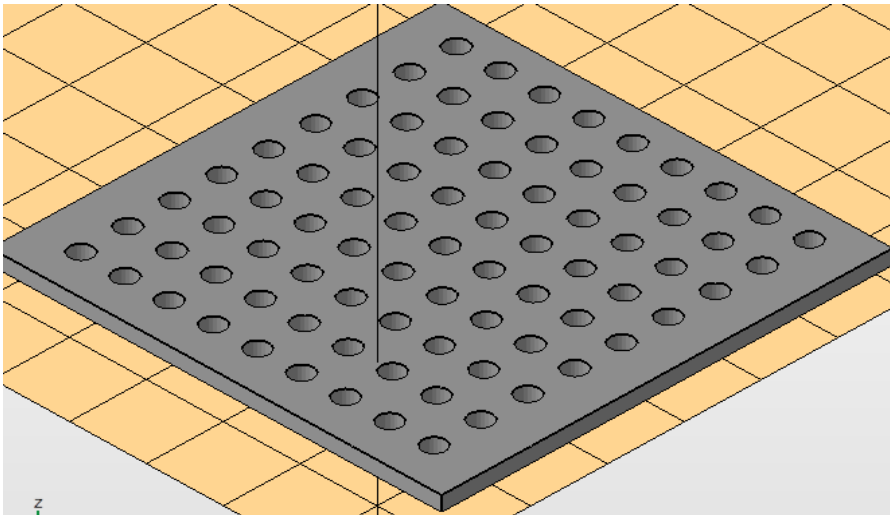
3D-Holder:



3D-Elektrodenplatine:



Support für Federpins:



Einstellungen 3D-Drucker

Anhang 1

Einstellungen Filament:

Anhang 1

www.thingiverse.com/thing:2591389



3.2.4.4 Durchführung

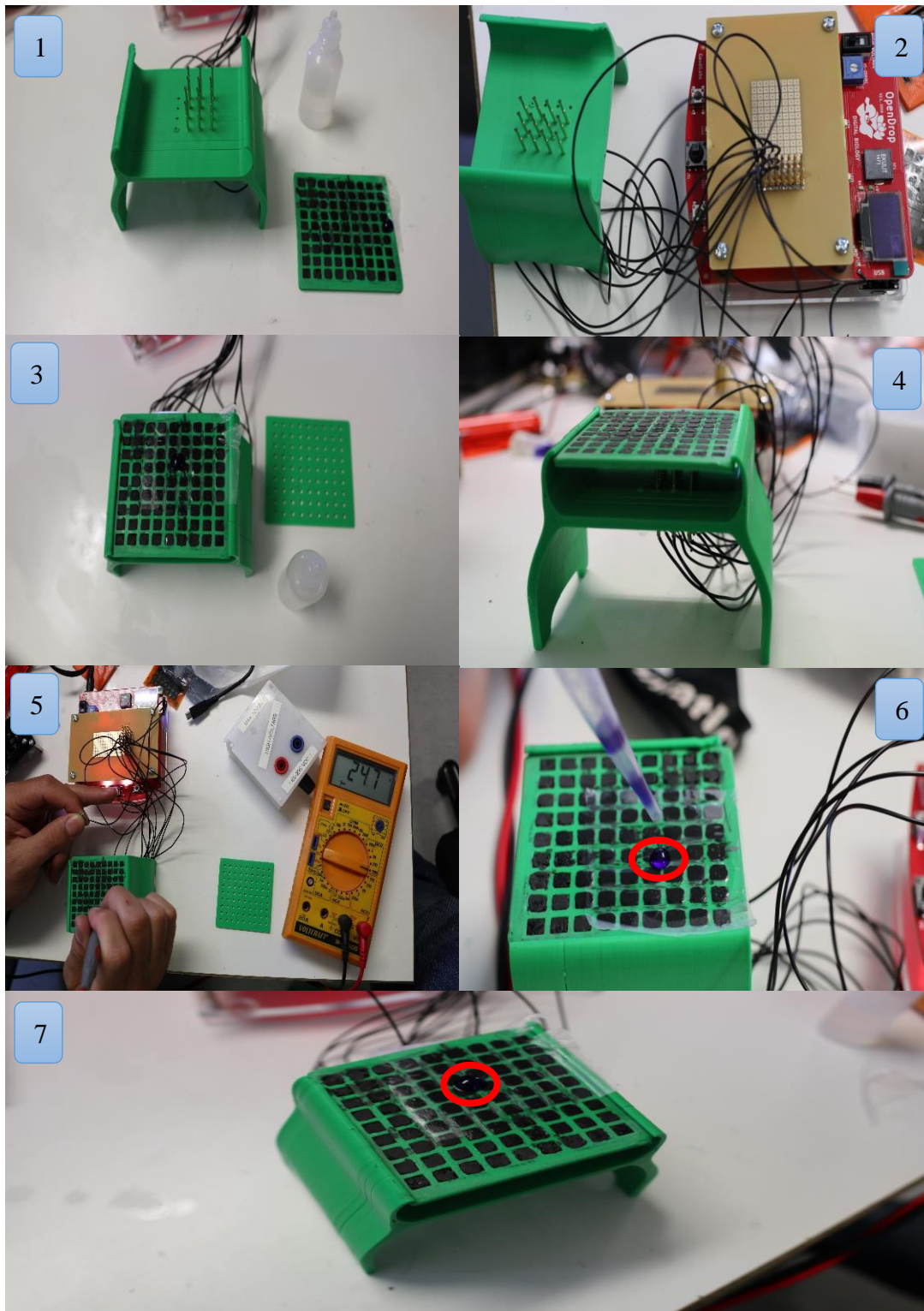


Abbildung 11: v.l.o.n.r.u.: 3D-Holder mit Federpins / Verkabelung mit dem modifizierten OpenDrop / Draufsicht auf finalen Aufbau (Support für Federpins wurde bereits entfernt) / Seitenansicht auf den finalen Aufbau / Elektrodenprüfung / letzten beiden Bilder: Transportversuch mit Wassertropfen (rot eingekreist)

Das Design für die 3D-Platine wurde sehr einfach gehalten und entsprach dem des Versuches 3.1 aus Kapitel 3.2.3. Die Grösse der Platine betrug 6x6 cm. Es wurden 81 Elektroden gleichmässig auf der Fläche verteilt (Siehe Abbildung 11 – Bild 1, 3)

Die Halterung wurde so konzipiert, dass die Platine und die Führungshilfe auf dieser Platz fanden. Letztere wurde benötigt, um die Federpins, welche den Kontakt zwischen dem modifizierten OpenDrop und der Platine herstellten, während der Platzierung und Fixierung der Federpins an der richtigen Stelle zu halten.

Der untere Teil der Platine musste aufgrund der Verbindungsdrähte eine gewisse Höhe besitzen, um diese zum OpenDrop zu führen.

Der Druck der Halterung und des Supports für die Federpins erwiesen sich als problemlos. Der Druck der Platine erwies sich wiederum als problematisch, da es abermals zu Verbindungen zwischen den Elektroden kam. Die Platine wurde erneut ausgedruckt, diesmal jedoch wurde zuerst der nichtleitende Rahmen gedruckt und im Anschluss die Elektroden manuell aufgefüllt. Diese Methode erwies sich als nicht sinnvoll, da die Füllungen nicht komplett waren, sodass sich Löcher bildeten. Aufgrund der Nutzung von Parafilm (Siehe Abbildung 11 – Bild 6 und 7) als Isolationsschicht, waren diese Löcher kein Problem für die Funktion und die Elektroden waren trotz des fehlenden Materials leitfähig. Der Druckvorgang war jedoch eine sehr zeitintensive Prozedur und erwies sich als nicht stabil (häufige Druckunterbrechungen).

Wie erwähnt, diente als Steuergerät ein modifiziertes OpenDrop-Gerät (Siehe Abbildung 11 – Bilder 2, 4 und 5). Dafür wurde von den dortigen Elektroden ein Draht an die Federpins gelötet. Diese Federpins wurden durch vorher gebohrte Löcher (Durchm.: 1mm) und durch die Supportlochplatte hindurchgeführt. Mittels Heisskleber wurden die Pins fixiert. Die Ausrichtung der Federpins wurde währenddessen immer wieder überprüft. Es galt die Federpins so zu positionieren, dass sie direkten Kontakt mit einer der gedruckten Elektroden aufwiesen. Nach der Fixierung, d.h. Abkühlung des Heissklebers, wurde die gedruckte Platine erneut auf die Halterung (nun mit den festsitzenden Pins) positioniert. Aufgrund der Höhe wurden die Pins etwas eingedrückt, sodass sie dauerhaft einen gewissen Druck auf die Elektroden ausübten, was gewünscht war, da so der Kontakt zwischen Federpinspitze und Elektrode gewährleistet werden konnte. Die Prüfung des Kontakts erfolgte wiederum mittels eines Multimeters (Siehe Abbildung 11 – Bilder 5).

Charakterisierung des Steuergeräts:

Der OpenDrop V2 ist ein DMF-Gerät, welches es erlaubt mit EWoD Flüssigkeiten auf seiner eigenen Elektrodenplatine zu transportieren und zu manipulieren. Er besitzt in der jetzigen Version eine Feedbackmöglichkeit, welche es erlaubt am Display zu prüfen, ob eine Elektrode durch einen Wassertropfen benetzt ist. Des Weiteren besitzt er eine eigene DC-Hochspannungsversorgung (einstellbar) und lässt sich via Joystick oder via Computerprogrammierung bedienen (Weitere Features

siehe (17)). Für die kommende Version ist es möglich auch auf eine AC-Hochspannungsversorgung umzuschalten.

Für diesen Versuch wurden die Hochspannungsversorgung und die Steuerung via Joystick genutzt, um den Wassertropfen auf der 3D-gedruckten Platine zu bewegen und zu steuern. Es wurden 4x4-Elektroden mit dem OpenDrop verbunden, da es in erster Linie darum ging, zu zeigen, dass der Aufbau funktionierte. Aufgrund der nicht ebenen Oberfläche der Platine wurde diese von Hand mittels eines Schleifpapiers abgeschliffen. Diese Arbeit könnte durch eine Bandschleifmaschine deutlich vereinfacht werden.

3.2.4.5 Auswertung und Ergebnis

Bewertung des Designs:

Das Design des 3D-Holders eignete sich sehr gut für den angedachten Zweck, da er einfach zu drucken war und die Platine so fixiert werden konnte, dass die Federpins immer eine gewisse Spannung erfuhren. Dadurch wurden deren Spitzen in die jeweilige Elektrode leicht hineingedrückt. Dies führte zu einem besseren Kontakt zwischen dem Federpin und dem leitfähigen Filament.

Das Design der Platine war sehr einfach gehalten, jedoch zeigte sich das bekannte Problem der unerwünschten Kurzschlüsse zwischen den Elektroden. Die 2. Variante mit dem Einfüllen des leitfähigen Filaments nach dem Druck des Rahmens war keine erfolgreiche Lösung, da nicht jede Elektrode vollständig aufgefüllt wurde, der Druck immer wieder unterbrochen wurde und dadurch der Zeitaufwand von vorher 1h auf 7h anstieg. Der einzige Vorteil dieser Art des Druckens war jedoch, dass die Elektroden keine unerwünschten Verbindungen aufzeigten.

Der Support für die Federpins diente als Druckvorlage

Die Vorarbeiten (bohren, schleifen und Pins befestigen) liessen sich problemlos, jedoch mit einigem Zeitaufwand durchführen. Dort liesse sich durch Designverbesserungen im Druck (z.B. Löcher für die Pins im Boden mitausdrucken) einiges an Zeit sparen.

Auswertung des Versuchs – Tropfenbewegung:

Der Tropfen konnte auf der 3D-gedruckten Platine bewegt werden. Jedoch erwiesen sich die Bewegungen als nicht besonders ausgeprägt und wurden z.T. durch die Unebenheit der Platine verhindert.

Die Bewegung auf den 4x4 Elektroden konnte nicht kontinuierlich erfolgen, da der Tropfen durch die Unebenheit der Platine immer wieder an diesen hängenblieb oder dadurch eine Überlappung des Tropfens zwischen zwei Elektroden verhindert wurde.

Auswertung Zielerreichung:

Das Ziel war es zu zeigen, dass man ein EWoD-Device ausdrucken kann. Dies konnte realisiert werden. Somit konnte gezeigt werden, dass mittels 3D-Druck ein einfaches EWoD-Device hergestellt werden kann.

Jedoch muss das Device weitere manuelle Manipulationen (Schleifen, bohren, löten etc.) durchlaufen, um für Versuche nutzbar zu sein. Auch müssen ein externes Steuergerät und eine Hochspannungsquelle, wie z.B. der modifizierte OpenDrop, vorhanden sein, um ein vollständiges Device zu erhalten.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass mit den vorhandenen 3D-Druckern, welche frei erhältlich und erschwinglich sind, einfache EWoD-Devices hergestellt werden können.

Mithilfe teurerer und industrieller 3D-Drucker, wie z.B. den PCB-3D Drucker von NanoDimensions (18)) könnte in Zukunft der Druck der Platine einfacher, qualitativ hochwertiger und schneller realisiert werden wie mit dem hier genutzten FDM-3D-Drucker. Ebenfalls liessen sich so auch bereits integrierte Schaltkreise oder Bausteine platzieren, sodass die gedruckte Platine bereits mehr Funktionen aufweist als das hier gedruckte EWoD-Device.

4 Zusammenfassung

Das Thema der Arbeit war die Evaluation der Möglichkeiten von 3D-Druck in der Konstruktion von digitalen, mikrofluidischen Gerätschaften basierend auf einer Open-Source Plattform.

Im Verlauf dieser Masterthesis wurden daher neben den theoretischen Grundlagen, verschiedene praktische Versuche durchgeführt, um die Machbarkeit zu prüfen. Dazu wurden nach dem Proof-of-concept Versuch verschiedene Designs und Aufbauten erstellt und auf ihre Funktionalität hin überprüft. Aus diesen Versuchen heraus wurden verschiedene Erkenntnisse und Verbesserungsideen für die Erstellung von EWoD-Platinen und Gerätschaften mittels FDM 3D-Druck ermittelt:

4.1 Zusammenfassung der Versuche

4.1.1 Proof-of-Concept (Versuche der Kapitel 3.2.1 und 3.2.2)

Die Nutzung von 3D-Druck für die Erstellung von EWoD-fähigen Platinen konnte während der Versuche gezeigt werden. Die Manipulation eines Flüssigkeitstropfens auf einer gedruckten Platine war der Beweis für das im Vorfeld theoretisch überlegt Konzept. Dieser Beweis des Konzeptes war die Grundlage für alle weiteren Versuche während dieser Thesis, aber auch für alle weiteren Forschungen und Versuche die sich mit diesem Thema beschäftigen werden.

4.1.2 Weitere 3D-gedruckte Platinen (Versuch Kapitel 3.2.3):

Das Ziel war es die verschiedensten Möglichkeiten des 3D-Drucks zu zeigen und neue Designs auszuprobieren. Neben einer Multilayerplatine und sehr dünnen Platinen, wurde auch ein Kanaldesign realisiert. Insbesondere letzteres zeigt die Designmöglichkeiten, welche mit dem 3D-Druck realisiert werden können. Mit dem Kanalansatz könnte durch geschicktes Design und Nutzung von anderen 3D-Druckarten wie z.B. DLP, SLA etc., ein vollständiger Mikrofluidik-Chip erstellt werden. Dies wäre ein mögliches Ziel für zukünftige Forschungsarbeiten.

4.1.3 3d-gedrucktes EWoD-Device (Versuch Kapitel 3.2.4):

Die vorher durchgeführten Versuche dienten als Grundlage für diesen Versuch, der Herstellung eines EWoD-Device. Dies konnte ausgedruckt und zusammen mit dem modifizierten Open-Drop auch bedient werden. Grundsätzlich konnte somit gezeigt werden, dass es möglich ist ein ganzes Device auszudrucken. Jedoch konnte die Steuerung und die Hochspannungsversorgung nur via eines externen Gerätes (in diesem Fall, ein modifizierter OpenDrop) realisiert werden. Zukünftige Entwick-

lungen (z.B. Pick-and-Place-Funktionen am 3D-Drucker) oder auch durch Selbst-aufbringung von entsprechenden elektrischen Bauteilen, könnten diese Funktionen dem 3D-gedruckten EWoD-Device hinzugefügt werden.

4.2 Aufgetauchte Herausforderungen:

4.2.1 Oberflächenbeschaffenheit (keine ebene Fläche)

Ein bekanntes Problem des FDM-3D-Drucks ist dessen unebene Oberfläche. Dies ist natürlich bedingt durch das Layer-by-Layer-Verfahren⁷. Dazu kommen noch Unebenheiten auf der obersten Schicht durch Oozing oder dadurch, dass der zweite, ebenfalls heisse Extruder über die Oberfläche fährt und diese dadurch aufschmilzt. Ebenfalls kann es beim Verfahrensweg der Düsen dazu kommen, dass dieser nicht ganz angehoben wird und so gewollte Erhöhungen des gedruckten Teils zerstört. Weiter kann es während des Druckes zu einem Druckstop kommen, was dann dazu führt, dass die heisse Düse über einer bestimmten Stelle verbleibt und dadurch diese Stelle aufschmilzt und zerstört wird.

Möglichkeiten dies zu verhindern sind unter anderen:

- Abstellen der Sicherheitsfunktionen des 3D-Druckers
- Manuelle Anpassungen des G-Codes (dies ist jedoch je nach Drucker nicht empfehlenswert)
- Verwenden der Unterseite des Drucks, welches auf dem Kaptonband aufliegt. Dadurch wird eine sehr glatte Oberfläche erreicht.

Weitere Möglichkeiten zur Glättung der Oberfläche können Schleifen oder die Verwendung eines Lösemittels sein (z.B. Aceton für den Kunststoff ABS).

4.2.2 Kontaktprobleme mit leitfähigem Kunststoff

Ein Problem, welches bereits bei den ersten Versuchen auftrat war jenes, dass eine Kontaktierung mittels Kupferklebeband oder mittels Auflegen der Elektroden spitze zwischen der Hochspannungsversorgung und dem leitfähigem Teil der gedruckten Platine nicht funktionierte. Für einen guten Kontakt musste die Elektroden spitze etwas eingedrückt werden. Nur so konnte ein Kontakt erzeugt werden.

Dies sollte bei zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden und bei Kontaktierungen von grösseren Platinen berücksichtigt werden.

⁷ Deutsch: Schicht-für-Schicht Verfahren.

4.2.3 Druckprobleme, aufgrund von Druckstopps oder Abbrüchen beim leitfähigen Filament

Das Hauptproblem während des Drucks der Platinen waren mehrmalige Druckunter-/abbrüche während des Drucks. Hauptsächlich entstanden die Probleme durch das leitfähige Filament (F2).

Grund:

Der Hauptgrund für die Probleme, welche das leitfähige Filament (F2) beim Drucken verursachte lag vor allem an dessen Steifigkeit. Diese resultierte durch den verwendeten Leittruss. Die Steifigkeit oder Rigidität ist vor allem für 3D-Drucker ein Problem, welche einen sogenannten Bowden-Extruder verwenden (wie es in dieser Arbeit der Fall war). Da der Extruder somit weiter entfernt von den Hotenddüsen⁸ ist, kommt es zu einem höheren Druck auf das sich dazwischen befindliche Filament. Solange die Hotenddüse frei und der Fluss kontinuierlich ist kann der Druck abgebaut werden und es kommt zu keinem Bruch. Da sich jedoch während des Druckens immer wieder Ablagerungen an der Düse bildeten, war der Fluss nicht durchgängig kontinuierlich und es kam zu Filamentbrüchen. Waren diese innerhalb des Führungsschlauchs zwischen dem Extruder und den Hotenddüsen, so trat kein Problem auf. Trat der Bruch jedoch im Extruder auf, so wurde ein Sensor ausgelöst, welcher zu einem Unter- oder gar Abbruch des Druckes führte.

Um dieses Problem zu verhindern können folgende Massnahmen ergriffen werden:

- Keinen Bowden-Extruder verwenden, sondern einen Direct-Drive-Extruder. Dieser besitzt kein Zwischenstück zwischen dem Extruder und der Hotenddüse.
- Filament mit weniger leitfähigem Füllstoff nutzen, was jedoch zu einer Verminderung der Leitfähigkeit führen kann. Da es dieses Filament derzeit nicht auf dem Markt gibt, müsste es selbst hergestellt werden
- Anderen Kunststoff für das Filament verwenden. Z.B. anstatt PLA einen flexibleren Kunststoff.

4.2.4 Unerwünschte Verbindungen zwischen den Elektroden

Eines der Hauptprobleme, welches während der gesamten Arbeit auftrat, waren unerwünschte Verbindungen zwischen den einzelnen Elektroden. Diese traten durch unterschiedliche Faktoren auf:

- Oozing
- Verbliebene Russ-/Filamentreste auf der Düse

Diese beiden Hauptfaktoren führten dazu, dass sich die Elektroden miteinander verbanden und so die Platinen teilweise oder zur Gänze nicht nutzbar waren.

⁸ Siehe Glossar

Um dies zu verhindern sind vor allem Einstellungen an den Parametern des 3D-Druckers zu verändern. Es gibt für Single-Extruder 3D-Drucker eine sehr gute Übersicht über die gängigsten Probleme und möglichen Lösungen (siehe (19)), die evtl. auch für Dual-Extruder 3D-Drucker genutzt werden könnten. Jedoch ist dies auch abhängig vom Drucker und dessen Möglichkeiten.

4.2.5 Ungenügende Druckgenauigkeit

Eines der grundsätzlichen Probleme des 3D-Drucks mittels FDM ist dessen Limitierung bei kleinen Details bei dem zu druckenden Gegenstand. Beispielsweise kann bei einer 0.4 mm Hotenddüse kein Detail gedruckt werden, welches kleiner ist als diese 0.4, da es sonst zu Abbrüchen während des Druckes oder zu Fehlstellen im Gegenstand selber gibt.

Verbessern liesse sich dies durch einen kleineren Hotenddüsendurchmesser. Dies bedeutet jedoch einen Anstieg der benötigten Druckzeit, da nun weniger Volumen pro Minute gedruckt wird.

Alternativ könnten andere 3D-Druckarten genutzt werden, wie z.B. SLA/DLP, welche eine deutliche höhere Druckgenauigkeit aufweisen. Jedoch ist dort das Multi-material-Printing noch nicht auf dem Stand des FDM-3D-Drucks, sodass es ziemlich schwierig wird dies dort zu realisieren.

4.3 **Weitere offene Fragestellungen/Ideen für zukünftige Arbeiten:**

4.3.1 Wie hoch darf der maximale Widerstand sein, damit der EW-Effekt erzeugt werden kann? Und was ist das Optimum?

Diese Frage konnte während der praktischen Arbeit nicht gelöst werden. Es wäre jedoch ein wichtiger Input für die weitere Optimierung von Materialien und Geometrien, welche für den 3D-Druck genutzt werden. Es konnte auch aus keiner der Quellen in Erfahrung gebracht werden, sodass es sicherlich interessantes Thema für weitere Arbeiten wäre.

4.3.2 Nutzung anderer leitfähiger Filamente mit Füllstoffen wie z.B. mit Graphen oder Kupfer

Für diese Arbeit wurde nur eines der auf dem Markt erhältlichen, leitfähigen Filament genutzt. Dieses bot eine ausreichend hohe Leitfähigkeit, um den EW-Effekt aufzubauen. Jedoch könnten andere Filamente sich noch besser für diesen Zweck eignen. Dies zu prüfen, wäre eine weitere Fragestellung für eine zukünftige Arbeit. Ebenfalls könnte man sich vorstellen, selbst Filamente mit unterschiedlichen Leitfähigkeiten, Materialien etc. herzustellen.

Bekannte weitere leitfähige Filamente:

- Electrifi Conductive 3D Printing Filament der Firma Multi3D (20)
- Conductive Graphene PLA Filament der Firma BlackMagic3D (21)
- 3DXSTAT™ ESD ABS 3D Printing Filament der Firma 3DXTech (22)

4.3.3 Intrinsisch leitfähige Kunststoffe als Elektrodenmaterial

Interessant für weitere Arbeiten können auch intrinsisch, leitfähige Polymere sein. Dabei handelt es sich um Polymere, welche keine leitfähigen Füllstoffe oder spezielle Dotierungen benötigen, um elektrisch leitfähig zu sein (näheres zu diesen Kunststoffen siehe (23)).

Jedoch sind noch keine Filamente für FDM-3D-Drucker oder Dispersionen/Harze für SLA-Drucker vorhanden, sodass dies noch eine eigene Arbeit für sich wäre. Der Vorteil solcher Kunststoffe wäre, dass sie nicht durch Füllstoffe unerwünschte Materialeigenschaften (wie z.B. Rigidität) erhalten würden.

4.3.4 3D- Formen (Wellen, Kanäle, Pumpen etc.)

Die Nutzung von 3D-Druck lässt bei der Erstellung von Platinen völlig neue Formen zu wie z.B. wellenförmige Platinen, welche für Tests zur Stärke des EWoD-Effektes genutzt werden können oder verzweigte Kanalformen mit integrierten Elektroden, welche für den Transport der Flüssigkeit genutzt werden können.

Auch möglich sind Elektrodenkaskaden über mehrere Ebenen, welche wie eine Art Pumpe laufen könnten:

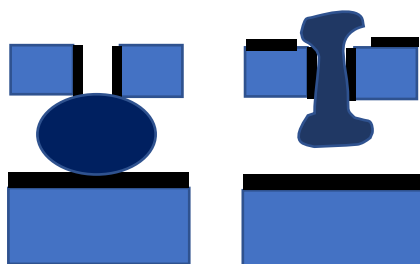


Abbildung 12: Möglicher Aufbau einer EWoD-Pumpe mit Elektroden (schwarz)

Hier könnten weitere interessante Designs angedacht werden, um die Vorteile des 3D-Drucks weiter auszunutzen resp. auszuloten.

4.3.5 Modularer Aufbau von Platinen und Devices

Modulare Aufbauten sind in der heutigen Zeit im Trend. Aus diesem Grund wären auch modulare Platinen oder gar ganze EWoD-Devices ein anzustrebendes Ziel. Austauschbare Aufbauten auf einem EWoD-Device mit unterschiedlichen verfahrenstechnischen Operationen wie z.B. Mischen, Teilen, Erhitzen, Abkühlen, für Reaktionen unterschiedlichster Art oder mit bestimmten Sensoren zur Analyse unterschiedlichster Eigenschaften.

Hier liessen sich mit 3D-Druck die unterschiedlichsten Aufbauten realisieren, welche direkt auf einem EWoD-Device (wie z.B. dem Opendrop) aufgesetzt werden können. Auch ganze EWoD-Devices liessen sich mit einem entsprechenden 3D-Drucker herstellen, diese lägen derzeit einige Preisklassen höher als der genutzte 3D-Drucker.

4.4 **Ausblick:**

Es konnte gezeigt werden, dass das vorher in der Theorie erdachte Konzept grundsätzlich funktioniert, ist es nun durchaus denkbar, mit den sich ständig verbesserten 3D-Druckern oder mit anderen 3D-Druck Verfahren weiter zu experimentieren.

Die Vorteile der nahezu freien Formenwahl und der unterschiedlichsten, nutzbaren Materialien, können zu weiteren neuen Möglichkeiten, Designs oder Anwendungen führen. Der Kostenfaktor für die Erstellung einfacher, funktionsfähiger Platinen ist gering, da es dafür nur einen handelsüblichen 3D-Drucker und frei erwerbliche Filamente benötigt. Die Software ist grundsätzlich umsonst und bietet eine grosse Auswahl an Möglichkeiten an.

Insbesondere die niedrigen Kosten können für zukünftige Versuche sehr interessant sein. Die hier hergestellten Platinen kosten in ihrer Herstellung weniger als 50 Cent und hängen in erster Linie von der Menge an genutztem leitfähigem Filament ab. Durch eigene Herstellung des Filaments z.B. mit Hilfe eines Filamentextruders, könnten diese Kosten noch weiter gedrückt werden.

Zwei der aufgetauchten Probleme, nämlich die Genauigkeit des Drucks bei kleinen Details und die oft aufgetretenen, unerwünschten Verbindungen zwischen den Elektroden, sind eine Frage der Parameter, sodass mit etwas weiterer Forschung hier bestimmte Einstellungen gefunden werden können, damit diese Probleme minimiert werden könnten.

5 Abkürzungs – und Symbolverzeichnis

Im Folgenden werden die in der Masterarbeit verwendeten Abkürzungen und Symbole erläutert.

Allgemein:

Abk.	Abkürzung
z. B.	zum Beispiel
resp.	respektive
z.T.	zum Teil
evtl.	eventuell
d.h.	das heisst
v.a.	vor allem

Fachlich:

3DP	3D Druck mit Pulver und Bindemittel
EW	Electrowetting
EWZ	Electrowetting-Zelle
EWoD	Electrowetting on dielectric
-D	- Device
DMF	Digitale Mikrofluidik
DNA	Desoxyribonukleinsäure
PLA	Poly lactide
FFF	Fused Filament Fabrication
FDM	Fused Deposition Modeling
EBM	Elektrobeammeling
STL	Standard Tessellation Language
SLA	Stereolithographie
SLS	Selektives Lasersintern
DLP	digital light processing

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bowden-Extruder vs. Direct-Drive-Extruder (1)	1
Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Elektrowetting-Zelle (links: ohne angelegte Spannung/ rechts: mit angelegter Spannung)	2
Abbildung 3: V.l.o.n.r.u.: Dropbot, ein Open-Source Gerät des Wheeler Microfluidics Laboratory (24)/ OpenDrop-EWoD-Device von Gaudilabs (11)/ Paper-based digital microfluidics (25)/ Flexible electronic paper technology (26))	6
Abbildung 4: Infografik FDM/FFF 3D-Druck	9
Abbildung 5: v.l.o.n.r.u.: Prototyp Rohfassung / Prototyp präpariert mit Parafilm und Silikonöl für Testlauf/Beschrifteter Prototyp(nicht sichtbar Silikonölfilm)/ Hochspannungsgenerator	20
Abbildung 6: Ausschnitt aus dem Video -Versuch 1 – Tropfenbewegung (oranger Pfeil zeigt Tropfenbewegung) (17)	22
Abbildung 7: Druckfehler Versuch 1	23
Abbildung 8: links: Prototyp / rechts: Nachgedruckten Prototypen (v.l.n.r. 1,2,3)	24
Abbildung 9: v.l.o.n.r.u.: Multilayerplatine Elektrodenoberfläche/ unterer Teil der Multilayerplatine mit Leitungen/ Weitere Multilayerplatine (Kaptonband auf Heatbed)	29
Abbildung 10: Versuch 3.2 Elektrodenplatine mit Kanal (2x2mm)	33
Abbildung 11: v.l.o.n.r.u.: 3D-Holder mit Federpins / Verkabelung mit dem modifizierten OpenDrop / Draufsicht auf finalen Aufbau (Support für Federpins wurde bereits entfernt) / Seitenansicht auf den finalen Aufbau / Elektrodenprüfung / letzten beiden Bilder: Transportversuch mit Wassertropfen (rot eingekreist)	38
Abbildung 12: Möglicher Aufbau einer EWoD-Pumpe mit Elektroden (schwarz)	46

7 Literaturverzeichnis

1. 3dprinterpower. Bowden Extruder Vs Direct Extruder Showdown. [Online] [Zitat vom: 16. 10 2017.] <http://3dprinterpower.com/index.php/bowden-extruder-vs-direct-extruder-showdown/>.
2. Richard Horne, Kalani Kirk Hausman. *3D Printing For Dummies*. s.l. : John Wiley & Sons, 2017. 1119386322.
3. Zhao, Ya-Pu und Wang, Ying. Fundamentals and Applications of Electrowetting: A critical review. *Rev. Adhesion Adhesives*. 1, 2013, 1.
4. Moon, Hyejin, et al. Low voltage electrowetting-on-dielectric. *Journal of applied physics*. 92, 2002, 7.
5. Ko, Hyojin and Jumi, Lee and Kim, Yongjun and Lee, Byeongno and Jung, Chan-Hee and Choi, Jae-Hak and Kwon, Oh-Sun and Shin, Kwanwoo. Active Digital Microfluidic Paper Chips with Inkjet-Printed Patterned Electrodes. *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)*. 04.2014, 26.
6. Cheng, Mark Ming-Cheng. *Electrowetting on Dielectric (EWOD) Using Graphene*. Wayne State : Wayne State University, 2013. 12-1088.
7. A. G. Papathanasiou, A. T. Papaioannou, A. Boudouvis. Illuminating the connection between contact angle saturation and dielectric breakdown in electrowetting through leakage current measurements. *Journal of Applied Physics*. 103, 2008, 034901.
8. Gaurav J. Shah, Aaron T. Ohta, Eric P.-Y. Chiou, Ming C. Wu, Chang-Jin “CJ” Kim. EWOD-driven droplet microfluidic device integrated with optoelectronic tweezers as an automated platform for cellular isolation and analysis. *Lab on a Chip*. 2009, Bd. 9, 1732–1739.
9. Hsien-Hua Shen, Shih-Kang Fan, Chang-Jin Kim, Da-Jeng Yao. EWOD microfluidic systems for biomedical applications. [Online] 05 2014. [Zitat vom: 20. 10 2017.] https://www.researchgate.net/publication/271952606_EWOD_microfluidic_systems_for_biomedical_applications. DOI: 10.1007/s10404-014-1386-y.
10. Illumina, Inc. Product Obsolescence Notification. *illumina.com*. [Online] 31. Januar 2017. [Zitat vom: 01. Juni 2017.] https://mkt.illumina.com/rs/600-XEX-927/images/PON0216%20NeoPrep%20Final.pdf?mkt_tok=eyJpIjoiT0Rjek9Ua3dPRGMxTTJVeIsInQiOiJlQ2cydW55TVwveSt6OVwvd1FHelJlYWpEUitjbTFNdStCM2x3bm5XbFNsMnU5MVVBbGtGb09Cd1JCaUZlV0dnZWRaMGlucFITbVwvb1U2aHpRTzJiaUcwZ2duMTVhSEFIUD.P0N0216.
11. Mirela Alistar, Urs Gaudenz. OpenDrop: An Integrated Do-It-Yourself Platform for Personal Use of Biochips. *Bioengineering*. 4, 2017, Bd. 45.

12. Fastermann, Petra. *3D-Druck/Rapid Prototyping: Eine Zukunftstechnologie – kompakt erklärt*. Heidelberg : Springer Vieweg, Berlin, 2012. 978-3-642-29224-8.
13. MCOR IRIS. [Online] Mcor Technologies Ltd. [Zitat vom: 10. 08 2007.] <http://mcortechnologies.com/3d-printers/iris/>.
14. Baumgärtner, Sebastian. Magazin 3D Druck. [Online] Magazin 3D Druck, 15. 07 2014. [Zitat vom: 15. 09 2017.] <http://www.magazin-3d-druck.de/fdm-3d-druck-abs-oder-pla/>.
15. Cel-robox. Cel-robox. [Online] Robox. [Zitat vom: 18. 10 2017.] <http://www.cel-robox.com/>.
16. Winters, Daniel. Daniel Winters - Personal Homepage. [Online] [Zitat vom: 03. 09 2017.] <https://tydirium.org/daniel/>.
17. Gaudenz, Urs. GaudiLabs. *OpenDrop V2*. [Online] 26. 04 2016. [Zitat vom: 14. 10 2017.] <http://www.gaudi.ch/OpenDrop/?p=17>.
18. NanoDimensions. The Dragonfly 2020 3D Printer. [Online] 2017. [Zitat vom: 14. 10 2017.] <http://www.nano-di.com/3d-printer>.
19. Simplify 3D. Print Quality Troubleshooting Guide. [Online] [Zitat vom: 15. 10 2017.] <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>.
20. Multi 3D. [Online] [Zitat vom: 15. 10 2017.] <https://www.multi3dllc.com/product/electrifi-3d-printing-filament/>.
21. BlackMagic3D. [Online] [Zitat vom: 15. 10 2017.] <http://www.blackmagic3d.com/Conductive-p/grphn-pla.htm>.
22. 3DXTech. [Online] [Zitat vom: 15. 10 2017.] <https://www.3dxtech.com/3dxstat-esd-abs-3d-printing-filament/>.
23. Matthias Rehahn. Elektrisch leitfähige Kunststoffe. *Chemie in unserer Zeit*. 1, 2003, 37.
24. Sci-bots. [Online] [Zitat vom: 18. 10 2017.] <http://www.sci-bots.com/>.
25. A.Wheeler. Grand Challenges Canada. [Online] 01. 10 2014. [Zitat vom: 18. 10 2017.] <http://www.grandchallenges.ca/grantee-stars/0638-01-10/>.
26. Andrew Steckl, Duk-Young Kim and Han You. Electrowetting: a flexible electronic-paper technology. *Spie*. [Online] 15. 02 2011. [Zitat vom: 18. 10 2017.] <http://spie.org/newsroom/3443-electrowetting-a-flexible-electronic-paper-technology?SSO=1.10.1117/2.1201101.003443>.

8 Anhang

Einstellungen 3D-Drucker Cel Robox RBX2

RBX01-DM

Fine

Profilname: Fine

Slicer-Typ: Default

Extrusion

Schichthöhe: 0.10 mm

Fülldicke: 0.40

Füllmuster: Line

Auffüllen jede: 1 Schichten

Feste Schichten an der Spitze: 10

Feste Schichten am Boden: 10

Anzahl der Umfänge: 3

RBX01-DM

Fine

Profilname: Fine

Slicer-Typ: Default

Ventile

Nozzle 1

Nozzle 2

Entfernte Menge: 0.30 0.30 mm³

Teilweise offener Wert: 0.5 0.5

RBX01-DM

Fine

Profilname: Fine

Slicer-Typ: Default

Kühlung

Automatisches Kühlen aktivieren: ☒

Lüftereinstellungen

Min. Drehzahl: 60

Max. Drehzahl: 100

Brückenlüfterdrehzahl: 100 %

Lüfter zuerst deaktivieren: -1 Schichten

Kühlschwellen

Lüfter aktivieren, wenn Schichtzeit <: 30 Sek.

Langsam werden, wenn Schichtzeit <: 25 Sek.

Min. Druckgeschwindigkeit: 8 mm/s

RBX01-DM

Fine

Profilname: Fine

Slicer-Typ: Default

Düsen

Düse

Extrusionsbreite

Erste Schicht: 0.3mm 0.50 mm

Umfang: 0.3mm 0.40 mm

Ausfüllen: 0.50 mm

Feste Auffüllung: 0.3mm 0.40 mm

Feste Auffüllung oben: 0.35 mm

Support: 0.3mm 0.50 mm

Support-Schnittstelle: 0.3mm

RBX01-DM

Fine

Profilname: Fine

Slicer-Typ: Default

Geschwindigkeit

Erste Schicht: 8 mm/s

Ausfüllen: 25 mm/s

Umfänge: 25 mm/s

Feste Auffüllung: 25 mm/s

Kleine Umfänge: 20 mm/s

Feste Auffüllung oben: 20 mm/s

Außenumfänge: 25 mm/s






Stützmaterial: 35 mm/s

Brücken: 20 mm/s

Lücke füllen: 20 mm/s

Interface: 40 mm/s



Einstellungen Filament PLA (F1)

1:  Robox Sunset Orange 	
Identifikation	
Filament-ID:	Uae62d1b07724b6
Materialname:	Robox Sunset Orange
Materialtyp:	PLA 
Farbe:	 
Kosten (GBP pro Kg):	37.89
Auf der Spule verbleibend (m):	-
Temperatur	
Bett (1. Schicht):	70 °C
Bett:	70 °C
Düse (1. Schicht):	210 °C
Düse:	205 °C
Umgebung:	30 °C
Filament	
Filament ø:	1.75 mm
Filament-Multiplikator:	1.00
Vorschub-Multiplikator:	1.00

Einstellungen Filament ProtoPasta Conductive Filament (F2)

		<div>Proto Pasta Conductive</div>			
		Identifikation			
Filament-ID:	<div>U272f919b92b440</div>				
Materialname:	<div>Proto Pasta Conductive</div>				
Materialtyp:	<div>PLA</div>				
Farbe:	<div></div>				
Kosten (GBP pro Kg):	<div>999.00</div>				
Auf der Spule verbleibend (m):	<div>-</div>				
Temperatur		Filament			
Bett (1. Schicht):	<div>65</div>	°C	Filament ø:	<div>1.75</div>	mm
Bett:	<div>65</div>	°C	Filament-Multiplikator:	<div>0.95</div>	
Düse (1. Schicht):	<div>195</div>	°C	Vorschub-Multiplikator:	<div>0.60</div>	
Düse:	<div>190</div>	°C			
Umgebung:	<div>27</div>	°C			

Einstellungen Filament ABS (F3)

		 Robox Chroma Green ▼			
		Identifikation			
Filament-ID:	<input type="text" value="Uebd2bd8b7ca4bb"/>				
Materialname:	<input type="text" value="Robox Chroma Green"/>				
Materialtyp:	<input type="text" value="ABS"/>				
Farbe:	 ▼				
Kosten (GBP pro Kg):	<input type="text" value="42.20"/>				
Auf der Spule verbleibend (m):	<input type="text" value="-"/>				
Temperatur		Filament			
Bett (1. Schicht):	<input type="text" value="125"/>	°C	Filament ø:	<input type="text" value="1.75"/>	mm
Bett:	<input type="text" value="115"/>	°C	Filament-Multiplikator:	<input type="text" value="0.95"/>	
Düse (1. Schicht):	<input type="text" value="245"/>	°C	Vorschub-Multiplikator:	<input type="text" value="1.00"/>	
Düse:	<input type="text" value="235"/>	°C			
Umgebung:	<input type="text" value="60"/>	°C			