



hochschule mannheim

Best Practices zur Umsetzung von interaktiven Produkten basierend auf gedruckten Schaltungen

Cem Tekinbas

Bachelor-Thesis

Studiengang Informatik

Fakultät für Informatik

Hochschule Mannheim

15.02.2017

Durchgeführt in der Hochschule Mannheim

Betreuer: Prof. Thomas Smits, Hochschule Mannheim

Zweitkorrektor: Prof. Kirstin Kohler, Hochschule Mannheim

Tekinbas, Cem

Best Practices zur Umsetzung von interaktiven Produkten basierend auf gedruckten Schaltungen / Cem Tekinbas. –

Bachelor-Thesis, Mannheim: Hochschule Mannheim, 2017. 44 Seiten.

Tekinbas, Cem

Best practices for the implementation of interactive products based on printed circuits / Cem Tekinbas. –

Bachelor Thesis, Mannheim: University of Applied Sciences Mannheim, 2017. 44 Pages.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ich bin damit einverstanden, dass meine Arbeit veröffentlicht wird, d. h. dass die Arbeit elektronisch gespeichert, in andere Formate konvertiert, auf den Servern der Hochschule Mannheim öffentlich zugänglich gemacht und über das Internet verbreitet werden darf.

Mannheim, 15.02.2017

Cem Tekinbas

Abstract

Best Practices zur Umsetzung von interaktiven Produkten basierend auf gedruckten Schaltungen

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Best Practices für das Drucken von interaktiven Produkten mit elektrisch leitfähiger Tinte zu finden und zu beschreiben. Dafür wird ein bestehendes Projekt analysiert, nachgebaut und optimiert. Des Weiteren wird eine kapazitive Lichtsteuerung mithilfe gedruckter Sensoren entwickelt. Die Sensoren können aufgrund ihrer Flachheit versteckt unter Tapeten angebracht werden. Als Ergebnis werden Faktoren präsentiert, die beim Umgang mit leitfähiger Tinte und Tintenstrahl Druckern zu beachten sind, um ein optimales Ergebnis zu erhalten.

Best practices for the implementation of interactive products based on printed circuits

The aim of this work is to find and describe best practices for the printing of interactive products with electrically conductive ink. To this end, an existing project is analyzed, refined and optimized. Furthermore, a capacitive light control system is developed using printed sensors. Due to their flatness, the sensors can be hidden under wallpaper. As a result, factors to be considered when dealing with conductive ink and inkjet printers are provided, in order to obtain an optimum result.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Grundlagen.....	3
2.1	Technische Grundlagen.....	3
2.1.1	Tinte	3
2.1.2	Drucker	4
2.2	Verwandte Arbeiten	6
2.2.1	Gedruckte Sensoren.....	6
2.2.2	Gedruckte Aktoren.....	8
2.2.3	Foldio	9
2.3	Anwendungsgebiete	10
3	Nachbau eines Papierlautsprechers und Herausfinden von Best Practices.....	11
3.1	Analyse des Projekts	11
3.1.1	Fragestellung	11
3.1.2	Aufbau und Durchführung der Analyse	12
3.2	Verbesserungen und Best Practices	19
3.3	Ausblick	28
4	Gedruckte kapazitive Lichtsteuerung.....	29
4.1	Problemstellung	29
4.2	Zielsetzung.....	29
4.3	Anleitung	31
4.3.1	Bauteile und Materialien	31
4.3.2	Drucken der Sensoren.....	32
4.3.3	Anfertigung der kapazitiven Lichtsteuerung.....	34
4.3.4	Kalibrieren der Werte.....	35
4.3.5	Unterschiede beim Betrieb von Halogen- und LED Leuchtmitteln	38
5	Schlussbetrachtung.....	41

Abkürzungsverzeichnis.....	ix
Tabellenverzeichnis.....	xi
Abbildungsverzeichnis.....	xiii
Quellcodeverzeichnis	xv
Literaturverzeichnis.....	xvii
Danksagung.....	xix

1 Einleitung

Elektronische Schaltungen lassen sich auf verschiedene Art und Weise herstellen und haben unterschiedliche Vor- und Nachteile. Beim Prototyping beispielsweise, ist es wichtig, dass eine Schaltung einfach veränderbar ist und dass sie sowohl schnell als auch möglichst kostengünstig hergestellt werden kann. Meist geschieht dies mit Hilfe von Breadboards und Steckbrücken. Die verschiedenen Komponenten lassen sich so schnell miteinander verbinden und es können jederzeit Bauteile hinzugefügt, ausgetauscht oder weggelassen werden. Die Nachteile von Breadboard-Prototypen sind allerdings nicht unerheblich. Zum einen sind diese in der Regel sehr sperrig und weil sie sich zudem sehr leicht lösen können, nicht für einen dauerhaften Einsatz geeignet.

Wenn Breadboard-Prototypen getestet wurden und als reif genug angesehen werden, um produziert zu werden, werden die einzelnen Bauteile in der Regel auf einer Platine miteinander verbunden. Bei Einzelstücken oder geringen Stückzahlen werden hier meist Lochraster-Platinen verwendet, auf die die Bauteile gesteckt und mithilfe von Lötverbindungen und Drahtbrücken miteinander verbunden werden. Die bestückten Platinen sind meist um ein vielfaches kompakter als Breadboard-Prototypen und ein dauerhafter Einsatz jener ist auch problemlos möglich. Da das Bestücken und Verbinden der Bauteile auf Lochraster-Platinen allerdings sehr zeitaufwendig und fehleranfällig ist, eignet sich dieses Verfahren nicht unbedingt dazu größere Stückzahlen anzufertigen.

Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Thesis ist es, Best Practices zur Umsetzung von interaktiven Produkten, basierend auf gedruckten Schaltungen herauszufinden. Es sollen auch verschiedene Materialien, Bauteile und Geräte analysiert werden, mit deren Hilfe es möglich ist gedruckte Leiterbahnen, Sensoren und Aktoren herzustellen und zu betreiben.

Aufbau der Bachelor Thesis

In Kapitel 2 werden die technischen Grundlagen beschrieben, welche beachtet werden müssen, wenn Leiterbahnen gedruckt werden sollen. Hierbei wird Grundlegendes zum verwendbaren Drucker, als auch zur Tinte erläutert. Des Weiteren wurden verwandte Arbeiten gesammelt um aufzuzeigen welche Projekte bereits mit Hilfe von gedruckten

Leiterbahnen umgesetzt wurden und welche Möglichkeiten geboten sind. Am Ende des Kapitels werden außerdem noch Anwendungsgebiete genannt, welche von der Technologie der gedruckten Leiterbahnen profitieren.

In Kapitel 3 wird ein Papierlautsprecher, welcher auch in den verwandten Arbeiten gefunden werden kann, analysiert und nachgebaut um Best Practices beim Umgang mit gedruckten Leiterbahnen abzuleiten. Des Weiteren wurden verschiedene Träger- und Leitermaterialien, sowie verschiedene Befestigungsmöglichkeiten von elektronischen Bauteilen auf gedruckten Leiterbahnen analysiert.

Kapitel 4 enthält die Bauanleitung einer Lichtsteuerung, die über einen Arduino, kapazitive Veränderungen von gedruckten Leiterbahnen ausliest. Die gedruckten Sensoren werden unter einer Tapete angebracht. Wenn beispielsweise mit einem Finger über die Stelle der Tapete gestrichen wird, unter der sich die Sensoren befinden, wird die Helligkeit des Lichts herauf- oder herabgeregelt.

In Kapitel 5 wird die Thesis abschließend zusammengefasst und ein Überblick der herausgefundenen Best Practices aufgelistet. Des Weiteren wird ein Fazit gezogen und in einem Ausblick wird beschrieben, wie das Thema gedruckte Leiterbahnen weiter verbessert werden könnte.

2 Grundlagen

2.1 Technische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen bezüglich der zur Herstellung von gedruckten Schaltungen nötigen Geräte und Materialien erläutert. Hierzu zählen unter anderem auch verschiedene Funktionsweisen von Düsen eines Tintenstrahldruckers oder das selbst Befüllen von Tintenpatronen.

2.1.1 Tinte

Es gibt verschiedene Arten von leitfähiger Tinte mit denen Schaltungen produziert werden können. Die wichtigsten Merkmale dabei sind folgende:

- **Leitermaterial**

Aktuell verwendet man drei Arten von leitfähigen Tinten. Tinten auf Kohlenstoffbasis wie beispielsweise Bare Conductive Ink, Tinten auf Kupferbasis und Tinten auf Silberbasis. Die drei Materialien unterscheiden sich vor allem in der elektrischen Leitfähigkeit, die Tinte auf Silberbasis wie beispielsweise die Mitsubishi NBSIJ-FD02 [9] leitet mit $0,1 - 0,2 \Omega/\text{m}^2$ am besten und Tinte auf Kohlenstoffbasis wie beispielsweise die Tinte von Bare Conductive [15] mit $55 \Omega/\text{m}^2$ am schlechtesten.

- **Partikelgröße**

Bei der Partikelgröße der leitfähigen Teilchen in den Tinten unterscheidet man zwischen Nanopartikel Tinten, wie zum Beispiel der von Mitsubishi Paper Mills hergestellten Tinte mit 20 nm großen Partikeln und Mikropartikel Tinten. Von Nanopartikeln spricht man bei einer Partikelgröße zwischen 1 und 100 Nanometern [4].

Nanopartikel Tinten können aufgrund der feinen Partikel im Gegensatz zu Mikropartikel tinten auch mit handelsüblichen Tintenstrahldruckern verwendet werden, wohingegen Mikropartikel die Düsen des Druckers verstopfen würden.

- **Sinterprozesse**

Da die Tinte nicht nur aus leitenden Partikeln, sondern auch aus Binde- und Lösungsmitteln besteht, besitzt die Tinte direkt nach dem Auftragen noch nicht ihre volle Leitfähigkeit. Zusätzlich sind die Partikel von Polymeren umhüllt, die vor Verklumpung der Tinte schützen sollen.

Hier gibt es verschiedene Arten wie die Tinten behandelt werden müssen. Bei thermischer Sinterung muss die Tinte mitsamt Trägermaterial bzw. der Leiterplatte eine gewisse Zeit auf eine bestimmte Temperatur erhitzt werden. In der Regel muss die Schaltung mehrere Stunden bei über 150 °C in einem Ofen erhitzt werden, damit die bestmögliche Leitfähigkeit erreicht wird [6].

Einige Tinten sintern chemisch, was deutlich schneller und vor allem schonender für die Trägermaterialien ist. Hierbei verdunstet das Lösungsmittel bei Raumtemperatur, meist innerhalb weniger Minuten.

- **Viskosität**

Große Unterschiede gibt es auch bezüglich der Viskosität von Tinten. Gerade wenn die Tinten mithilfe von Tintenstrahldruckern auf den Träger aufgebracht werden sollen, ist es wichtig, dass diese eine ähnliche Viskosität wie handelsübliche Druckertinte haben. So kann gewährleistet werden, dass diese einen ähnlichen Fluss wie Druckertinte hat und nicht zu schnell oder zu langsam in die Düsen fließt.

2.1.2 Drucker

Wenn Schaltungen mithilfe eines Tintenstrahldruckers hergestellt werden, ist es wichtig, dass der Drucker überhaupt dazu geeignet ist. Zu beachten sind folgende Dinge:

1. Können Patronen von Drittanbietern verwendet werden?
2. Sind unbefüllte Patronen erhältlich?
3. Welche Art von Druckkopf hat der Drucker?

Auf Tintenpatronen von Druckern sind in der Regel Mikrochips angebracht, auf denen der Füllstand gespeichert wird und welche dem Drucker mitteilen, ob die Patrone schon einmal verwendet wurde. Die meisten Drucker nehmen wiederbefüllte Originalpatronen nicht an. Somit ist es in der Regel nicht möglich eine Patrone leerdrukken und diese dann mit leitfähiger Tinte zu befüllen. Selbst wenn ein Drucker zulassen würde,

dass wiederbefüllte Patronen verwendet werden, ist trotzdem davon abzuraten Patronen, die normale Tinte enthalten haben mit leitfähiger Tinte zu befüllen, da Tintenreste die Leitfähigkeit beeinträchtigen können.

Außerdem könnten Farbreste in der Patrone sich mit leitfähiger Tinte verbinden und zu Verklumpungen oder unterbrochenen Leiterbahnen führen.

Druckköpfe von namhaften Herstellern dosieren Tinte thermisch (Abbildung 1), piezoelektrisch (Abbildung 2) oder mit einer Kombination beider Verfahren [3].

Bei Druckköpfen mit einem Thermoelement wird die Tinte im Druckkopf erwärmt, wodurch sich ihr Volumen erhöht. Bei Druckköpfen mit einem Piezoelement hingegen, wird die Tinte aus dem Druckkopf gefördert, indem das Piezoelement mit Strom versorgt wird, sich ausdehnt und die Tinte so aus der Leitung gedrückt wird.

Wenn Informationen verfügbar sind mit welchem System ein Drucker funktioniert, ist dazu zu raten Drucker mit piezoelektrisch dosierenden Düsen zu verwenden, da es bei thermischen Düsen durch Verdampfung von Lösungsmitteln zu frühzeitiger Sinterung, Verstopfung oder Verklebung der Düsen kommen kann [13].

Drucker der Firma Brother sind besonders gut geeignet um mit leitfähiger Nanopartikel-Tinte zu drucken, da die verbauten Düsen meist mehr Tinte abgeben als Drucker vergleichbarer Hersteller [5].

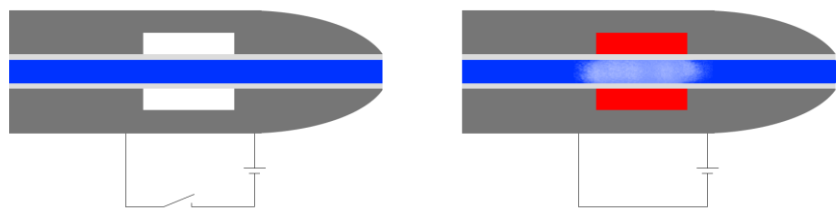


Abbildung 1: Druckkopf mit Thermoelement

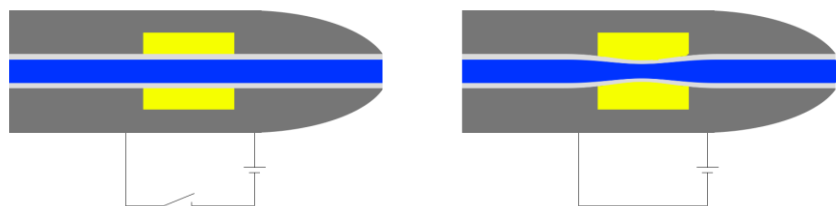


Abbildung 2: Druckkopf mit Piezoelement

2.2 Verwandte Arbeiten

Im folgenden Abschnitt sind einige verwandte Arbeiten dieser Thesis aufgelistet, die aufzeigen sollen in welchen Bereichen bereits Produkte existieren und welche Möglichkeiten gedruckte Schaltungen bieten.

Die verwandten Arbeiten können grob in die Bereiche Sensoren und Aktoren unterteilt werden, da sowohl Ausgaben wie beispielsweise Töne erzeugt, aber auch verschiedene Eingaben beziehungsweise Messungen erfolgen können.

2.2.1 Gedruckte Sensoren

SenSprout: Gedruckter Erd- und Blattfeuchtigkeitssensor

SenSprout [7] ist ein Gerät, das in Blumenbeeten Anwendung findet. Das Gerät hat zwei Blätter und einen Stiel, die an einen Mikrocontroller angeschlossen sind (siehe Abbildung 3).

Die Blätter und der Stiel bestehen aus einem Material auf Papierbasis, welches mit leitfähiger Tinte bedruckt wurde. Der Mikrocontroller erfasst kapazitive Änderungen auf einem der beiden Blätter sowie auf dem Stiel und kann dadurch ebenso Feuchtigkeit wie auch Frost ermitteln. Das zweite Blatt fungiert als Antenne und kann die Daten kabellos, mit Hilfe von Radio-frequency identification (RFID) an ein Empfängergerät übermitteln.



Abbildung 3: SenSprout [7]

PaperID: Batterie- und Kabellose Interfaces auf Papier

Wie von Hanchuan et al. [8] gezeigt wird ist es möglich, RFID Antennen mit leitfähiger Tinte und Papier herzustellen. Die Tinte kann hierbei entweder mit einem Tintenstrahldrucker oder aber mit einem entsprechenden Stift auf das Papier aufgebracht werden.

Es gibt viele Anwendungsgebiete der Schaltungen und der verbundenen Antennen. Beispielsweise können Tests mit Multiple-Choice Fragen (Abbildung 4) auf Papier gedruckt werden und die gegebenen Antworten werden kabellos erfasst. Das Ankreuzen, beziehungsweise das permanente Markieren muss hier allerdings mit leitfähiger Tinte stattfinden, da ein Stromkreis geschlossen werden muss. Es ist außerdem möglich die Geschwindigkeit und Position der Antennen (Entfernung von dem Empfänger) zu messen.

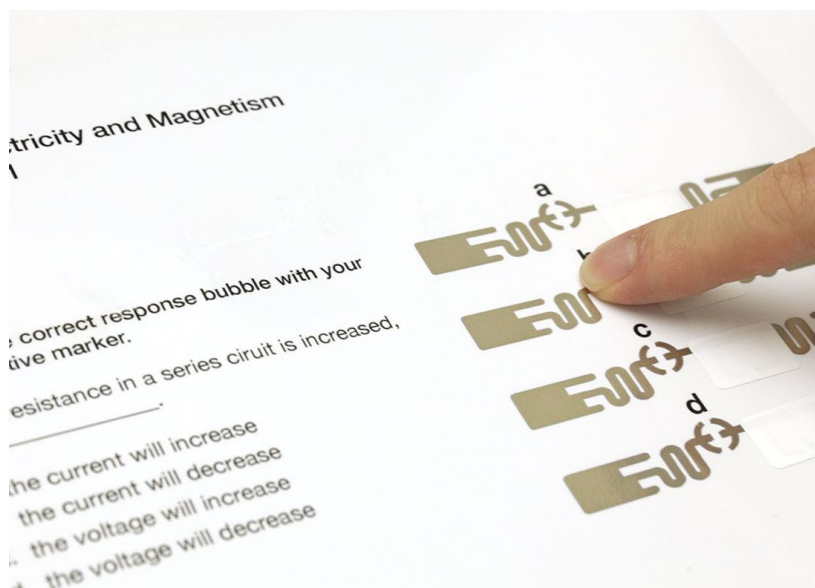


Abbildung 4: Multiple-Choice Aufgabe über RFID [8]

Besonders interessant an dieser Technologie ist, dass die Antennen passiv und kabellos durch den Empfänger beziehungsweise das Lesegerät über RFID Energy Harvesting mit Strom versorgt werden. Somit sind weder Batterien noch Kabel notwendig um Daten auszulesen, beziehungsweise um sie zu übertragen. Der Empfänger erzeugt hierzu ein hochfrequentes, elektromagnetisches Wechselfeld, welches die Antenne aufnimmt und dem Mikrochip als Stromversorgung zur Verfügung stellt.

2.2.2 Gedruckte Aktoren

Papierlautsprecher

Gourguechon [12] hat mithilfe von auf Papier gedruckten Leiterbahnen einen Lautsprecher gebaut und Bauteile eines Radios für den dazugehörigen Verstärker verwendet.

Die verschiedenen elektronischen Bauteile, wie beispielsweise ein Schiebepotentiometer wurden auf ein Blatt Papier geklebt und mit leitfähiger Tinte miteinander verbunden. Der Papier-Lautsprecher wird aktiviert indem das Papier um die Spule – welche als Schwingspule dient – zu einem Kegel ausgeklappt wird (Abbildung 5).

Die Musik, beziehungsweise die Töne, die der Lautsprecher abspielen soll, werden über einen 3,5 mm Klinke-Stecker wie er beispielsweise auch an Kopfhörern verwendet wird, an die Elektronik übertragen.

Das Audiosignal wird durch die Bauteile verstärkt und in Form von elektrischem Strom durch die Spule geleitet. Durch den Stromfluss entstehen magnetische Felder, welche durch einen Dauermagneten angezogen oder abgestoßen werden. Es ist anzunehmen, dass die Autorin auf der Rückseite der Spule einen Magneten angebracht hat, falls das Magnetfeld der Magnete, die den Kegel befestigen nicht stark genug ist, um die Spule zu erreichen. Durch die entstehende Schwingung in der Spule und in dem, beziehungsweise den Magneten werden Töne erzeugt.

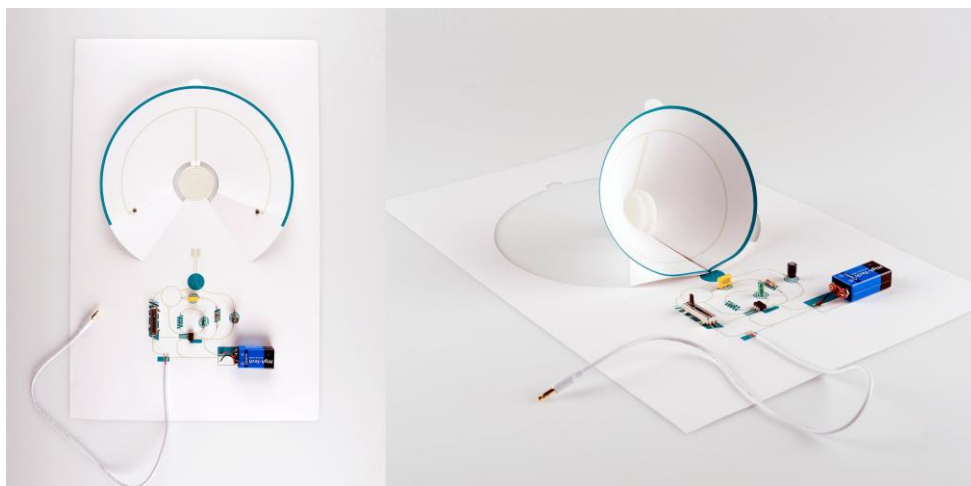


Abbildung 5: Papierlautsprecher [12]

2.2.3 Foldio

Foldios sind mit leitfähiger Tinte bedruckte, faltbare Objekte aus Papier. Sie erkennen wie in [10] beschrieben verschiedene Touch-Eingaben sowie Faltung, durchschneiden des Papiers und Weiteres. Außerdem ist es möglich mithilfe von Elektrolumineszenz (EL) Farbe verschiedene Ausgaben zu erzeugen. Formgedächtnislegierungen, die direkt auf dem Papier aufgebracht werden machen es möglich, dass das Papier selbstständig seine Form ändern kann. Da Foldio mehrere voneinander unabhängige Funktionen hat, kann man sie sowohl zu gedruckten Aktoren als auch zu gedruckten Sensoren zählen.

Den Autoren war es wichtig, dass die Objekte dreidimensional gestaltet werden können, da auf diese Weise das finale Produkt in Gänze betrachtet werden kann und das bereits bevor es physisch verfügbar ist. Hierzu können 3D Modellierungsprogramme – wie beispielsweise Blender – verwendet werden. Innerhalb des Programms können Sensoren und Aktoren in das Objekt eingefügt werden. Das dreidimensionale Objekt wird dann in eine zweidimensionale Form konvertiert und muss nach dem Drucken in die richtige Form gefaltet werden. Die Sensoren und Aktoren können dann nachträglich auf dem Papier aufgebracht werden.

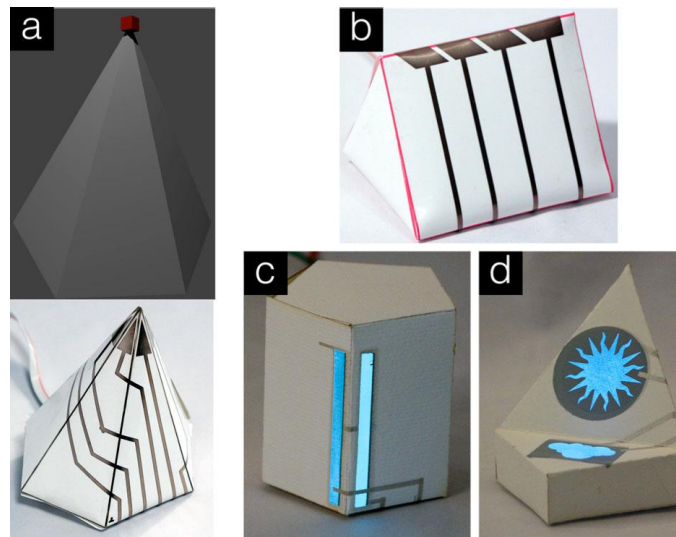


Abbildung 6: Foldio Beispiele [10]

Auf Abbildung 6a ist erkennbar wie das Objekt ursprünglich in der Software dargestellt wird und wie es nach dem Ausdrucken und Falten aussieht. Abbildung 6b zeigt ein Objekt mit berührungsempfindlichen Ecksensoren und Abbildung 6c und Abbildung 6d zeigen Objekte an die EL Displays angebracht wurden.

2.3 Anwendungsgebiete

Gedruckte Schaltungen finden bereits in einigen Alltags-Produkten wie beispielsweise Fernsehern Anwendung. Dort können organische LEDs mit einem Tintenstrahldruckverfahren hergestellt werden, statt Panels mit Hintergrundbeleuchtung zu verwenden [2]. Momentan ist das Potential von gedruckten Leiterbahnen aber bei Weitem nicht ausgeschöpft. Wie in 2.2 - Verwandte Arbeiten dargestellt, gibt es einige Projekte und Anwendungsgebiete die noch in den Kinderschuhen stecken. Teilweise sind diese auch noch nicht marktreif oder haben noch keinen Platz auf dem Markt gefunden.

Fast Prototyping

Mit Hilfe von druckbaren Schaltungen, Sensoren und Aktoren ist es möglich, Prototypen schnell, günstig und reproduzierbar herzustellen [5].

Gesundheitswesen

Besonders flache und elastische Sensoren können weniger störend an Patienten angebracht werden, um beispielsweise Körperfunktionen wie Herzfrequenz, Atmung oder Körpertemperatur zu überwachen [14].

Neue Arten von Sensoren

Antennen (RFID), flache Sensoren und Aktoren können schnell und einfach selbst in der benötigten Form und Größe hergestellt und teilweise sogar direkt auf dem Trägermaterial aufgebracht werden [8].

Smarte, interaktive Printmedien und Verpackungen

Im Bereich Printmedien und Verpackungen sind derzeit schon einige Veränderungen sichtbar. Bis vor einiger Zeit waren Drucke in beiden Bereichen absolut statisch. Heute sieht man aber immer öfter gedruckte Links zu Webseiten und QR Codes, die dazu einladen sich mit mobilen Endgeräten weiter über das Produkt oder die Dienstleistung zu informieren. Mit gedruckten Leiterbahnen, Sensoren und Aktoren ist es teilweise möglich gänzlich auf weitere Geräte zu verzichten, um mit dem Produkt zu interagieren. Hier wären beispielsweise im Bereich Lebensmittel Sensoren möglich, welche eigenständig überprüfen, ob die verpackte Ware verdorben ist oder ob die Kühlkette unterbrochen wurde [11].

3 Nachbau eines Papierlautsprechers und Herausfinden von Best Practices

3.1 Analyse des Projekts

Bei dem von Gourguechon [12] gebauten Papierlautsprecher sind alle für den Betrieb des Lautsprechers nötigen elektronischen Bauteile auf dem Papier angebracht. Es muss lediglich noch die Audioquelle mithilfe eines gängigen 3,5 mm Klinke-Steckers angeschlossen und Musik abgespielt werden. Die aus einem Radio stammenden, auf dem Papier aufgebrachten Teile ergeben einen einfachen Verstärker, ohne den die abgespielte Musik nicht hörbar wäre.

Um die gedruckte Schwingspule etwas zu unterstützen, wird ein Papierschirm, ähnlich wie bei einem Grammophon um sie herum gestülpt. Aus dem Artikel geht nicht hervor wie die Spule magnetisiert wird. Es ist aber davon auszugehen, dass das Magnetfeld der Neodym Magnete, welche den Papierschirm am Papier fixieren, nicht ausreichend stark ist um die Spule zu erreichen. Es wäre daher auch möglich, dass ein weiterer Magnet auf der Rückseite der Spule angebracht ist. Die Spule des Lautsprechers hat 10 schmale Windungen und ist einseitig.

3.1.1 Fragestellung

Der von Gourguechon [12] gebaute Papierlautsprecher sollte hauptsächlich dazu dienen aufzuzeigen, welche Bauteile sich in Alltagselektronik befinden. Da deshalb vermutlich keine Analyse der einzelnen Bauteile stattfand oder Best Practices zum Bau beachtet wurden, blieben folgende Fragen offen:

- Beeinflusst die Anzahl der Windungen die Lautstärke und/oder die Qualität der abgespielten Musik?
- Wie breit sollten die Bahnen der Spule des Lautsprechers sein, damit das beste Ergebnis erzielt wird?
- In welchem Maß sind Größenänderungen der Spule möglich und inwiefern sind besonders kleine Spulen mit einem Tintenstrahldrucker druckbar?
- Wie wirkt sich die Art beziehungsweise die Stärke und die Form des Magneten auf die Spule aus?

- Entsteht, gerade bei leistungsstarken Verstärkern eine zu hohe Abwärme, sodass sich möglicherweise das Papier, beziehungsweise das Trägermaterial entzünden könnte?
- Sind andere Trägermaterialien als Papier möglicherweise besser geeignet um einen Lautsprecher herzustellen und können diese mit leitfähiger Tinte bedruckt werden? Falls ja, ist direktes Drucken mit einem Tintenstrahldrucker auf diesen anderen Materialien ohne Weiteres möglich?
- Welche anderen, nicht gedruckten Leitermaterialien eignen sich noch um einen Lautsprecher wie den oben beschriebenen herzustellen und inwiefern unterscheiden sich so hergestellte Lautsprecher von dem gedruckten?
- Wie lassen sich die elektrischen Bauteile am besten auf dem Trägermaterial befestigen?

3.1.2 Aufbau und Durchführung der Analyse

Da das größte Interesse dem Lautsprecher an sich galt, wurde anders als bei dem von Gourguechon [12] gebauten Papierlautsprecher ein 12 Watt Mono Verstärker verwendet, statt Bauteile eines Radios auf Papier zu kleben. Dadurch sollte verhindert werden, dass Fehler oder Störungen, welche von anderen Bauteilen oder deren Befestigung auf den Leiterbahnen herrühren, nicht die Ergebnisse beeinflussen.

Es wurden aber trotzdem von dem Lautsprecher unabhängige Tests durchgeführt, um zu analysieren, wie elektronische Bauteile am besten auf gedruckten Leiterbahnen angebracht werden können.

Verwendeter Drucker

Zum Drucken der Mitsubishi Silver Nano Ink NBSIJ-MU01 wurde ein Brother MFC-J5320DW Tintenstrahl-Multifunktionsdrucker verwendet. Wie in Kapitel 2.1.2 erwähnt, wurde ein Drucker der Marke Brother verwendet, da deren Düsen meist mehr Tinte abgeben, als Drucker vergleichbarer Hersteller und diese daher besonders gut für das Drucken von Leiterbahnen geeignet sind.

Verwendete Tintenpatronen

Um Verunreinigungen der leitfähigen Tinte durch handelsübliche Tinte zu vermeiden, wurden wie in Kapitel 2.1.2 bereits erwähnt, neue, unbefüllte Fill-In-Patronen mit der Mitsubishi Tinte befüllt. In der Regel lassen sich die originalen Tintenpatronen nicht

ohne Weiteres wieder befüllen. Zum einen sind die dafür notwendigen Einfüllöffnungen nicht vorhanden und zum anderen, weil der Drucker auf dem Chip der Patrone abspeichert, dass diese bereits entleert wurde und dies nur auf Umwegen rückgängig gemacht werden kann.

Bei den Fill-In-Patronen (siehe Abbildung 7) handelt es sich um LC-229 und LC-225 Patronen mit einem Auto Reset Chip (ARC). Dieser Chip sorgt dafür, dass sich die Patronen nach dem leerdrukken wieder befüllen lassen, da der Drucker die Menge der verbrauchten Tinte protokolliert und der jeweiligen Patrone über den Chip zuordnet. Ohne einen solchen ARC kann es dazu kommen, dass der Drucker eine volle Patrone als bereits entleert erkennt, da die Menge der vom Drucker verbrauchten Tinte, die Füllmenge der Patrone bereits erreicht hat.

Werden mit einem ARC ausgestattete, wieder befüllte Patronen in den Drucker eingesetzt, werden sie von dem Drucker als neue Patronen eingestuft und der Drucker misst über den Schwimmer die tatsächliche Menge der Tinte.



Abbildung 7: LC-229 (schwarz) und LC-225 Fill-In-Patronen mit Auto Reset Chip

Erstes Befüllen der Patronen

Die Patronen werden mit Hilfe von handelsüblichen Spritzen befüllt. Bei den Spritzen ist darauf zu achten, dass das maximal zu befüllende Volumen der Patrone gut mit der Skala abmessbar ist.

Um Verstopfungen der Druckköpfe vorzubeugen, wurde die Tinte durch einen Spritzenvorsatzfilter mit einer Porengröße von 5µm und einer hydrophoben Membran in die Patrone geleitet (Abbildung 8).

Bevor die Tinte in die Patrone gefüllt wird, müssen die Stopfen an den Einfüllöffnungen entfernt werden. Oberhalb der Einfüllöffnung befindet sich ein weiterer Stopfen, welcher zur Entlüftung dient. Wenn dieser ebenfalls entfernt wird, besteht das Risiko, dass beim Neigen der Patrone Tinte ausläuft. Beim Entfernen ist also besondere Vorsicht geboten.

Die LC-229 Patrone für schwarze Tinte hat laut Herstellerangabe ein Fassungsvermögen von 19 ml und die LC-225 Patronen für Cyan, Magenta und Gelb 11 ml.

Nach dem Befüllen der Patronen, werden die Stopfen zum Verschließen der Einfüllöffnungen wieder angebracht und die Patronen können in den Drucker eingesetzt werden.

Nach dem Einsetzen der Patronen meldete der Drucker mehrmals, dass die Patronen leer seien, oder dass die Patronen nicht erkannt werden konnten. Dieses Problem ließ sich lösen indem noch zirka 4 ml mehr von der Tinte in jede der Patronen gefüllt wurde. Beim Befüllen mit zusätzlicher Tinte sollte unbedingt darauf geachtet werden, dass die Tinte in der Kammer nicht zu weit nach oben steigt, da die Tinte sonst möglicherweise aus dem Belüftungsloch herausfließt.



Abbildung 8: Einfüllen der leitfähigen Tinte in eine LC-229 Patrone

Tintenreste entfernen

Damit die leitfähige Tinte gute Widerstandseigenschaften aufweisen kann, ist es notwendig die normale Tinte, welche sich noch im Drucker befindet möglichst restlos zu entfernen.

Man beachte, dass neue Drucker zwar normalerweise ohne eingelegte Tintenpatronen ausgeliefert werden, trotzdem befindet sich in aller Regel schon Tinte in den Leitungen.

Zum Entfernen dieser Tintenreste wurden mehrere Seiten DIN A4 Papier ganzflächig mit Blöcken in Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz gedruckt. Zunächst wurde handelsübliches Inkjet Papier verwendet, da dies deutlich preiswerter als Foto- oder gar das Spezialpapier von Mitsubishi ist.

Wenn die gedruckten Flächen kaum noch farbig, sondern eher grau-braun aussehen, sollte glänzendes Fotopapier oder speziell für die Verwendung von leitfähiger Tinte ausgelegtes Papier verwendet werden, damit der Widerstand gemessen werden kann.

Verringern des Widerstands

Für die Widerstandsmessungen wurden 20 mm lange und 25 mm hohe Rechtecke (Abbildung 9) mit einem Brother MFC-J5320DW Tintenstrahldrucker, je 5 Lagen Mitsubishi Silber Nanopartikel Tinte NBSIJ-MU01 auf glänzendes GP-501 Fotopapier von Canon gedruckt. Die Messungen wurden bei einer Raumtemperatur von 22°C durchgeführt.

Gemessen wurde der Widerstand nach jedem Druckvorgang an den am weitesten entfernten Kanten des jeweiligen Rechtecks.

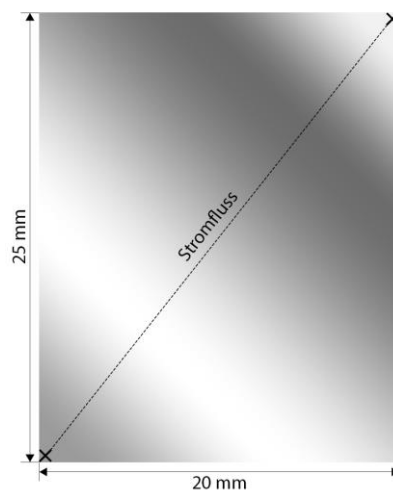


Abbildung 9: Aufbau der Widerstandsmessung

Um den Widerstand der Tinte aus den jeweiligen Patronen zu messen, wurden Rechtecke in Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz gedruckt.

Es ist zu beachten, dass sich der Widerstand nach dem Drucken noch geringfügig verringern kann. Es wurden Werte im Bereich von 1 Ω oder weniger gemessen.

Tabelle 1: Widerstandsmessung der Tinte aus den verschiedenen Patronen

Durchgang	Cyan	Magenta	Gelb	Schwarz
1	>200 M Ω	122 Ω	187 Ω	>200 M Ω
2	>200 M Ω	20 Ω	21 Ω	>200 M Ω
3	>200 M Ω	11 Ω	13 Ω	>200 M Ω
4	>200 M Ω	8 Ω	9 Ω	>200 M Ω
5	>200 M Ω	7 Ω	8 Ω	>200 M Ω

Aus den Messungen ging hervor, dass nicht alle Farbreste gleichmäßig entfernt wurden. Die ehemals Schwarz- und Cyanpatronen haben im Gegensatz zu Gelb und Magenta einen für elektrische Schaltungen ungeeignet hohen Widerstandswert. Dies kann jedoch durch weiteres Entfernen von Tintenresten speziell für diese beiden Farben behoben werden.

Bei der Widerstandsmessung der schwarzen Tinte ist ab dem 4. Durchgang kurzzeitig ein Widerstandswert im Bereich von ungefähr 9 M Ω messbar, jedoch steigt der Wert beim Trocknen der Tinte rapide an und ist nach ungefähr 20 Sekunden mit einer Skala von 20 M Ω nicht mehr messbar.

Anzahl der Druckvorgänge

Da für die meisten elektrischen Schaltungen ein möglichst geringer Widerstand erforderlich ist, reicht meist eine Lage leitfähige Tinte nicht aus, um das gewünschte Ergebnis zu erreichen. Eine Ausnahme wäre beispielsweise der Druck von Widerständen.

Wie in Tabelle 1 erkennbar, verringert sich der Widerstand kontinuierlich mit jeder Lage Tinte. Allerdings sinkt der Wert nach dem vierten Druckvorgang nur noch sehr

geringfügig, weshalb das Bedrucken mit vier Lagen Tinte das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis hat.

Wenn der bestmögliche (niedrigste) Widerstandswert erforderlich ist, können auch mehr Lagen gedruckt werden. Hier ist jedoch darauf zu achten, dass die Walzen des Druckers beim Einziehen des Papiers, Kratzer auf den Leiterflächen verursachen können (Abbildung 10). Je öfter das Papier also eingezogen wird, desto tiefer werden unter Umständen auch die Kratzer. Diese könnten sich wiederum negativ auf die Leitfähigkeit auswirken, da dort der Leiterquerschnitt vermindert wird. Falls tiefe Kratzer auf dem Papier entstehen, können diese mithilfe eines Stifts, wie beispielsweise dem Circuitry Marker von Mitsubishi oder dem Circuit Marker von AgIC ausgebessert werden.

Es konnte außerdem beobachtet werden, dass die Tinte nach fünf und mehr Lagen längere Zeit zum Trocknen benötigt. Dies ist daran zu erkennen, dass die gedruckten Flächen nicht silbern-glänzend, sondern etwas gelblich oder kupferfarben aussehen.

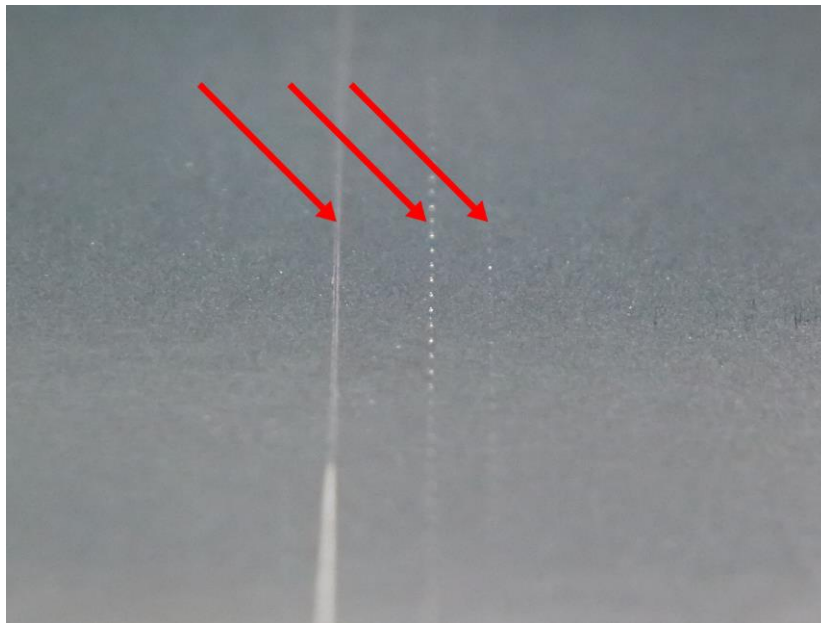


Abbildung 10: Durch Papiereinzugswalzen entstandene Kratzer

Verwendete Trägermaterialien

Um die bestmögliche Leitfähigkeit sicherzustellen wurden folgende Trägermaterialien getestet:

- Mitsubishi NB-WF-3GF100 180 g/m² (weißes PET)
- Mitsubishi NB-TP-3GU100 175 g/m² (transparentes PET)
- Mitsubishi NB-RC-3GR120 177 g/m²

- Canon GP-501 glänzendes Fotopapier 210 g/m²
- Canon MP-101 mattes Fotopapier 170 g/m²
- Inkjet Papier 80 g/m²
- Gewebeband

Bis auf das Gewebeband wurden alle Materialien mit einem Brother MFC-J5320DW Tintenstrahl-Multifunktionsdrucker bedruckt. Mit dem Gewebeband wurden alternative Materialien untersucht. Mehr dazu in dem nachfolgenden Unterkapitel.

Verwendete Leitermaterialien

Abgesehen von der Mitsubishi Silver Nano Ink „NBSIJ-MU01“ wurden auch andere leitfähige Materialien getestet, welche sich auf Papier und ähnlichen Materialien anbringen lassen.

Die Tests sollten aufzeigen, inwiefern sich die Leitfähigkeit zu der der gedruckten Leiterbahnen unterscheidet und welche Unterschiede im Allgemeinen bestehen.

Folgende Materialien wurden untersucht:

- Mitsubishi Silver Nano Ink „NBSIJ-MU01“
- Mitsubishi Silver Nano Ink aus einem Mitsubishi Circuitry Marker
- Versilberter Kupferdraht mit einem Durchmesser von 0,4 mm ohne Isolierlack
- Stainless Thin Conductive Thread - 2 ply von adafruit
- Leitfähiges Metall-Klebeband (Kupfer)

Die Mitsubishi Tinte aus dem Drucker und aus dem Stift wurden auf verschiedenen Sorten Papier und Spezialpapier getestet, wohingegen der versilberte Kupferdraht und der Conductive Thread in Spulenform auf Gewebeband angebracht wurden. Das leitfähige Metall-Klebeband wurde auf Inkjetpapier getestet, da die Oberflächenstruktur des Papiers hier keine Rolle spielt.

Form der Spule und Leiterbahnbreite

Um herauszufinden wie sich die Form der Spule und die Leiterbahnbreite auf den ausgegebenen Ton auswirkt, wurden verschiedene Muster und Formen in verschiedenen Breiten gedruckt.

Ein- und doppelseitiger Druck

Tests mit ein- und doppelseitig angebrachten Spulen wurden durchgeführt und der jeweilige Widerstand sowie die Wiedergabelautstärke und deren Qualität wurden betrachtet.

Art des Magneten

Es wurden Tests betreffend der Form, Größe und Stärke des Dauermagneten durchgeführt. Der Dauermagnet wird dazu benötigt um die Ströme, die durch die Leiterbahnen fließen in Schwingungen umzuwandeln, damit Töne entstehen.

Verwendet wurden folgende Dauermagnete:

- 5x5x5 mm Neodym-Eisen-Bor Dauermagnete (N45)
- 20x10x2 mm Neodym-Eisen-Bor Dauermagnete (N35)
- 40x50x1 mm Ferritmagnet (Haftmagnet)

Befestigung von Bauteilen

Für das Befestigen von elektronischen Bauteilen auf Papier wurden folgende Verfahren getestet:

- Verbinden mit Leitsilber
- Kleben
- Löten auf leitfähiges Metall-Klebeband (Kupfer)

3.2 Verbesserungen und Best Practices

Durch die Analyse der zum Bau des Lautsprechers benötigten Komponenten und deren Befestigung auf Papier konnten einige mögliche Verbesserungen sowie Best Practices abgeleitet werden.

Träger- und Leitermaterialien

Bedruckt wurden sechs verschiedene Arten von Papier beziehungsweise papierähnlichem Material auf PET Basis. Jedes dieser Materialien ist nur einseitig bedruckbar.

Es ist nicht möglich alle getesteten Materialien mit einem Tintenstrahldrucker zu bedrucken. Auf manchen davon weist die Mitsubishi Silver Nano Ink „NBSIJ-MU01“

einen Widerstandswert auf, welcher zu hoch ist, um damit elektronische Schaltungen herstellen zu können.

Das matte Canon MP-101 Fotopapier, sowie das Standard Inkjet Papier sind nicht dazu geeignet um darauf Leiterbahnen zu drucken. Selbst wenn mehrere Lagen leitfähige Tinte auf das Papier aufgebracht werden, ist der Widerstand nach dem Trocknen der Tinte um ein vielfaches höher als auf den anderen getesteten Papieren. Tests mit einem Mitsubishi Circuitry Marker führten zu denselben Ergebnissen wie ein Bedrucken mit dem Tintenstrahldrucker.

Das glänzende Canon GP-501 Fotopapier hingegen ist ebenso wie die speziell für den Druck mit leitfähiger Tinte entworfenen Mitsubishi Papiere, gut dazu geeignet mit der Mitsubishi Silver Nano Ink bedruckt zu werden.

Tabelle 2: Widerstandsmessung einer 80 mm x 5 mm Leiterbahn

Papier	Gemessener Widerstand in Ω
Mitsubishi NB-TP-3GU100	2,2
Mitsubishi NB-RC-3GR120	2,4
Mitsubishi NB-WF-3GF100	2,6
Canon GP-501 glänzendes Fotopapier	3,1
Canon MP-101 mattes Fotopapier	5150

Es gilt zu beachten, dass das Fotopapier zwar nicht die niedrigsten Widerstandswerte der gemessenen Papiere hat, allerdings aber im Vergleich zu den Spezialpapieren von Mitsubishi deutlich günstiger und auch einfacher zu erwerben ist.

Ein Bemalen der geeigneten Papiere mit dem Mitsubishi Circuitry Marker führte zu gleichen, beziehungsweise geringfügig besseren Ergebnissen als bei der mit dem Tintenstrahldrucker aufgebrachte Tinte. Da jedoch mit dem Tintenstrahldrucker präziser gedruckt werden kann, ist diese Methode eher zu empfehlen.

Es wurden ebenfalls Tests mit Faserband durchgeführt. Da das Bedrucken des Bandes nicht möglich war wurde es so mit leitfähigem Garn oder versilbertem Kupferdraht bestückt, dass es ebenfalls als Schwingspule genutzt werden konnte. Bei einseitig geklebten Spulen ist es möglich, diese beinahe so flach wie bedrucktes Papier anzulegen.

Die Wiedergabelautstärke der Musik ist bei leitfähigem Garn und versilbertem Kupferdraht deutlich höher als bei einer gedruckten Schwingspule und auch die entstehenden Vibrationen sind bei Berührung stärker spürbar.

Form der Spule und Leiterbahnbreite

Bei der Spule wurden unterschiedlichste Formen getestet, theoretisch ist jegliche Art von Form möglich. Einzig wichtig hierbei ist, dass es zwei Enden gibt, an die der Verstärker angeschlossen werden kann.

Die Breite der Leiterbahn wirkt sich stark auf den Widerstand der Spule aus. Bei einer 50 mm langen Leiterbahn lässt sich beispielsweise der Widerstand halbieren, wenn die Breite von 2 mm auf 4 mm erhöht wird.

Beispielsweise hat die dritte Spule auf Abbildung 11 trotz geringerem Umfang einen höheren Widerstand als die Spule rechts daneben.



Abbildung 11: Verschiedene einseitige Spulen

Der Widerstand ist einer der wichtigsten Faktoren der Spule. Je größer der Widerstand, desto leiser ist am Ende die Wiedergabelautstärke der Musik. Um den Widerstand gering zu halten, können entweder nur kurze Spulen mit sehr wenigen oder gar nur einer Windung gedruckt werden, jedoch ist hier zu beachten, dass bei zu geringem Widerstand hohe Temperaturen entstehen, welche das Papier oder das Leitermaterial entzünden können.



Abbildung 12: Spule mit geringem Widerstand

Das beste Ergebnis mit einer einseitig gedruckten Spule wurden mit der auf Abbildung 12 dargestellten Form erzielt.

Die Tests zeigten, dass sich der Widerstand mit jeder hinzugefügten Windung verringert. So wurde beispielsweise bei einer 20 mm x 25 mm Form der Widerstand von 33,1 Ω , mit einer weiteren Windung auf 26,8 Ω und mit einer dritten auf 21,3 Ω gesenkt

Ein- und Doppelseitiger Druck

Spulen können doppelseitig sein, das heißt, dass eine Spule auf der Rückseite des Trägermaterials fortgesetzt wird. Es gilt allerdings zu beachten, dass der Widerstand sich bei einer auf der Rückseite fortgesetzten Spule verdoppelt.

Eine weitere Möglichkeit ist es, eine einseitige Spule zu kopieren und diese auf Vorder- und Rückseite anzubringen. Dadurch wird der Widerstand nicht erhöht und es kann trotzdem mehr Schwingung erzeugt werden, was wiederum bedeutet, dass die Musik besser hörbar ist.

Für die Versuche mit einer auf der Rückseite fortgesetzten Spule wurde das Trägermaterial in der Mitte der Spule durchbrochen und eine gespiegelte und um 180° gedrehte Spule wurde auf der Rückseite angebracht (Abbildung 13). Beim Durchbrechen des Trägermaterials sollte darauf geachtet werden, dass die Ränder nicht ausfransen. Gute Ergebnisse lassen sich hier mit einem Bohrer oder mit einem Lochstanzer erzielen.

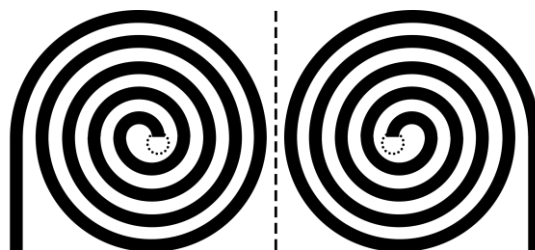


Abbildung 13: Doppelseitige Spule mit Papierdurchbruch in der Mitte

Ungeeignet sind beispielsweise Nägel oder Nadeln, da das Material an der Durchbruchstelle nicht abgetragen wird und sich auf der Rückseite nach außen wölbt. Die Wölbung wiederum erschwert ein flaches Anbringen der Rückseite ebenso wie ein Durchführen und Befestigen eines Verbindungsstücks.

Es war im Zuge der Tests nicht möglich Trägermaterialien doppelseitig zu bedrucken, da alle verwendeten Materialien nur eine zu bedruckende Seite hatten und da die Tinte auf der Rückseite nicht sinterte und verschmiert wurde wie auf Abbildung 14 erkennbar ist.

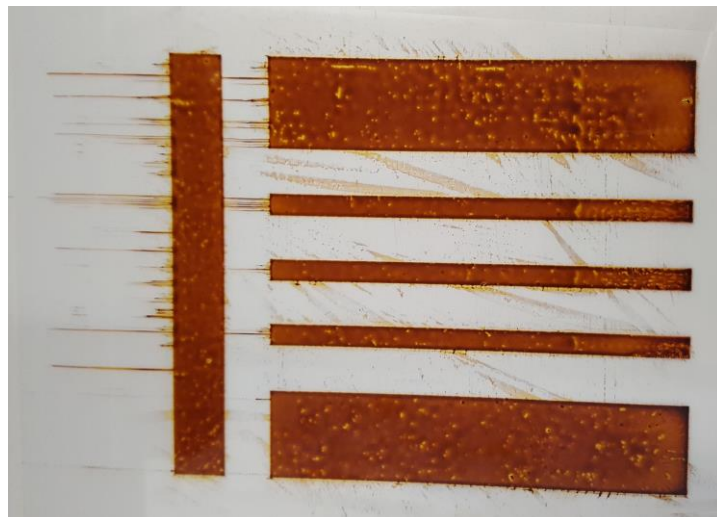


Abbildung 14: Drucken auf der Rückseite von Mitsubishi NB-TP-3GU100 175 g/m² (transparentes PET)

Um beide Seiten miteinander zu verbinden, kann beispielsweise Kabellitze oder ein Draht geführt werden, welche auf beiden Seiten mit leitfähigem Metall-Klebeband an der Spule befestigt werden. Bei besonders kleinen Löchern mit beispielsweise einem Durchmesser von ≤ 1 mm ist es auch möglich Leitsilber oder leitfähige Tinte zum Verbinden der beiden Seiten zu verwenden. Hier müssen die beiden Seiten allerdings sehr flach miteinander verbunden sein und sollten möglichst verklebt werden, da die Flüssigkeiten schlechte Klebeeigenschaften besitzen und sich bei Deformation des Papiers wieder lösen könnten.

Bei einer doppelseitig gedruckten Spule mit je 4 Windungen pro Seite und einer Bahnbreite von 4 mm betrug der gemessene Widerstand pro Seite ungefähr 20 Ω und addiert sich somit auf 40 Ω für die gesamte Spule. Die Musik war bedingt durch diesen hohen Widerstand nur sehr leise wahrnehmbar.

Für gedruckte Spulen wird daher empfohlen einseitig, statt doppelseitig zu drucken. Wenn andere Materialien mit geringerem Widerstand verwendet werden wie beispielsweise Conductive Thread oder Kupferdraht, werden mit doppelseitigen Spulen teilweise bessere Ergebnisse erzielt als mit einseitigen.

Art des Magneten

Zur Analyse der Magnete wurden verschiedene einseitige Spulen an einen Verstärker angeschlossen und Musik abgespielt. Um zu testen welche Art und Form zu den besten Ergebnissen, hinsichtlich Lautstärke und Wiedergabequalität führt wurden die verschiedenen Magnete in Wechselwirkung mit den Spulen betrachtet.

Magnete mit einer großen Fläche sind besser dazu geeignet die Spule zu magnetisieren als kleinflächige Magnete. Die Stärke des Magneten ist aber ein weit bedeutenderer Faktor. Die getesteten 5x5x5 mm Neodym-Eisen-Bor Magnete (N45) eigneten sich beispielsweise gut zur Verwendung mit der Spule, wohingegen ein 40x50x1 mm Ferritmagnet kaum wahrnehmbare Töne erzeugt hat.

Die besten Ergebnisse konnten mit mehreren, miteinander verbundenen 20x10x2 mm Neodym-Eisen-Bor Magneten (N35) erzielt werden. Die Magnete wurden jeweils an den am stärksten magnetisierten Polen miteinander verbunden. Ein seitliches Verbinden schwächt das Magnetfeld ab und erzielt so einen nachteiligen Effekt.

Befestigung der Bauteile

Zum Befestigen von elektronischen Bauteilen wurden verschiedene Verfahren getestet, welche sich hinsichtlich unterschiedlicher Vor- und Nachteile besser oder schlechter für spezielle Bereiche eignen.

Für die Tests wurden sowohl kleine SMD (Surface-mounted device) Bauteile, als auch etwas größer dimensionierte THT (Through Hole Technology) Bauteile verwendet. THT-Bauteile sind zur Durchsteckmontage vorgesehen, das heißt, dass sie Drahtanschlüsse haben. Normalerweise werden die Bauteile auf einer Platine platziert und die Drahtanschlüsse durch Löcher an die Unterseite geführt, wo sie dann mit Lötzinn an der Platine befestigt werden.

Der Vorteil der THT-Bauteile besteht darin, dass die Drahtanschlüsse direkt auf gedruckten Leiterbahnen befestigt und beispielsweise mit Klebeband oder einem anderen nicht leitfähigen Material fixiert werden können.

Es besteht außerdem die Möglichkeit leitfähiges Metall-Klebeband zu verwenden. Theoretisch ist also keine direkte Verbindung zwischen Drahtanschluss und Leiterbahn notwendig, da das Klebeband ebenfalls leitfähig ist.

In den Tests fiel jedoch auf, dass es durch den an der Unterseite des leitfähigen Metall-Klebebands befindlichen Klebstoff zu einer ungewollten Isolierung kommen kann, weshalb Bauteile nicht richtig kontaktiert werden können.

Eine Möglichkeit dieses Problem zu beseitigen ist es, den Klebstoff an der Unterseite des Bandes an der Verbindungsstelle zu entfernen. Hierzu können beispielsweise mit Alkohol oder Nagellackentferner benetzte Wattestäbchen verwendet werden. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass die Ränder des verwendeten Klebestreifens noch genügend Klebstoff haben, damit sich der Streifen nicht löst.

Die beste aus den Versuchen hervorgegangene Methode, THT-Bauteile mit Klebeband zu befestigen ist es, zuerst den Klebstoff des Bandes an der Kontaktstelle zu entfernen. Anschließend wird die Stelle auf der Leiterbahn, an der das Bauteil befestigt werden soll mit Leitsilber benetzt. Das Bauteil wird dann auf dem Leitsilber platziert und das Klebeband wird darauf befestigt. Das Leitsilber sorgt nach dem Trocknen auch zusätzlich noch dafür, dass die Verbindungsstelle zwischen Klebeband und Drahtanschluss, beziehungsweise zwischen Drahtanschluss und Leiterbahn, vergrößert ist und somit die Wahrscheinlichkeit für eine Unterbrechung bei Bewegung des Bauteils verringert wird.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin Bauteile mithilfe von Lötzinn an dem Kupferband zu befestigen. Hier eignet sich Lötzinn mit einer Zinn-, Blei- und Kupferlegierung besser als bleifreies Lötzinn, da mit niedrigeren Temperaturen gelötet werden kann. Ebenfalls konnten bei den Versuchen mit den verschiedenen Lotlegierungen, vor allem mit dem bleihaltigen Lötzinn bessere Lötstellen produziert werden (siehe Abbildung 15).

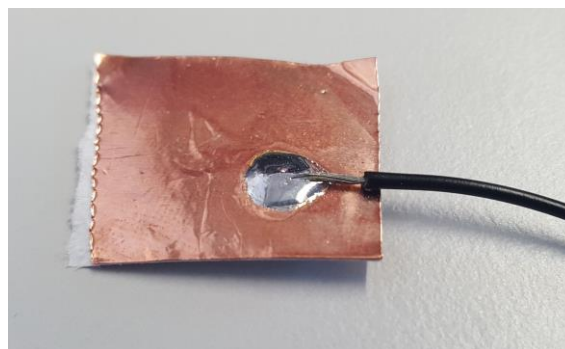


Abbildung 15: Lötstelle auf Kupferband

Die Bauteile sollten, vor dem Aufkleben des Bandes auf das Papier angelötet werden. Wenn das Kupferband bereits auf dem Papier, beziehungsweise auf der gedruckten Leiterbahn befestigt ist, kann sich das Papier durch das Lötten entzünden oder die Leiterbahn könnte beschädigt werden.

SMD-Bauteile können ebenfalls mithilfe von Lötzinn auf Kupferband befestigt und anschließend an den gedruckten Leiterbahnen angebracht werden.

Es wurden auch Versuche mit reinem Leitsilber durchgeführt (Abbildung 16). In den meisten Fällen kam es allerdings dazu, dass durch die Kapillarität des Leitsilbers, die gesamte Unterseite des SMD-Bauteils benetzt wurde, was wiederum zu einem Kurzschluss führt, sobald das Bauteil mit Strom versorgt wird.

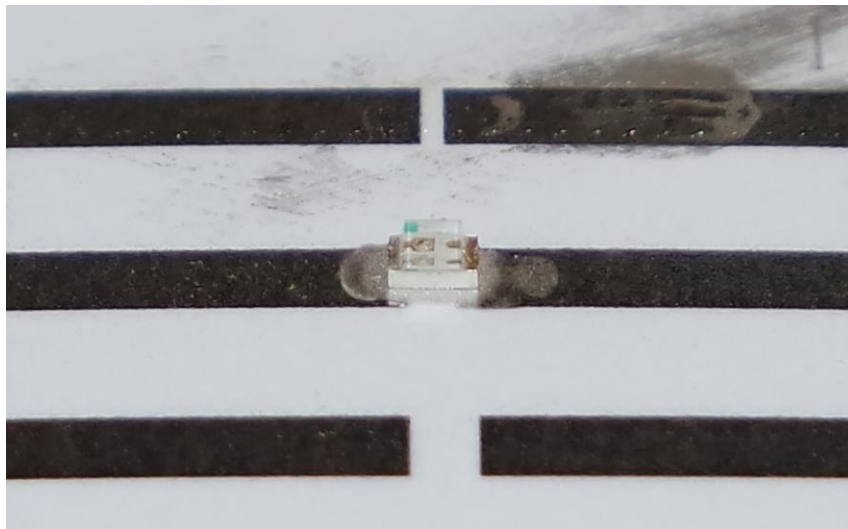


Abbildung 16: Mit Leitsilber befestigte SMD-LED

Vor Inbetriebnahme des Bauteils sollte daher immer vorab der Widerstand gemessen werden um Schäden, die durch einen Kurzschluss entstehen könnten, vorzubeugen.

Die Hafteigenschaft des Leitsilbers ist für SMD-Bauteile ausreichend hoch, sofern weder das Bauteil, noch der Träger nach der vollständigen Trocknung starken Vibrationen oder anderen Krafteinwirkungen ausgesetzt werden. Hier sollte also unbedingt bereits im Voraus klar sein inwiefern sich diese Methode für das final zu realisierende Produkt eignet oder ob nicht eine stabilere Befestigung nötig ist.

Ein Aufkleben von SMD-Bauteilen mit herkömmlichem Klebeband ist, vorausgesetzt, dass es sich dabei nicht um LEDs handelt, auch bedingt möglich. Es muss allerdings

sichergestellt werden, dass diese sehr genau fixiert werden, damit sich die kleinen Kontaktflächen nicht von der Leiterbahn bewegen. Eine Kombination aus Klebeband und Leitsilber ist daher besser geeignet.

Art der Bauteile

Um den Lautsprecher und den Verstärker flacher zu gestalten, wäre es möglich, SMD- statt THT-Bauteile zu verwenden.

Außerdem könnte die 9 V Blockbatterie durch CR2032 Knopfzellen ausgetauscht werden. Wenn beispielsweise 9 V erforderlich sind, können drei CR2032 Knopfzellen mit einer Spannung von jeweils 3 V, in Reihe geschaltet werden um die benötigte Spannung zu erreichen.

Drucken von Leiterbahnen

Die Leitfähigkeit wird durch Tintenreste im Drucker deutlich verschlechtert. Daher sollten die Leitungen des Druckers bestmöglich von der alten Tinte befreit werden bevor Leiterbahnen gedruckt werden.

Wenn alle Farbleitungen gleichermaßen gut gereinigt sind, bietet es sich an die Leiterbahnen in der Farbe Schwarz anzulegen und diese dann im Fotomodus zu drucken, da der Drucker hier nicht nur mit der schwarzen Tinte druckt, sondern das Schwarz mit Tinte aus allen Patronen mischt. Leider konnte dies nicht überprüft werden, da es nicht möglich war die Cyan- und die Schwarzleitungen gleichermaßen von Tintenresten zu befreien wie die Magenta- und Gelbleitungen.

Um einen niedrigeren Widerstand zu erreichen können mehrere Lagen übereinander gedruckt werden. Hierbei sollte unbedingt darauf geachtet werden, dass das Papier erst wieder in den Drucker eingelegt wird, wenn die Tinte vollständig getrocknet ist. Nach mehreren gedruckten Lagen kann dies erfahrungsgemäß jedoch deutlich länger dauern als bei der ersten Lage.

Bei den Tests mit mehrlagigem Druck wurde beobachtet, dass die Papiereinzugswalzen des Druckers das Papier beziehungsweise die bereits gedruckten Leiterbahnen zerkratzen können. Sicherheitshalber sollte der Widerstand über diesen Kratzer gemessen werden und falls dieser erhöht wurde, kann der verringerte Querschnitt mithilfe eines mit leitfähiger Tinte befüllten Stifts, wie beispielsweise einem Mitsubishi Circuitry Marker, ausgebessert werden.

3.3 Ausblick

Die flache Form der Lautsprecherspule in Kombination mit flachen SMD-Bauteilen macht es möglich, Printmedien mit Lautsprechern zu bestücken, die gewisse Melodien oder Musikstücke abspielen, wenn der Leser einer Zeitschrift eine gewisse Seite aufschlägt. Dies würde zum einen dazu dienen, Printmedien etwas interaktiver zu gestalten und könnte zum anderen gut von Werbetreibenden eingesetzt werden um einen „WOW-Effekt“ zu erzielen.

Ebenfalls begünstigt die flache Produzierbarkeit einen unsichtbaren Einsatz in Möbelstücken oder auf, beziehungsweise unter Tapeten.

Die Lautsprecherspulen könnten ebenfalls direkt auf glatten und trockenen Flächen gedruckt werden, statt Papier oder Kunststoff als Trägermaterial zu verwenden und dieses dann auf dem eigentlichen Gegenstand anzubringen.

Da die gedruckten Lautsprecherspulen nicht die Qualität eines herkömmlichen Lautsprechers erreichen, ist die Anwendung in einem Home Entertainment System eher unwahrscheinlich, jedoch könnten sie für Hinweistöne oder Warnmeldungen genutzt werden.

Es wäre ebenfalls möglich die Spulen direkt in Kopfbekleidung oder Helme zu drucken, da die geringe zu erzielende Lautstärke eher für Ohr nahes Abspielen von Musik geeignet ist als für weit vom Hörer entfernte Lautsprecher.

4 Gedruckte kapazitive Lichtsteuerung

4.1 Problemstellung

Herkömmliche Lichtsteuerungen wie Schalter oder Dimmer folgen einem bereits bestehenden Paradigma, welches sich seit geraumer Zeit nicht mehr großartig verändert hat. Durch technologische Fortschritte sind jedoch andere, dezentere Möglichkeiten vorhanden, um Geräte zu steuern. Ein Wandel ist unter anderem im Bereich der Mobiltelefone erkennbar, wo bereits ein Paradigmenwechsel stattgefunden hat. Hier setzen sich mehr und mehr Geräte durch, die mit einem Touchscreen, statt der noch bis vor kurzem als unentbehrlich angesehenen Hardware Tastatur ausgestattet sind.

Um im Bereich Wohnen neue Interaktionsmöglichkeiten aufzuzeigen, wird im vorliegenden Kapitel eine Lichtsteuerung vorgestellt, welche unsichtbar unter der Tapete oder in Möbelstücken auf Berührungen reagiert und das Licht steuert, ohne dass ein Hardware Schalter oder Dimmer benutzt werden muss.

4.2 Zielsetzung

Die Herausforderung gilt einer innovativen Weiterentwicklung und Modernisierung der Lichtsteuerung in Wohnräumen. In diesem Bereich haben sich beispielsweise im Gegensatz zur IT- oder Automobilindustrie, seit Langem keine wesentlichen Neuerungen mehr durchgesetzt. PKW werden über Funk ver- und entriegelt und Kofferräume öffnen sich selbstständig, wenn sich der Fahrer nähert. In Wohnungen hingegen sind weiterhin klassische Schalter nötig um das Licht ein- oder auszuschalten. Bei Lichtsteuerungen sollte daher „Altbewährtes“ überdacht werden, um den technischen Fortschritt in diesem Bereich auch in privaten Räumen einziehen zu lassen.

Die Umsetzung eines solchen Systems adressiert folgende Herausforderungen:

- Durch das Drucken von Sensoren für eine kapazitive Lichtsteuerung ist es möglich, die Sensoren besonders flach und auch flexibel zu produzieren. Dies lässt zu, dass sie besonders gut in Wohnräume oder Möbelstücke eingefügt werden können.
- In diesem Projekt wird die Lichtsteuerung unter einer Vliestapete angebracht. Die elektronischen Bauteile und der Mikrocontroller in der Schalterdose darunter.

- Das zu steuernde Leuchtmittel wird über eine externe Spannungsquelle angeschlossen und der Stromkreis des Mikrocontrollers arbeitet aus Sicherheitsgründen unabhängig von jener.
- Es soll möglich sein, das Leuchtmittel auch mit höheren Spannungen, als der des Mikrocontrollers betrieben werden.
- Aus Gründen der Sicherheit wird das Leuchtmittel in dem Projekt mit einer Gleichspannung von 12 V betrieben, es soll aber auch möglich sein, diese bei Bedarf durch eine beliebig höhere Spannung auszutauschen.
- Die Steuerung wird mit Hilfe eines Arduinos erfolgen.
- Das Dimmen des Lichts wird mittels fünf gedruckten Leiterbahnen, die als kapazitive Sensoren fungieren, realisiert. Der Wechsel zwischen den Helligkeitsschritten wird möglichst stufenlos und nicht abrupt gestaltet. Dabei wird der erste Sensor das Licht ausschalten, der letzte Sensor auf eine hundertprozentige Helligkeit regeln und die Sensoren dazwischen von links nach rechts jeweils in 25% Schritten die Helligkeit heraufsetzen.
- Das Dimmen wird, anders als bei handelsüblichen 230V Unterputz-Dimmern, mithilfe von Pulsweitenmodulation (PWM) realisiert, da dies effizienter ist, als ein Dimmen mithilfe eines Potentiometers, bei dem der reduzierte Strom in Wärme umgewandelt wird.

4.3 Anleitung

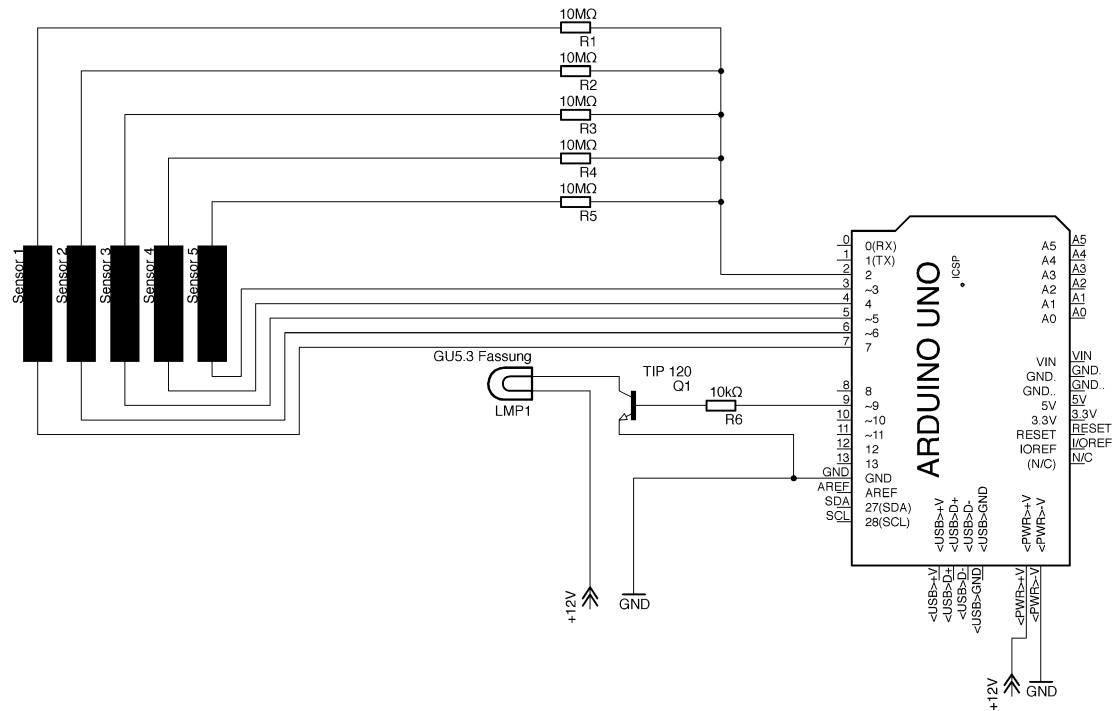


Abbildung 17: Schaltplan der Lichtsteuerung

4.3.1 Bauteile und Materialien

Der vollständige Code dieses Projekts wird unter folgendem Link zur Verfügung gestellt <https://github.com/informatik-mannheim/thesis-printed-circuits>.

Folgende Bauteile und Materialien wurden für den Bau der kapazitiven Lichtsteuerung verwendet:

- Bipolartransistor TIP120
- 5x Kohleschichtwiderstand 10 MΩ
- Kohleschichtwiderstand 1 kΩ
- Leuchtmittel
 - GU5.3 Halogen Leuchtmittel 20 W
 - GU5.3 LED Leuchtmittel (dimmbare) 4 W
- Lampenfassung GU5.3 12 V
- Arduino UNO
- Brother MFC-J5320DW Tintenstrahl-Multifunktionsdrucker

- Mitsubishi Silver Nano Ink „NBSIJ-MU01“
- Mitsubishi NB-TP-3GU100 175 g/m² (transparentes PET)
- LC-229 und LC-225 Fill-In-Patronen mit ARC
- Schaltlitze (z.B. 0,14 mm²)
- Leitfähiges Metall-Klebeband (Kupfer)
- 12 V Netzteil (Leistung des Netzteils nach Leistung des Leuchtmittels wählen)
- Niedervolt-Steckverbinder Buchse passend für das gewählte Netzteil
- Leitsilber
- Hohlwand-Schalterdose
- Federdeckel
- Vliestapete
- Kleister für Vliestapeten
- Sperrholzplatten als Wand-Ersatz

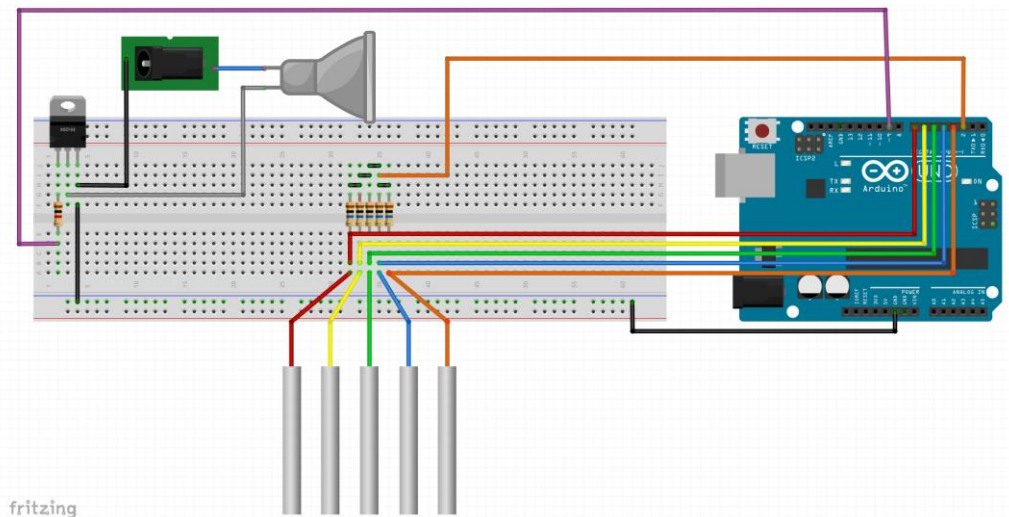


Abbildung 18: Fritzing Bauanleitung

4.3.2 Drucken der Sensoren

Wie in Kapitel 3 beschrieben, sollte der Drucker bevor damit gedruckt wird, bestmöglich von Tintenresten befreit worden sein.

Als Trägermaterial wird Mitsubishi NB-TP-3GU100 175 g/m² (transparentes PET) verwendet, da es in den Versuchen den geringsten Widerstand aufwies, sehr flexibel ist

und im Gegensatz zu Papier auch nicht hydrophil ist. Die hydrophoben Eigenschaften des PET können bei der Anbringung unter einer Tapete von Vorteil sein, da es sich bei feuchtem Raumklima nicht mit Wasser vollsaugt.

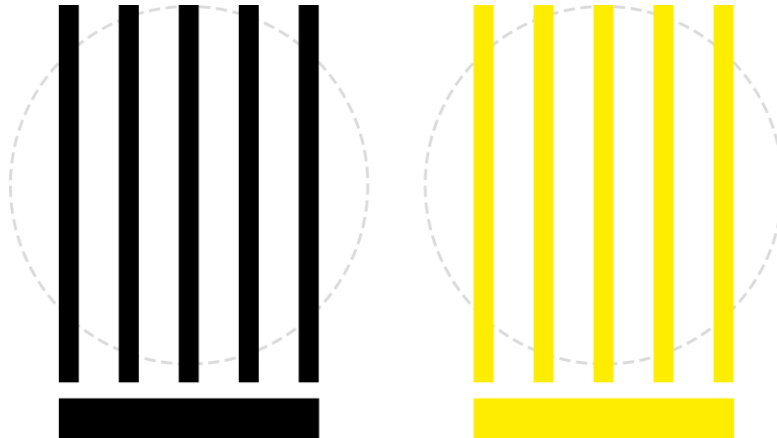


Abbildung 19: Vorlage für die Sensoren auf einem Federdeckel

Die zu wählende Farbe ist abhängig von den jeweils gemessenen Widerstandswerten der einzelnen Farben. Da in den Versuchen, die in diesem Projekt durchgeführt wurden, bei Gelb und Magenta die niedrigsten Widerstandswerte gemessen wurde, wurde die Leiterbahn-Druckvorlage in Gelb gestaltet.

Die kapazitiven Sensorstreifen sind jeweils 5 mm breit und in der Höhe an den verwendeten Federdeckel angepasst. Der Federdeckel ist, an den äußeren Kanten gemessen, ungefähr 90 mm hoch. Die mittlere Linie sollte deshalb also auch mindestens so hoch sein. Die Bahnen dürfen ruhig etwas überstehen, da das PET Blatt beim Aufbringen sowieso auf Maß zugeschnitten wird. Die Kanten der einzelnen Sensorstreifen sind jeweils 10 mm voneinander entfernt.

Es spricht nichts dagegen, andere Maße, als die hier beschriebenen zu verwenden. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass die Sensoren nicht zu dicht beieinander liegen, da ansonsten die ausgelesenen Daten nur schwer dazu verwendet werden können, das Licht zu dimmen.

4.3.3 Anfertigung der kapazitiven Lichtsteuerung

Die gedruckten Sensoren wurden mit doppelseitigem Klebeband auf dem Federdeckel befestigt, um ein nachträgliches Verschieben zu verhindern. Die etwas länger als die Federdose bemessenen Sensoren werden gefaltet und auf der Unterseite des Federdeckels befestigt.

Da zwischen den Sensorstreifen und dem Senden Pin des Arduinos $10\text{ M}\Omega$ Kohleschichtwiderstände notwendig sind, wurden diese auf leitfähiges Metall-Klebeband gelötet (siehe Abbildung 20). Die Klebeflächen werden anschließend auf Sensorstreifen und auf die Verbindungslinie (siehe Abbildung 19) des Ausdrucks geklebt. Um zu gewährleisten, dass eine Verbindung zwischen beiden Flächen besteht, sollte der Widerstand auf beiden Leiterbahnen gemessen werden. Falls der Klebstoff des Metall-Klebebands zu stark isoliert, empfiehlt es sich den Klebstoff stellenweise zu entfernen und durch Leitsilber zu ersetzen.



Abbildung 20: Auf leitfähiges Metall-Klebeband gelöteter Kohleschichtwiderstand

Die Kabel werden auf dieselbe Art an der Gegenseite der Sensoren angebracht, unter dem Federdeckel in die Hohlwand-Schalterdose geführt (Abbildung 21) und mit dem Arduino verbunden. Das Kabel mit dem $10\text{ M}\Omega$ Vorwiderstand wird an den Send Pin, also Pin 2, die restlichen Kabel an die jeweiligen Receive Pins, also Pin 3,4,5,6 und 7 angeschlossen.

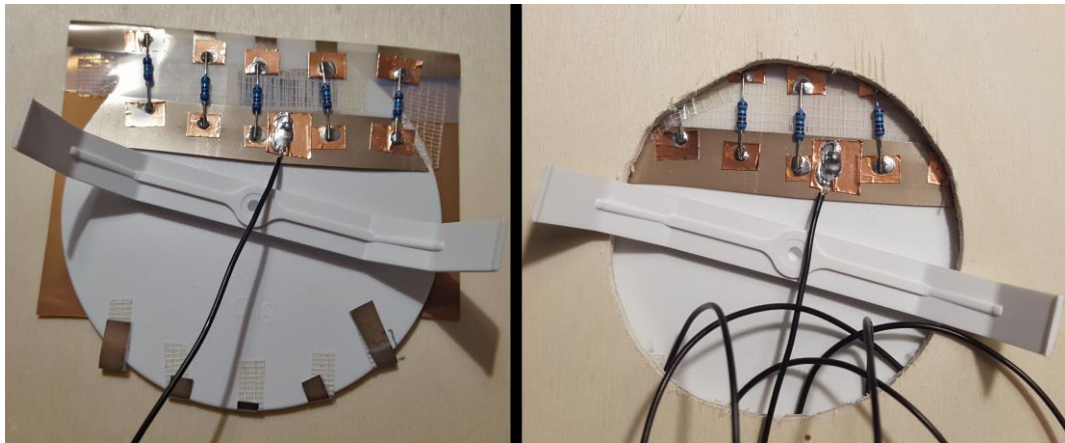


Abbildung 21: Verbinden der Kabel und Widerstände mit den Sensoren

Wenn die Verbindungen der Sensoren zum Arduino mittels Widerstandsmessung geprüft wurden, kann die Tapete darauf angebracht werden.

Beim Anbringen der Tapete muss unbedingt darauf geachtet werden, dass kein Kleister auf die Sensoren aufgetragen wird, da diese sonst nicht mehr funktionieren.

Nun ist bereits eine Lichtsteuerung mit einfachen LEDs möglich, um aber leistungstärkere Lampen steuern zu können, ist ein entsprechendes Netzteil und ein Transistor notwendig.

Für dieses Projekt wurde ein 12 V Netzteil und ein TIP120 Bipolartransistor verwendet. Die Lichtsteuerung könnte auch mit 230 V Wechselspannung betrieben werden, wenn entsprechende Bauteile verwendet und Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden.

Es ist zwar möglich die Transistorschaltung auf gedruckten Leiterbahnen anzubringen, jedoch wurden diese bei den Tests sehr warm. Bei einem dauerhaften Einsatz könnte daher Brandgefahr bestehen. Deshalb wurde die Schaltung sicherheitshalber auf einer Lochrasterplatine umgesetzt. Welche Bauteile verwendet wurden und wie diese mit dem Arduino verbunden werden müssen, kann dem Schaltplan (Abbildung 17) oder der Bauanleitung (Abbildung 18) entnommen werden.

4.3.4 Kalibrieren der Werte

Zur Kalibrierung des kapazitiven Dimmers kann der Arduino Sketch „Sensor_Kalibrierung“ verwendet werden. Mithilfe des seriellen Plotters werden die erzeugten Sensordaten grafisch dargestellt und die Schwellenwerte können an der Skala abgelesen werden. Die Kalibrierung der Werte sollte unter den endgültigen Bedingungen stattfinden, da sich die zurückgegebenen Sensordaten stark verändern, wenn beispielsweise

ein anderes oder dickeres Material zum Bedecken der Sensoren verwendet wird. Falls die Sensoren wie in diesem Projekt mit Tapete bedeckt werden sollen, ist es also ratsam die Tests mit der endgültig zu verwendenden Tapete durchzuführen, statt auf andere Materialien auszuweichen.

Bei diesem Projekt wurde die CapacitiveSensor Bibliothek [1] von Paul Badger verwendet.

```
long wert_sensor1 = kapazitiver_sensor1.capacitiveSensor(aufloesung);
long wert_sensor2 = kapazitiver_sensor2.capacitiveSensor(aufloesung);
long wert_sensor3 = kapazitiver_sensor3.capacitiveSensor(aufloesung);
long wert_sensor4 = kapazitiver_sensor4.capacitiveSensor(aufloesung);
long wert_sensor5 = kapazitiver_sensor5.capacitiveSensor(aufloesung);

// Ausgabe der Sensorwerte
Serial.print(wert_sensor1); Serial.print(",");
Serial.print(wert_sensor2); Serial.print(",");
Serial.print(wert_sensor3); Serial.print(",");
Serial.print(wert_sensor4); Serial.print(",");
Serial.println(wert_sensor5);
```

Listing 1: Auszug aus Arduino Sketch „Sensor_Kalibrierung“

Falls auf dem seriellen Plotter gleichbleibende Linien mit einem gewissen Wert angezeigt werden sollen, kann dies mit Hilfe einer konstanten Zahl realisiert werden. Um beispielsweise eine Linie dem Wert 500 dauerhaft einzublenden, kann Folgendes geschrieben werden.

```
Serial.print("500 ");
```

Listing 2: Permanentes Darstellen einer Linie in Arduinos seriellen Plotter

Die korrekte Verwendung der print beziehungsweise der println Funktion ist hier wichtig. Sobald mit einem println ein neuer Absatz beginnt, wird die nächste Zahl als neuer Wert des aktuellen Graphen betrachtet.

Um mehrere Graphen oder Linien gleichzeitig anzuzeigen, müssen alle Werte in einer Zeile stehen und mit Kommata, Leerzeichen oder „\t“ voneinander getrennt sein (siehe Listing 1).

Wenn sich die Sensoren unter einer Vliestapete befinden und eine Auflösung von 10000 gewählt wird, entsteht bei einem Wischen von links nach rechts über alle Sensoren eine Ausgabe, ähnlich der in Abbildung 22 dargestellten.

Der zu wählende Schwellenwert sollte maximal so groß sein wie der höchste Punkt der niedrigsten Kurve. Bei der auf Abbildung 22 dargestellten Messung, erzeugte beispielsweise Sensor 3 den niedrigsten Ausschlag.

Wenn der gewählte Schwellenwert zu niedrig ist, kann es dazu kommen, dass bei Berührung eines Sensors die nebenliegenden Sensoren ebenfalls ausgelöst werden.

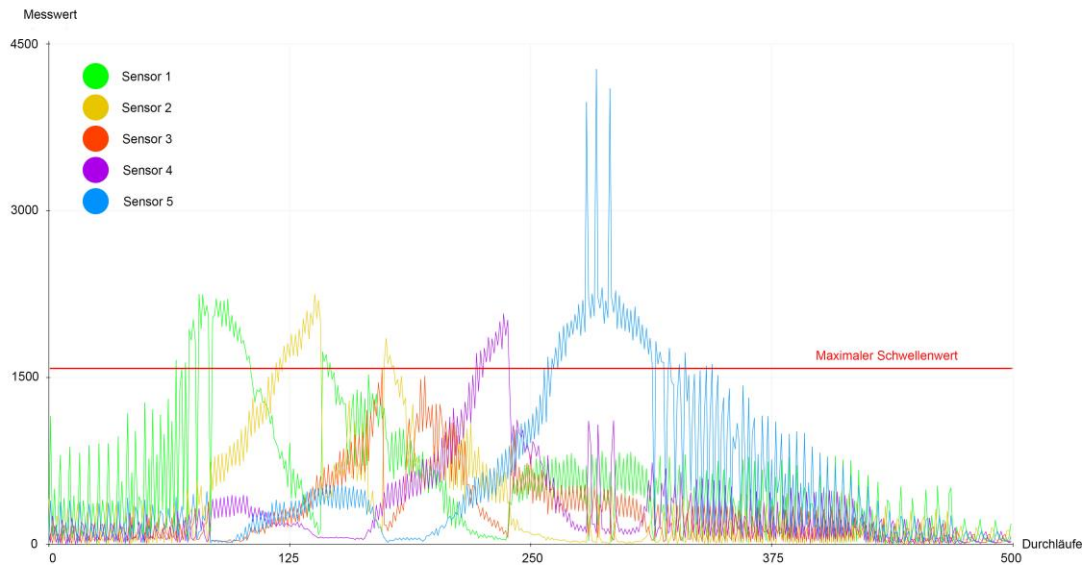


Abbildung 22: Herauslesen des maximalen Schwellenwerts

Falls sich die zurückgegebenen Daten der einzelnen Sensoren stark unterscheiden, ist es ebenfalls möglich verschiedene Schwellenwerte zu verwenden. Dieses Phänomen kann bei unebenen oder ungleichmäßig verarbeiteten Materialien auftreten.

Beim Auslesen der Sensordaten kann beobachtet werden, dass die Sensoren bereits Werte zurückgeben bevor man den Sensor berührt oder sich annähert (siehe Abbildung 23). Dieses Rauschen wird verstärkt oder vermindert, wenn die Auflösung des Sensors herauf- beziehungsweise herabgesetzt wird.

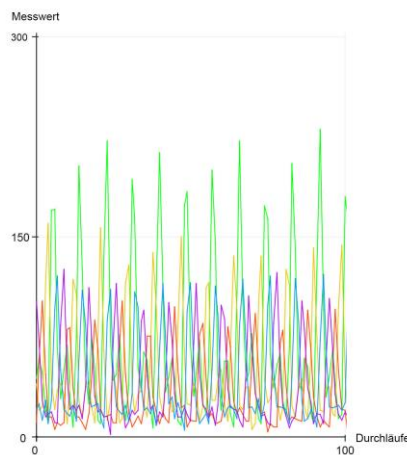


Abbildung 23: Schwankungen der Sensordaten ohne eine Eingabe

Es sollte stets darauf geachtet werden, das auf- und abschwanken der Werte in dem abgelesenen Bereich mit einzukalkulieren, wenn der Schwellenwert gewählt wird.

4.3.5 Unterschiede beim Betrieb von Halogen- und LED Leuchtmitteln

Bei diesem Projekt wurden eine GU5.3 Fassung und damit kompatible Leuchtmittel verwendet. Um das Projekt möglichst energieeffizient zu gestalten, wurde zunächst ein Spot mit LEDs anstatt eines Halogen-Spots verwendet. Bei LED Leuchtmitteln muss besonders darauf geachtet werden, dass diese dimmbar sind, da das Projekt ansonsten nicht umsetzbar ist.

Bei dem LED-Spot trat das Phänomen auf, dass das Herunterregeln mittels PWM nicht zu einer gleichmäßigen Erhöhung oder Herabsetzung der Helligkeit geführt hat. Ebenfalls erhellte der LED-Spot beim Heraufregeln von 0% auf 1% stark und wurde dann wieder schwächer. Ein lineares Dimmen zwischen 0% - 100% war auch deshalb nicht möglich, weil ab einer gewissen Helligkeitsstufe beziehungsweise eines gewissen PWM Pegels kein Helligkeitsunterschied mehr auszumachen war. Bei einer 8-Bit Auflösung, also mit einer Skala von 0 - 255 war das LED Leuchtmittel bei Werten zwischen 100 - 255 gleich hell. Die Skala und die verschiedenen Stufen des Dimmens wurden deshalb für das LED Leuchtmittel angepasst.

Da ein komplettes Abschalten des Leuchtmittels aufgrund des kurzzeitigen Aufhellens nicht möglich war, wurde die Lampe auf den PWM Wert 1 heruntergeregelt anstatt sie komplett auszuschalten. Für die maximale Helligkeit wurde ein PWM Pegel von 100 statt der üblichen 255 gewählt weil, wie oben erwähnt, Werte oberhalb von 100 keine Helligkeitserhöhung bewirken.

Das Helligkeitsspektrum wurde durch vier geteilt, da vier Sensoren zum Dimmen und einer zum Ausschalten des Lichts dienten. Bei einer Skala von 0 - 100, wie beim LED-Spot, wurde die Helligkeit in 25er Schritten geregelt.

Aufgrund der oben beschriebenen Anomalien des LED-Spots wurde stattdessen ein regulärer Halogen-Spot verwendet. Hier konnte die Helligkeitsregelung mit einer Skala von 0 - 255 betrieben werden, ohne dass Phänomene wie bei dem LED Leuchtmittel entstanden. Die Helligkeit des Halogen-Spots wurde in 64er Schritten geregelt.

Damit das Herauf- beziehungsweise Herabregeln der Helligkeit stufenlos und nicht abrupt erscheint, wurde eine Funktion geschrieben, die mithilfe einer Schleife den PWM Pegel in dem gewählten Bereich erhöht oder vermindert. Nach jedem Schleifendurchlauf findet eine Verzögerung statt, die in Millisekunden angegeben wird. Je länger die

gewählte Verzögerung andauert, desto langsamer erhellt oder verdunkelt sich das Leuchtmittel.

Die Länge der Verzögerung sollte mit der gewählten Skala abgeglichen werden. Für das Halogen Leuchtmittel mit einer Skala von 0 - 255 wurde eine Verzögerung von 5 ms pro Schleifendurchlauf, beim LED-Spot, aufgrund der geringeren Skala, eine Verzögerung von 10 ms gewählt.

5 Schlussbetrachtung

Zusammenfassung

In dieser Thesis wurde gezeigt, welche Schritte durchgeführt werden müssen, um gedruckte Leiterbahnen und Schaltungen produzieren zu können. Dafür wurden bereits bestehende Projekte betrachtet und eines genauer analysiert und nachgebaut. Des Weiteren wurde eine Lichtsteuerung umgesetzt, welche mit Hilfe von gedruckten, kapazitiven Sensoren, Berührungen durch eine Tapete hindurch erkennt und daraufhin ein Leuchtmittel steuert. Hierbei wurden einzelne Faktoren hinsichtlich der Beschaffenheit der Leiterbahnen und mögliche Arten, Bauteile an diesen zu befestigen genauer betrachtet, um Best Practices abzuleiten.

Übersicht der Best Practices

1. Beim Befüllen der Patronen sollte ein Spritzenvorsatzfilter verwendet werden.
2. Wenn der Drucker die Fill-In-Patronen nicht auf Anhieb erkennt, kann es helfen etwas mehr Tinte einzufüllen als vom Hersteller der Patronen angegeben wurde.
3. Das Drucken von vier Lagen Tinte hat das beste Kosten/Nutzen Verhältnis.
4. Mattes Canon MP-101 Fotopapier, sowie Standard Inkjet Papier sind nicht dazu geeignet, Leiterbahnen darauf zu drucken.
5. Glänzendes Canon GP-501 Fotopapier eignet sich ebenso wie Spezialpapier zum Drucken von Leiterbahnen.
6. Die Breite der Leiterbahnen wirkt sich stark auf den Widerstand aus. Je breiter die Bahn, desto geringer der Widerstand.
7. Starke Neodym-Bor-Eisen Magnete eignen sich am besten dazu, gedruckte Lautsprecherspulen zu magnetisieren.
8. Die Kombination von leitfähigem Metall-Klebeband und Leitsilber eignet sich gut dazu, Kabel und Bauteile an gedruckten Leiterbahnen zu befestigen.
9. Bauteile und Kabel können durch Löten an Metall-Klebeband (Kupfer) befestigt werden. Bleihaltiges Lötzinn ist dazu besser geeignet als bleifreies.
10. SMD-Bauteile können mit Leitsilber an gedruckten Leiterbahnen befestigt werden.

11. Wenn die Tinte aus allen Patronen Leiterbahnen mit geringem Widerstand produziert, sollten Leiterbahnen in der Farbe Schwarz gestaltet und im Fotomodus gedruckt werden.
12. Falls die Tinte nur aus einigen Patronen einen geringen Widerstand hat, empfiehlt es sich nur diese Farben oder Mischfarben jener zu verwenden.
13. Durch Papiereinzugswalzen entstandene Kratzer können mithilfe eines mit leitfähiger Tinte befüllten Stiftes, wie beispielsweise einem Mitsubishi Circuitry Marker, ausgebessert werden.
14. Für das Drucken mit leitfähiger Tinte ist es ratsam ausschließlich unbenutzte Fill-In-Patronen mit einem ARC zu verwenden.

Fazit

Das Drucken von Leiterbahnen mit einem Tintenstrahldrucker verbindet Vorteile von Breadboard-Prototypen und Lochrasterplatinen-Schaltungen. Zum einen ist es, wie bei Breadboard-Prototypen auch, möglich Schaltungen schnell und kostengünstig herzustellen. Zum andern können Bauteile, solange sie nicht angeklebt oder anderweitig fest mit der Leiterbahn verbunden wurden, ohne Weiteres ausgetauscht werden. Die auf Papier oder ähnlichem Material gedruckten Schaltungen können wie Lochrasterplatinen-Schaltungen auch sehr kompakt und abhängig von den verwendeten elektronischen Bauteilen – anders als Lochraster-Platinen oder Breadboard-Prototypen – sogar flexibel produziert werden. Ein Dauereinsatz der gedruckten Schaltungen ist ebenfalls problemlos möglich. Sobald das Projekt getestet ist und entschieden wurde, welche Bauteile endgültig verwendet werden sollen, können diese auf unterschiedliche Weise, fest auf den Leiterbahnen angebracht werden.

Um gedruckte Leiterbahnen herstellen zu können, müssen im Gegensatz zu Breadboard-Prototypen, allerdings zuerst ein kompatibler Drucker, Spezial- oder Fotopapier und leitfähige Tinte erworben werden. Die einmaligen Kosten sind also im Vergleich zu Breadboards und Steckbrücken relativ hoch. Außerdem fallen beim Druck von Schaltungen im Gegensatz zu Breadboard-Prototypen regelmäßig Folgekosten für Spezial- oder Fotopapier und leitfähige Tinte an.

Wenn nur schnelle und günstige Prototypen hergestellt werden sollen, welche nicht für einen Dauereinsatz geeignet sein müssen oder bei denen die Größe keine Rolle spielt, eignet sich die Breadboard-Steckbrücken-Methode aufgrund der geringeren Kosten jedoch nach wie vor besser.

Wenn die Prototypen allerdings haltbar gemacht oder verkleinert werden sollen, können gedruckte Schaltungen leichter dementsprechend angepasst werden als Breadboard-Schaltungen. Diese müssen in der Regel neu konzipiert und auf einer Lochraster Platine umgesetzt werden. Hier ist deutlich mehr Arbeitszeit erforderlich als beim Stecken des Prototyps auf einem Breadboard, da meist das Routing der Verbindungen vorgenommen und die Platine verarbeitet werden muss. Da Lochrasterplatinen einen relativ hohen Stückpreis haben, könnte sich der Kauf und Betrieb eines zum Drucken von Leiterbahnen umgebauten Druckers amortisieren, wenn regelmäßig Schaltungen produziert werden.

Es gibt einige Hürden, welche im Vorfeld überwunden werden müssen, bevor Schaltungen in einer hohen Qualität produziert werden können, was sicherlich einige Interessenten abschreckt. Zum einen muss etwas Vorwissen oder entsprechende Lektüre hinsichtlich der Funktionsweise von Druckern und des selbst Befüllens von Patronen vorhanden sein. Zum anderen muss die leitfähige Tinte über spezielle, eher für gewerbliche Transaktionen ausgelegte Kanäle bezogen werden, da im normalen Einzelhandel derartige Produkte nicht angeboten werden.

Ausblick

Im Bereich Smart Home können Sensoren und Aktoren mithilfe von gedruckten Leiterbahnen direkt unter Tapeten oder in Möbelstücke integriert werden. Diese können so besonders unauffällig in den Raum integriert werden. Beispiele hierfür sind unter Tapeten oder in Möbel integrierte Schaltungen oder Steuerungen für das Home Entertainment System. So wäre es unter anderem auch möglich Paradigmen, wie zum Beispiel, dass das Licht über einen Schalter an der Wand aktiviert werden muss, wenn es im Raum dunkel ist, abzulösen. Eine problemlos umsetzbare Möglichkeit wäre beispielsweise mithilfe von gedruckten Sensoren an der Tür zu erfassen, wenn eine Person den Raum betreten möchte und das Licht dann automatisch zu aktivieren, wenn Dämmerungssensoren zusätzlich melden, dass es in dem Raum dunkel ist.

Das Drucken von Leiterbahnen wäre für Privatanwender oder mittelständische Unternehmen deutlich einfacher, wenn im Handel Drucker erworben werden könnten, welche speziell für diese Zwecke entwickelt worden sind. Außerdem wäre es wünschenswert, leitfähige Tinte, genau wie herkömmliche Druckertinte auch, bereits in Einwegpatronen abgefüllt direkt über die Druckerhersteller erwerben zu können.

Eine weitergehende Analyse der Sensoren könnte außerdem untersuchen, ob sich übereinanderliegende Sensoren dafür eignen, mehrdimensional Daten zu erfassen. Damit wäre es möglich, nicht nur die Helligkeit, sondern beispielsweise auch die Farbe des Lichts zu steuern.

Des Weiteren könnten Werte von nebeneinanderliegenden Sensoren gemeinsam ausgewertet werden, statt wie bisher nur einzelne Werte zu beachten. Dadurch könnte die Position des Fingers zwischen den beiden Sensoren bestimmt werden, ohne dass ein weiterer Sensor benötigt wird. Somit wäre die selbe Lichtsteuerung auch mit einer geringeren Anzahl von Sensoren zu realisieren.

Abkürzungsverzeichnis

ARC	Auto Reset Chip
EL	Elektrolumineszenz
LED	Light-emitting diode
PET	Polyethylenterephthalat
PWM	Pulsweitenmodulation
QR (Code)	Quick Response Code
RFID	Radio-frequency identification
SMD	Surface-mounted device
THT	Through Hole Technology

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Widerstandsmessung der Tinte aus den verschiedenen Patronen	16
Tabelle 2: Widerstandsmessung einer 80 mm x 5 mm Leiterbahn	20

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Druckkopf mit Thermoelement	5
Abbildung 2: Druckkopf mit Piezoelement	5
Abbildung 3: SenSprout [7]	6
Abbildung 4: Multiple-Choice Aufgabe über RFID [8]	7
Abbildung 5: Papierlautsprecher [12]	8
Abbildung 6: Foldio Beispiele [10]	9
Abbildung 7: LC-229 (schwarz) und LC-225 Fill-In-Patronen mit Auto Reset Chip.	13
Abbildung 8: Einfüllen der leitfähigen Tinte in eine LC-229 Patrone	14
Abbildung 9: Aufbau der Widerstandsmessung	15
Abbildung 10: Durch Papiereinzugswalzen entstandene Kratzer	17
Abbildung 11: Verschiedene einseitige Spulen	21
Abbildung 12: Spule mit geringem Widerstand	22
Abbildung 13: Doppelseitige Spule mit Papierdurchbruch in der Mitte	22
Abbildung 14: Drucken auf der Rückseite von Mitsubishi NB-TP-3GU100 175 g/m ² (transparentes PET)	23
Abbildung 15: Lötstelle auf Kupferband	25
Abbildung 16: Mit Leitsilber befestigte SMD-LED	26
Abbildung 17: Schaltplan der Lichtsteuerung	31
Abbildung 18: Fritzing Bauanleitung	32
Abbildung 19: Vorlage für die Sensoren auf einem Federdeckel	33
Abbildung 20: Auf leitfähiges Metall-Klebeband gelöteter Kohleschichtwiderstand	34
Abbildung 21: Verbinden der Kabel und Widerstände mit den Sensoren	35
Abbildung 22: Herauslesen des maximalen Schwellenwerts	37
Abbildung 23: Schwankungen der Sensordaten ohne eine Eingabe	37

Quellcodeverzeichnis

Listing 1: Auszug aus Arduino Sketch „Sensor_Kalibrierung“	36
Listing 2: Permanentes Darstellen einer Linie in Arduinos seriellen Plotter	36

Literaturverzeichnis

- [1] BADGER, PAUL ; STOFFREGEN, PAUL: *CapacitiveSensor Library*. URL <https://github.com/arduino-libraries/CapacitiveSensor>. - abgerufen am 2017-01-30
- [2] CHANG, SHUN-CHI ; LIU, JIE ; BHARATHAN, JAYESH ; YANG, YANG ; ONOHARA, JUN ; KIDO, JUNJI: Multicolor Organic Light-Emitting Diodes Processed by Hybrid Inkjet Printing. In: *Advanced Materials* Bd. 11 (1999), Nr. 9, S. 734–737 — ISBN 1521-4095
- [3] HEISE, FLORIAN: *Bilder aus der Düse Know-How: So funktioniert ein Tintenstrahler*. URL <http://www.druckerchannel.de/artikel.php?ID=55>. - abgerufen am 2016-12-12
- [4] ISO: ISO/TS 80004-2:2015 Nanotechnologies — Vocabulary — Part 2: Nano-objects, 2015
- [5] KAWAHARA, YOSHIHIRO ; HODGES, STEVE ; COOK, BENJAMIN S ; ZHANG, CHENG ; ABOWD, GREGORY D: Instant inkjet circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices. In: *Proceedings of the ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing* (2013), S. 363–372 — ISBN 9781450317702
- [6] KAWAHARA, YOSHIHIRO ; HODGES, STEVE ; GONG, NAN-WEI ; OLBERDING, SIMON ; STEIMLE, JÜRGEN: Building Functional Prototypes Using Conductive Inkjet Printing (2014), S. 30–38
- [7] KAWAHARA, YOSHIHIRO ; LEE, HOSEON ; TENTZERIS, MANOS M.: SenSprout. In: *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing - UbiComp '12* (2012), Nr. 2010, S. 545 — ISBN 9781450312240
- [8] LI, HANCHUAN ; BROCKMEYER, ERIC ; CARTER, ELIZABETH J ; FROMM, JOSH ; HUDSON, SCOTT E ; PATEL, SHWETAK N ; SAMPLE, ALANSON: PaperID: A Technique for Drawing Functional Battery-Free Wireless Interfaces on Paper. In: *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (2016), S. 5885–5896 — ISBN 978-1-4503-3362-7
- [9] Mitsubishi Nano Benefit Series NBSIJ-FD02 (Silver Nano Particle Ink) Technical Data Sheet, 2016
- [10] OLBERDING, SIMON ; SOTO, SERGIO ; STEIMLE, JÜRGEN: Foldio: Digital Fabrication of Interactive and Shape- Changing Objects With Foldable Printed Electronics. In: *submitted to Proceedings of the 28th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '15* (2015), S. 10 — ISBN 9781450337793
- [11] *Printed Sensors Could Help Save You From Spoiled Food*. URL <https://www.wired.com/2012/01/printed-circuit-food-safety/>. - abgerufen am 2017-01-17
- [12] STINSON, LIZ ; GOURGUECHON, CORALIE: *It works! A tiny speaker printed on a*

- single sheet of paper*. URL <https://www.wired.com/2013/12/a-tiny-speaker-made-out-of-paper/>. - abgerufen am 2016-12-02
- [13] TENTZERIS, MANOS M.: *Inkjet-Printed Nanotechnology-Enabled Zero-Power Wireless Sensor Nodes for Internet-of-Things (IoT) and M2M Applications*. URL <http://studylib.net/doc/18844879/inkjet-printed-nanotechnology-enabled-zero-power-wireless>. - abgerufen am 2017-01-03
- [14] YANG, GENG ; WAN, QIANSU ; ZHENG, LI-RONG: *Bio-Chip ASIC and Printed Flexible Cable on Paper Substrate for Wearable Healthcare Applications* (2011), S. 4–5 — ISBN 9781450309134
- [15] ZERILLI, FRANK: *Conductivity and Resistance - Bare Conductive*. URL <https://faqs.bareconductive.com/hc/en-gb/articles/204848011-Conductivity-and-Resistance>. - abgerufen am 2017-01-17

Danksagung

Ich möchte all jenen danken, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meiner Familie, meiner Freundin und besonders bei meiner Mutter, deren Unterstützung und Rat mir während meines Studiums sehr half.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Thomas Smits und Frau Prof. Kirstin Kohler, welche meine Arbeit betreut haben und mir während dieser Zeit wertvolle Tipps und Anregungen geben konnten.

Des Weiteren danke ich der Hochschule Mannheim für die zur Verfügung gestellten Mittel, ohne welche meine Forschungen nicht möglich gewesen wären.

Ebenso gilt mein Dank Iris Rudolf und Inge Schirosi für das Korrekturlesen meiner Arbeit.