

3D-Druck im industriellen Umfeld

Zielgruppenorientierte Gestaltung einer
Anwesenheitsüberprüfung mit elektrisch leitfähigem
Filament

Zweite Bachelorarbeit

Ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science in Engineering

im Bachelorstudiengang Smart Engineering of Production Technologies
and Processes
an der Fachhochschule St. Pölten

von:

Mag. Tanja Tomitsch

00301550

Betreuer: Dipl.-Ing. Christoph Braun, BSc

St. Pölten, 24. Mai 2023

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere, dass

- ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- ich dieses Thema bisher weder im Inland noch im Ausland einem Begutachter/einer Begutachterin zur Beurteilung oder in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Diese Arbeit stimmt mit der vom Begutachter bzw. der Begutachterin beurteilten Arbeit überein.

St. Pölten, 22. Mai 2023

Ort, Datum



Unterschrift

Kurzfassung

3D-Druck ist eine innovative Technik im Bereich der additiven Fertigung, an der in den letzten Jahren viel geforscht wurde. Ein besonderer Bereich davon ist jener der elektrisch leitfähigen 3D-Druckfilamente, die das Potenzial haben, in Zukunft viele aktuelle Herausforderungen der Industrie, Medizin und in vielen anderen Bereichen technisch zu unterstützen.

In der vorliegenden Arbeit wurde die neue Technologie der elektrisch leitfähigen 3D-Druckfilamente genutzt, um einen Sensor zu entwickeln, der die Sicherheit zum Beispiel in MakerLabs an Hochschulen zu erhöhen vermag, indem eine Anwesenheitskontrolle darüber durchgeführt wird. Unter Verwendung zweier Sensormodelle wurde potenziellen Nutzer:innen die Möglichkeit gegeben, die Prototypen zu testen. Diese potenziellen Nutzer:innen wurden dabei beobachtet und anschließend befragt.

Zusammenfassend konnte mit den angewandten Methoden ein Sensormodell gestaltet werden, mit dessen Hilfe eine Anwesenheitskontrolle und damit eine Überwachung sicherheitskritischer Bereiche sichergestellt werden kann sowie Erkenntnisse generiert werden, die einer weiteren Forschung im Bereich von leitfähigem 3D-Druckfilament eine Basis legen.

Abstract

3D printing is an innovative technology in the field of additive manufacturing that has been the subject of much recent research. One particular area thereof concerns electrically conductive 3D printing filaments, which have the potential to address many of the current and future issues in industry, medicine and many other fields.

In the present work, this new technology was used to develop a sensor that can increase safety in, for example, MakerLabs at universities by performing presence checks on them. Using two sensor models, potential users were given the opportunity to test the prototypes. These potential users were observed and then interviewed.

In summary, with the methods applied, a sensor model could be created with the help of which presence control and thus monitoring of safety-critical areas can be ensured, as well as findings that provide a basis for further research in the area of conductive 3D printing filaments.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Ehrenwörtliche Erklärung | II |
| Kurzfassung | III |
| Abstract | IV |
| Inhaltsverzeichnis | V |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Problemstellung | 2 |
| 1.2 Zielsetzung | 2 |
| 1.3 Fragestellungen | 3 |
| 1.3.1 Hauptforschungsfrage | 3 |
| 1.3.2 Nebenforschungsfragen | 3 |
| 1.4 Methodik | 3 |
| 1.5 Aufbau der Bachelorarbeit | 5 |
| 2 Grundlagen von 3D-Druck und Anwesenheitskontrolle | 6 |
| 2.1 3D-Druck als Grundlage eines Sensors | 6 |
| 2.1.1 Geschichte und Entwicklung | 6 |
| 2.1.2 Häufige Fehlerquellen beim 3D-Druck | 7 |
| 2.1.3 Leitfähige Filamente | 8 |
| 2.2 Anwesenheitskontrolle im industriellen Bereich | 9 |
| 3 Konzeptionierung | 10 |
| 3.1 Use-Case Lasercutter | 10 |
| 3.1.1 Gefahrenquellen | 10 |
| 3.1.2 Relevanz für die vorliegende Arbeit | 11 |
| 3.2 Verwendete Ressourcen | 11 |
| 3.2.1 Mikrocontroller | 11 |
| 3.2.2 Funksendemodul und Funksteckdose | 11 |
| 3.2.3 3D-Drucker und Filamente | 12 |
| 3.3 Durchführungskonzepte | 12 |
| 3.3.1 Konzept der Anwesenheitskontrolle | 12 |
| 3.3.2 Evaluierung der Sensorkonzepte | 12 |
| 3.3.3 Entwicklung und Umsetzung der Sensoren | 13 |
| 3.3.4 Testen der Sensoren | 13 |
| 4 Datenerhebung und Ergebnisse | 14 |
| 4.1 Leitfähigkeit verschiedener Filamente | 14 |
| 4.1.1 Allgemeine Messung der Leitfähigkeit | 14 |
| 4.1.2 Leitfähiges TPU-basiertes Filament | 15 |

| | | |
|------------------------------|--|-----------|
| 4.1.3 | Leitfähiges PLA-basiertes Filament | 17 |
| 4.1.4 | Strommessung mit Spannungsquelle und LED | 19 |
| 4.2 | Sensormodelle | 20 |
| 4.2.1 | Aufbau der Elektronik der Sensormodelle | 20 |
| 4.2.2 | Sensormodell „Buzzer“ | 26 |
| 4.2.3 | Sensormodell „Tower“ | 28 |
| 4.2.4 | Anwendung der Sensoren mit Arduino | 30 |
| 4.2.5 | Softwarekonzept | 32 |
| 4.2.6 | Umsetzung des Softwarekonzepts | 34 |
| 4.3 | Zuverlässigkeit der Sensoren | 34 |
| 4.3.1 | Sensormodell „Buzzer“ | 35 |
| 4.3.2 | Sensormodell „Tower“ | 36 |
| 4.4 | Analyse und Ergebnisse der Nutzer:innenbedürfnisse | 37 |
| 4.4.1 | Fragebogen | 38 |
| 4.4.2 | Beobachtungsbogen | 40 |
| 5 | Fazit und Ausblick | 41 |
| 5.1 | Beantwortung der Forschungsfragen | 41 |
| 5.1.1 | Hauptforschungsfrage | 41 |
| 5.1.2 | Nebenforschungsfrage 1 | 41 |
| 5.1.3 | Nebenforschungsfrage 2 | 42 |
| 5.1.4 | Nebenforschungsfrage 3 | 42 |
| 5.1.5 | Nebenforschungsfrage 4 | 42 |
| 5.2 | Lessons learned und Empfehlung | 42 |
| 5.3 | Limitationen der vorliegenden Arbeit und zukünftige Forschungsmöglichkeiten | 44 |
| Literaturverzeichnis | 46 | |
| Abbildungsverzeichnis | 50 | |
| Tabellenverzeichnis | 52 | |
| Anhang | 53 | |
| A. | Beobachtungsbogen | 53 |
| B. | Fragebogen | 54 |
| C. | Programmcode | 55 |

1 Einleitung

Das Laserschneidverfahren ist laut Haferkamp et al. (1998) eine verbreitete Technologie mit einer großen Bandbreite an Einsatzmöglichkeiten. So wird diese Technologie auch an der Fachhochschule St. Pölten gelehrt und angewendet, um den Studierenden die Möglichkeit zu geben, in Computer Aided Design (= CAD)-Programmen Modelle konstruieren zu können und somit besser auf zukünftige Aufgaben und Arbeitsumgebungen vorzubereitet zu sein.

Gerade bei sicherheitskritischen Anwendungen, wie etwa dem Betrieb eines Lasercutters (= Laserschneider), ist es relevant, sicherstellen zu können, dass die Person, die den Lasercutter gerade betreibt, die Maschine überwacht und gegebenenfalls eingreift. Gefahren beim Betrieb eines Lasercutters entstehen vor allem durch Kollisionen, die aufgrund nicht ganz gelöster gelaserter Teile entstehen können sowie zu starker Hitzeentwicklung (Pilastro et al., 2021). Aus diesem Grund soll in der vorliegenden Arbeit ein Sensor entwickelt werden, der kostengünstig und individualisierbar sicherstellen kann, dass die Person vor Ort bleibt und, sollte sie dies nicht tun, der Lasercutter gestoppt wird.

Um diese Individualisierbarkeit sicher zu stellen, wurde bereits im Rahmen der dritten dualen Phase im Zuge des Bachelorstudiums Smart Engineering mit verschiedenen leitfähigen 3D-Druckmaterialien experimentiert sowie im Zuge der vierten dualen Phase Bedürfnisse der potenziellen Zielgruppe in die Entwicklung einbezogen. Leitfähiges Filament gilt nach Zheng et al. (2021) als innovative Möglichkeit, durch seine einfache Anpassbarkeit viele individuelle Bedürfnisse zu erfüllen. Es habe damit das Potential, dazu beizutragen, die Sensorindustrie von Grund auf zu revolutionieren. Im Zuge der Umsetzung der dritten und vierten dualen Phase, darunter sind Praxisphasen zu verstehen, die im Bachelorstudiengang Smart Engineering zu absolvieren sind und insgesamt 15 ECTS (= European Credit Transfer and Accumulation System) umfassen, wurden verschiedene Konzepte mit unterschiedlichen Materialien erforscht. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse wurden die Erkenntnisse in die vorliegende Bachelorarbeit einbezogen und um weitere relevante Aspekte ergänzt.

1.1 Problemstellung

Aktuelle Sicherheitssysteme in der Industrie zielen hauptsächlich darauf ab, Menschen davon abzuhalten, sich in sicherheitskritische Bereiche zu begeben. Schmauder et al. (2016) beschreiben unterschiedliche Systeme wie Umzäunungen, Kamerasysteme, Laserscanner, Ultraschallsensoren, Sicherheitsschaltmatten, etc., die beim Betreten oder Öffnen ein Not-Aus auslösen. Es gibt jedoch auch Anwendungen, bei denen die Anwesenheit einer Person an einer bestimmten Stelle wichtig ist. Dazu zählt zum Beispiel als eine sicherheitskritische Anwendung der Lasercutter im MakerLab der Fachhochschule in St. Pölten. Bei einem MakerLab oder Makerspace handelt es sich laut Cambridge Dictionary (2023) um einen Ort, an dem Menschen gemeinsam Dinge entwickeln und dazu traditionelle und moderne Fertigungsverfahren nutzen - also um eine technisch ausgestattete Arbeitsstätte beziehungsweise Werkstätte mit grundlegenden Bauteilen, Werkzeug sowie professionellen Fertigungsmaschinen, wie beispielsweise 3D-Druckern oder Lasercuttern, um Projekte umsetzen zu können. Ultraschallsensoren, Laserscanner oder Kamerasysteme erfassen zwar die Anwesenheit von Personen oder Objekten, können jedoch ohne Softwareauswertung nicht erkennen, ob die Person den Vorgang aktiv beobachtet. Kommerziell erhältliche Lösungen, die den Bedarf an Individualisierung aufgrund unterschiedlicher Größen und Ausstattungen der MakerLabs an Hochschulen, Forschungseinrichtungen und anderen Institutionen erfüllen, überschreiten meist deren Budget. Zur Lösung dieses Problems soll eine individualisierbare, kostengünstige Lösung gefunden werden.

1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung des Projekts im Rahmen der Bachelorarbeit ist es, unter Anwendung von 3D-Druck einen Sensor zu schaffen, der es ermöglicht, die Anwesenheit einer Person zu detektieren. Der Einsatz eines 3D-Druckers zu diesem Zweck ist der Möglichkeit der Individualisierung auf viele Nutzer:innenanforderungen sowie eventuellen Platzbeschränkungen auf zum Beispiel Geräten geschuldet. Durch die permanente Anwesenheit einer Person sollen Risiken wie zum Beispiel eine zu starke Hitzeentwicklung, die zu einer Brandgefahr führen könnte, rechtzeitig erkannt und Unfälle so verhindert werden. Dies soll im Sinne eines Totmannschalters, sodass die Nutzer:innen alle paar Sekunden den Schalter aktivieren müssen, realisiert werden. Weiters sollen, um den potenziellen Nutzer:innen eine möglichst gute Userexperience (= UX) zu ermöglichen, diese mittels Befragung und Beobachtung in die Weiterentwicklung des Sensordesigns eingebunden werden.

Konkret soll im Rahmen dieser Bachelorarbeit eine mögliche Lösung für die zuvor erläuterte Problemstellung gefunden und ein Sensor entwickelt werden, der eine höchst individualisierbare und somit universell einsetzbare Anwesenheitskontrolle für kritische Anwendungen bietet.

1.3 Fragestellungen

Die im Folgenden erläuterten Forschungsfragen dienen dem strukturierten Vorgehen während der Ausarbeitung der Bachelorarbeit und deren Beantwortung soll einen Erkenntnisgewinn im Bereich 3D-Druck als Sensor im industriellen Umfeld liefern. Die vorliegende Bachelorarbeit wurde dazu in eine Hauptforschungsfrage mit vier Nebenforschungsfragen gegliedert. Ergänzend zur Beantwortung der unten folgenden Forschungsfragen sollen die Antworten als Gestaltungsrichtlinien zur möglichen Anwendbarkeit in anderen MakerLabs aufbereitet werden.

1.3.1 Hauptforschungsfrage

Wie kann ein individualisierter Sensor aus leitfähigem 3D-Druck-Filament hergestellt werden, um Daten zur Anwesenheit von Personen generieren zu können?

1.3.2 Nebenforschungsfragen

- Welches 3D-Filament weist eine geeignete Leitfähigkeit auf, um daraus einen Sensor wie oben beschrieben entwickeln zu können?
- Welche Anforderungen haben potenzielle Nutzer:innen an einen Sensor aus leitfähigem 3D-Filament in Bezug auf Größe und Form?
- Welche Möglichkeiten der Umsetzung des Sensors ergeben sich durch die unterschiedlichen Materialien?
- Wie können die gewonnenen Erkenntnisse für den Use-Case des Lasercutters an der Fachhochschule St. Pölten umgesetzt werden?

1.4 Methodik

Um die vorliegende Bachelorarbeit wissenschaftlich und ergebnisorientiert zu gestalten, wurden folgende Methoden im Sinnes einer Design-based research, (Scott et al., 2020) wie sie in Bildungswissenschaften verwendet wird, gewählt, anhand derer die Forschungsfragen beantwortet werden sollen. Diese werden im Weiteren dargestellt und erläutert.

1 Einleitung

Die Umsetzung des Prototyps folgt dem dargestellten Arbeitsablauf mit einer Gliederung in die drei Abschnitte *Literaturrecherche*, *Versuche und Prototyp* sowie *Beobachtung und Befragung*.

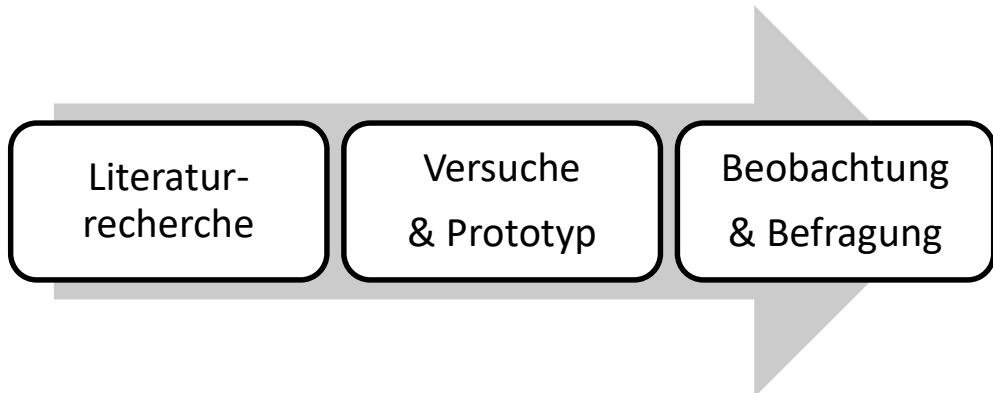


Abbildung 1: Ablauf der verschiedenen Methodenansätze zur Erarbeitung des Prototyps

Das Thema soll anhand bereits vorhandener Literatur untersucht werden. Konkret soll eruiert werden, welche Erkenntnisse bereits vorliegen und als Grundlage für weitere Forschung dienen können. Dabei soll sowohl vorangegangene Forschung in dem entsprechenden Themengebiet als auch Literatur aus verwandten Themen miteinbezogen werden. Im Anschluss dazu sollen mittels Versuchen die verschiedenen 3D-Filamente auf ihre Leitfähigkeit und hinsichtlich der zukünftigen Nutzer:innenbedürfnisse Materialeigenschaften und die insgesamte Anwendbarkeit für das Geplante geprüft werden. Im Zuge dessen soll ein Prototyp, der im Rahmen des MakerLabs der Fachhochschule St. Pölten beim Lasercutter zur Anwesenheitskontrolle eingesetzt werden kann, entstehen. Um die Nutzer:innenbedürfnisse einfließen lassen zu können, soll der Prototyp als Testaufbau geschaffen werden, um potenzielle Nutzer:innen während der Benutzung der Sensoren zu beobachten und im Anschluss zu befragen. Grundsätzlich können mittels Beobachtung Verhalten und Vorgänge gut beobachtet werden. Im konkreten Fall geht es darum, herauszufinden, wie sich potenzielle Nutzer:innen in Bezug auf die 3D-gedruckten Teile verhalten (= Usability). Im Zuge einer quantitativen Beobachtung sollen aussagekräftige Daten erhoben werden, um die diesbezüglichen Hypothesen prüfen zu können. Eine Umfrage beziehungsweise Befragung bietet nach Pfeiffer (2018c) eine Möglichkeit, ein theoretisches Thema praxisnah zu behandeln und bedarf einer gründlichen Recherche. Im Zusammenhang mit dieser Bachelorarbeit soll die Befragung von potenziellen Nutzer:innen dazu herangezogen werden, einen Einblick in die Userexperience bei der Verwendung der Sensoren zu erhalten.

1.5 Aufbau der Bachelorarbeit

Die Gliederung der vorliegenden Bachelorarbeit wurde insbesondere an die im Kapitel 1.4 beschriebene Methodik angelehnt.

Im Kapitel 2 „Grundlagen von 3D-Druck und Anwesenheitskontrolle“ findet sich der aktuelle Stand der Forschung, begonnen mit der Geschichte und Entwicklung von 3D-Druck und Lasercutter, der Frage, warum diese Technologien für diese Bachelorarbeit verwendet werden und welche Einschränkungen vorhanden sind, bis hin zur Erläuterung bisheriger Konzepte zur Anwesenheitskontrolle im industriellen Umfeld.

Das Kapitel 3 „Konzeptionierung“ stellt gemeinsam mit dem Kapitel 4 „Datenerhebung und Ergebnisse“ den praktischen Teil der vorliegenden Bachelorarbeit dar. Im dritten Kapitel wird dabei besonders auf die Umsetzung wie zum Beispiel verwendete Ressourcen und Technologien Bezug genommen. Im vierten Kapitel finden sich die Ergebnisse der Arbeit sowie deren Analyse.

Im Kapitel 5 „Fazit und Ausblick“ finden sich die Diskussion der vorliegenden Ergebnisse sowie ein Ausblick über mögliche Weiterführungen der Arbeit.

In dieser Arbeit wurden Teile der Erkenntnisse aus den Projektarbeiten des 5. und 6. Semesters an der Fachhochschule St. Pölten als Ausgangsbasis verwendet. Durch dieses Vorgehen konnte der Prototyp im Sinne eines iterativen Prozesses weiterentwickelt und unter anderem auch potenzielle Nutzer:innen in den Prozess integriert werden.

2 Grundlagen von 3D-Druck und Anwesenheitskontrolle

In diesem Kapitel soll der aktuelle Stand der Forschung erläutert werden. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Entwicklung des 3D-Druckes, insbesondere im Bereich der leitfähigen Filamente gelegt, darauf eingegangen, warum sich ein Lasercutter als Use-Case für den Einsatz leitfähiger Filamente besonders gut eignet und wie aktuelle Anwesenheitskontrollen im industriellen Bereich durchgeführt werden.

2.1 3D-Druck als Grundlage eines Sensors

3D-Druck ermöglicht es, rasch individuelle Modelle zu generieren. So können beispielsweise in der Medizin an die Patienten angepasste Modelle gedruckt werden (Aimar et al., 2019). Ein weiteres Anwendungsfeld ist in der Industrie zu finden. Nicols (2019) beschreibt in ihrem Artikel die Vorteile von 3D-Metalldruck wie z.B. das Drucken von Autoteilen oder zukünftig auch von ganzen Autos.

Das Buch „Additive Manufacturing Technologies“ von Gibson et al. (2015) beschäftigt sich im Kapitel „Applications for Additive Manufacture“ mit den Einsatzgebieten von 3D-Druck. Dadurch, dass klassische Produktionswege entfallen, können Prototypen schnell und kostengünstig gefertigt werden. Änderungen an den Modellen können rasch durchgeführt werden und dadurch kann der gesamte Produktzyklus deutlich beschleunigt werden. Im medizinischen Bereich können Modelle und Implantate einfach individuell angepasst für die Patienten erstellt werden.

2.1.1 Geschichte und Entwicklung

Auch wenn es bereits vor 1984 Versuche zu 3D-Druck gab, zählt Charles Hull als Erfinder des 3D-Drucks – konkret der Stereolithographie (= STL). Dabei wird eine Flüssigkeit durch ultraviolettes Licht gezielt gehärtet und dadurch ein Objekt erstellt. 1984 meldete Hull hierfür ein erstes Patent an. 1989 folgte ein Patent von Carl Robert Deckard von der University of Texas für das Selective Laser Sintering (= SLS). Bei SLS wird ein Pulver durch einen Laserstrahl gezielt geschmolzen, wodurch ein Objekt entsteht. Fused Deposition Modeling (= FDM) wurde 1992 von Steven Scott Crump patentiert. Beim FDM wird ein typischerweise 1,75 mm oder 2,85 mm dicker Materialstrang in einer Düse geschmolzen und durch gezieltes Steuern des Druckkopfes aufgebracht (Savini & Savini, 2015). Da 2005 einige

wesentliche Patente ausliefern, fanden ab diesem Zeitpunkt laut Kamran und Saxena (2016) 3D-Drucker, im Speziellen FDM-Drucker, weite Verbreitung. Ermöglicht wurde dies nach Savini und Savini (2015) durch günstige Selbstbaukits und zahlreiche Programme zur Unterstützung des 3D-Drucks.

Abgesehen von der Entwicklung des 3D-Drucks als Technik wurde die Umsetzung davon erst durch die Entwicklung von leistungsstarken Computern ermöglicht. Das Erstellen von 3D-Modellen erfordert Computer mit hohen Rechenleistungen, die in den 80er-Jahren noch sehr teuer waren (Gibson et al., 2015).

2.1.2 Häufige Fehlerquellen beim 3D-Druck

Gibson et al. (2015) beschreiben, dass Temperaturschwankungen der Druckdüse zu ungleichmäßigem Materialfluss führen können. Wird zu wenig Filament extrudiert, so können dünnerne Schichten entstehen, wodurch bei geringer Belastung ein Bruch entstehen kann. Unterschiedliche Materialien weisen andere Schmelzeigenschaften auf, wodurch unterschiedliche Druckparameter konfiguriert werden müssen. Je nach Filament muss eine unterschiedliche Temperatur eingestellt werden. Weiters beschreiben die Autoren, dass Modelle mit Stützstrukturen zu unsauberer Oberflächen führen und deshalb nach Möglichkeit vermieden werden sollen. Mishra et al. (2022) zeigen typische Fehlerbilder und geben Anleitungen, wie derartige Fehler vermieden werden können. Das Abheben von Ecken kann durch spezielle Haftfolien, die am Heizbett angebracht werden, verhindert werden. Die Ursache fürs Ablösen von gedruckten Schichten liegt in zu geringer Haftung der Schichten aneinander, was durch schwankende Temperatur der Druckdüse oder der Raumtemperatur entsteht. Die Druckdüse kann durch schlechtes Filament bzw. Staub oder Schmutz verstopfen. Schichten können verschoben gedruckt werden, wenn Motoren überhitzen, wodurch Schrittfehler auftreten können. Das Entstehen von Fäden oder Schmelzen des Objekts kann durch Wählen falscher Parameter, wie beispielsweise Drucktemperatur, Druckgeschwindigkeit oder Schichthöhe entstehen. Dey und Yodo (2019) beschreiben in ihrem Review den Einfluss der zuvor genannten Druckparameter auf die Rauheit, Festigkeit, Genauigkeit und Druckdauer.

Der Artikel von De Leon et al. (2019) beschäftigt sich mit dem 3D-Druck mit flexiblem Filament. Der Einsatz von flexiblem Filament führt häufiger zu Problemen als der Druck mit Polylactide (= PLA). De Leon et al. (2019) führten Experimente mit flexiblem Druckmaterial durch. Selteneres Verstopfen der Druckdüse kann durch Reduktion des Förderdrucks sowie durch Vergrößern des Abstandes zwischen Druckdüse und Druckplattform erreicht werden. Das Infill sollte für ausreichende Stabilität bei kleineren Objekten zumindest 20% betragen und bei größeren Objekten über 30% liegen.

2.1.3 Leitfähige Filamente

Leitfähiges Filament gilt nach Zheng et al. (2021) als hoch innovatives Filament, das das Potential hat, die Sensorindustrie zu revolutionieren und es durch die einfache Anpassbarkeit ermöglicht, viele individuelle Bedürfnisse zu erfüllen. Kwok et al. (2017) beschreiben 3D-gedruckte Schaltkreise und Sensoren aus dem elektrisch leitfähigen Material „carbon black (Ensaco® 260P, TIMCAL)“ und deren Veränderung durch elektrische Dauerbelastung oder thermische Belastung. Carbon black stellte sich als geeignet heraus, um beispielsweise einen Schaltkreis zu drucken und über eine Batterie eine LED zum Leuchten zu bringen.

Im Blog-Beitrag von Filament2Print (2022) zu 3D-Druck mit leitfähigem FilaFlex geben die Autoren Tipps zum sinnvollen Einsatz zum Arbeiten mit leitfähigem Filament. Wichtig hierbei ist, dass die Spannungen unter 12V und die Ströme unter 100mA bleiben. Nach dem Arbeiten mit leitfähigem Filament sollte dieses möglichst rasch entfernt und anschließen mit normalem Filament nachgeladen und somit gereinigt werden. Empfohlen wird ein spezielles Reinigungsfilament. Die Temperatur sollte gemäß der Materialvorgaben eingestellt werden. Bei Verwendung von FilaFlex führt eine speziell gehärtete Nozzle zu besseren Ergebnissen. Carbon Black stellt die günstigste Basis für leitfähiges 3D-Druckmaterial dar. Weiters sind noch Carbon Fiber, Carbon Nanotubes und Graphene im Einsatz. Der Widerstand bewegt sich im Kiloohmbereich, abhängig von Größe und Druckform. Abgesehen von der individuellen Formgebung wird als weiterer Vorteil von leitfähigem 3D-Druckmaterial beschrieben, dass dieses – im Gegensatz zu Kupfer – nicht korrodiert und weniger wiegt. Nachteile sind der hohe Materialpreis und die derzeit noch geringe Auswahl unterschiedlicher Leitfähigkeiten oder Farben (Zheng et al., 2021).

Leigh et al. (2012) beschreiben in ihrer Publikation über 3D-gedruckte elektrische Sensoren, wie sich der Widerstand durch Biegen eines Leiterbahnstreifens um 4% verändert. Eingesetzt wurde dies bei einer Art Handschuh, bei der je nach Streckung der Finger ein unterschiedlicher Widerstand gemessen werden konnte. Außerdem stellten sie fest, dass sich 3D-gedruckte Leiterbahn-Pads als kapazitive Sensoren eignen.

2.2 Anwesenheitskontrolle im industriellen Bereich

Im Folgenden sollen gängige Möglichkeiten zur Anwesenheitskontrolle im industriellen Bereich erläutert werden und im Anschluss darauf eingegangen werden, warum diese für einen Einsatz im Sinne dieser Bachelorarbeit an der Fachhochschule St. Pölten nicht geeignet sind.

Schmauder et al. (2016) beschreiben in ihrem Forschungsbericht unterschiedliche Systeme zur Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion. Zur Überwachung von größeren Arbeitsbereichen kommen Kamerasysteme oder 3D-Laserscanner zum Einsatz. Über Machine-Learning kann anhand der Bilddaten erfasst werden, ob es sich um Personen handelt. Dadurch kann auch erkannt werden, in welchem Bereich sich Personen befinden und somit können Maschinen ausgeschaltet werden. Auch durch die Kombination mehrerer Ultraschall- oder Radarsensoren können Objekte oder Bewegungen im Raum erkannt werden.

Wenn nur eine Ebene überwacht werden soll, eignen sich 2D-Laserscanner oder druckempfindliche Fußbodenbeläge. Mit Hilfe von 2D-Laserscannern kann überwacht werden, ob ein Objekt eine unsichtbare Schranke überschreitet. Druckempfindliche Bodenbeläge sind üblicherweise in mehrere kleine Bereiche unterteilt, wodurch erfasst werden kann, an welcher Stelle sich ein Objekt befindet. Werden die Druckpunkte über eine Software weiter ausgewertet, so können Bewegungen im Raum, wie beispielsweise das Zugehen auf eine Gefahrenstelle, erkannt werden.

Kurth (2018) geht auf das Thema optische Schutzeinrichtungen ein. Zusätzlich zu den zuvor beschriebenen Kamera- und Lasersystemen stellt er Lichtgitter vor, die mit Hilfe eines Infrarot Sende-Empfangs-Systems das Eindringen in einen Bereich feststellen können.

Der große Nachteil der hier beschriebenen Systeme ist deren Komplexität. Damit einher gehen die damit verbunden Kosten, die das Budget von MakerLabs an Hochschulen, Forschungseinrichtungen und anderen Institutionen meist überschreiten. Aufgrund der unterschiedlichen Ausstattungen und Größen besteht ein großer Bedarf an Individualisierung, was zu einem weiteren Kostenfaktor führt.

3 Konzeptionierung

Die folgenden Seiten sollen einen Überblick darüber geben, warum der Lasercutter als Use-Case für den aus leitfähigem Filament 3D-gedruckten Sensor gewählt wurde, welche Ressourcen für die Umsetzung benötigt und warum diese gewählt wurden sowie wie die Durchführung konzipiert wurde.

3.1 Use-Case Lasercutter

Als Use-Case zum Testen der Anwendbarkeit eines 3D-gedruckten Sensors aus leitfähigem Filament im industriellen Umfeld wurde der Lasercutter der Fachhochschule St. Pölten gewählt. So sollen in Zukunft Gefahren wie die unten beschriebenen vermieden werden und damit den Nutzer:innen des MakerLabs eine noch sicherere Arbeitsumgebung geschaffen werden.

3.1.1 Gefahrenquellen

Lasercutter arbeiten mit einer hohen Leistung. Dies kann zur Beschädigung des Gerätes oder im schlimmsten Fall zu Bränden führen. Der Artikel „Materials for Laser Cutter Machines“ von Bates-Green und Howie (2018) beschreibt einige brennbare Materialien. Durch richtige Wahl der Leistung und der Geschwindigkeit können auch brennbare Materialien, wie Karton, Kork oder Holz geschnitten werden. Hier ist besondere Vorsicht geboten. Des Weiteren können durch das Schneiden beispielsweise von PVC (= Polyvinylchlorid) giftige Dämpfe entstehen. Der in der FH St. Pölten stehende Lasercutter Epilog Fusion Edge 12 der Firma Epilog Laser weist eine Leistung von 40 Watt auf. In den Warnhinweisen des Manuals wird darauf hingewiesen, dass der Lasercutter nicht unbeaufsichtigt betrieben werden darf.

Pilastro et al. (2021) beschreiben ein System, das den Abstand des Lasers zum Material konstant hält. Als problematisch beschreiben sie, dass beim Schneiden Teile nicht nach unten fallen, sondern schräg nach oben stehen bleiben können. Die Lasereinheit kann damit kollidieren und somit Schaden nehmen. Es besteht zwar die Möglichkeit, dies zu erkennen, aber dies erfolgt teilweise zu spät und diese Erkennung ist nicht in jedem Gerät integriert. Durch Beobachtung des Schneidvorgangs kann dies verhindert werden.

3.1.2 Relevanz für die vorliegende Arbeit

Die Relevanz für die vorliegende Arbeit ergibt sich aus den oben angeführten Gefahrenquellen. Speziell, wenn bereits oft an einer Maschine gearbeitet wurde und bisher nichts Unerwartetes, wie beispielsweise eine Blockade durch einen sich schräg stellenden ausgeschnittenen Teil, aufgetreten ist, wird man dazu verleitet, den Lasercutter unbeaufsichtigt arbeiten zu lassen. Mit einem geeigneten Sensor soll die Anwesenheit der Person bei der Maschine gewährleistet werden.

3.2 Verwendete Ressourcen

Um die Zielsetzung, den Bau eines funktionsfähigen, hoch individualisierbaren Sensors für die Anwesenheitskontrolle beim Lasercutter der Fachhochschule St. Pölten, realisieren zu können, wurden verschiedene Ressourcen benötigt, die nachfolgend aufgelistet sind.

3.2.1 Mikrocontroller

Als Mikrocontroller wurde ein Arduino Uno gewählt, da dieser in den meisten MakerLabs zur Verfügung steht und so die Möglichkeit einer Nachahmung einfacher besteht. Zusätzlich dazu bietet Arduino eine breite Community, um etwaige Weiterentwicklungen einfach umsetzen zu können. Für diese Anwendung bietet der Arduino Uno eine ausreichende Anzahl an Ports und es sind sowohl analoge als auch digitale Ports, die teilweise Pulsweitenmodulation (= PWM) ermöglichen, ausgeführt.

3.2.2 Funksendemodul und Funksteckdose

Der Impuls, ob die Nutzer:innen den Sensor im vorgegebenen Zeitintervall betätigt haben, wird abgefragt. Im Falle des Ausbleibens der Sensorauslösung wird das Ausschaltsignal mittels 433 MHz-Sendemodul zur Funksteckdose übertragen. Dadurch kann der Stromfluss beispielsweise zum Lasercutter getrennt werden. Als 433 MHz-Sendemodul wurde der FS1000A (EAN: 4251266702832) verwendet. Dabei handelt es sich um ein Set aus Sender (XY-FST) und Empfänger (XY-MK-5V). Bei der Funksteckdose wurde ein Modell mit DIP-Schaltern (RCR 1000 N) der Firma Brennenstuhl (EAN: 4007123653607) gewählt.

3.2.3 3D-Drucker und Filamente

Sämtliche auszudruckende 3D-Druckteile im Zusammenhang mit dieser Bachelorarbeit wurden mit dem 3D-Drucker PRUSA i3 MK3 in der Standardausführung gedruckt.

Beim Druck der Sensoren kamen 3 Filamentarten zum Einsatz: Für die nicht leitfähigen Teile wurde zur besseren Unterscheidung das bronzefarbene Standard-PLA-Filament „Viva La Bronze“ von Prusa verwendet. Für die leitfähigen Teile wurde einerseits für die starren Komponenten „Protopasta Composite Conductive PLA“ (EAN: 640970861920) und andererseits für die flexiblen Komponenten TPU (= Thermoplastische Polyurethane)-basiertes „FilaFlex Conductive 92A“ (EAN: 8435424803296) verwendet. Auf den Aufbau und die Eigenschaften der eingesetzten Filamente wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, um den Umfang der vorliegenden Arbeit nicht zu überschreiten.

3.3 Durchführungskonzepte

Im Folgenden wird das allgemeine Konzept der Anwesenheitskontrolle vorgestellt. Des Weiteren werden die Methodik zur Entwicklung der Sensoren sowie das Umsetzungskonzept beschrieben. Abschließend wird die Nutzer:innenerfahrung mit den Sensoren erhoben.

3.3.1 Konzept der Anwesenheitskontrolle

Die Anwesenheitskontrolle soll durch das regelmäßige Auslösen eines Sensors erfolgen. Wird der Sensor im geforderten Intervall nicht betätigt, so soll die Steckdose, an die das zu überwachende Gerät angeschlossen ist, ausgeschaltet werden. Ebenso soll das Gerät ausgeschaltet werden, wenn der Sensor zu lange gedrückt bleibt, weil der Sensor beispielsweise durch ein Objekt blockiert wurde.

3.3.2 Evaluierung der Sensorkonzepte

Vor der Konstruktion des Sensors sollen zwei verschiedene Varianten zur Änderung des Widerstandes und damit zur Feststellung eines Schwellenwertes zur Schaltung der Funksteckdose evaluiert werden. Für die erste Variante soll untersucht werden, inwiefern sich der Widerstand von gedruckten Teilen, die aus leitfähigem, flexiblem TPU-Material bestehen, ändert. Dafür soll ein quaderförmiger Teil gedruckt und in Hinblick darauf gemessen werden, wie sich der Widerstand durch Kompression ändert. Für die zweite Variante soll leitfähiges, PLA-basiertes, starres Material zum Einsatz kommen. Es sollen zwei dünne Platten gedruckt werden und es soll untersucht werden, wie sich der Widerstand

der übereinandergelegten Platten ohne Druck bzw. durch Zusammenpressen ändert.

3.3.3 Entwicklung und Umsetzung der Sensoren

Aus den unter 3.3.2 „Evaluierung der Sensorkonzepte“ generierten Erkenntnissen sollen zwei Sensoren entwickelt, designt und gedruckt werden. Diese sollen anhand elektronischer Beschaltung erfasst werden.

Als erster Schritt sollen die Sensoren technisch so gestaltet werden, dass eine Widerstandsänderung durch Auslösen des Sensors generiert werden kann. Die CAD-Modelle müssen entsprechend dem Design mit leitfähigem bzw. nicht leitfähigem Material gedruckt werden. Als zweiter Schritt sollen die Sensoren beschaltet werden, damit das Auslösen durch den Mikrocontroller erfasst werden kann. Zusätzlich soll ein Konzept entwickelt werden, das die Nutzer:innen optisch und akustisch darauf hinweist, dass der Sensor betätigt werden soll, um ein Abschalten der Maschine zu verhindern. Für das Erfassen der Sensorwerte und die Ansteuerung der Elektronik soll eine entsprechende Software entwickelt werden, um das unter 3.3.1 „Konzept der Anwesenheitskontrolle“ beschriebene Konzept umzusetzen.

3.3.4 Testen der Sensoren

Die beschalteten Sensoren sollen gemeinsam mit der Funksteckdose getestet werden. Dabei soll als erster Test die Zuverlässigkeit überprüft werden. Einerseits soll der Sensor bei jedem Druck auslösen und somit das Abschalten der Funksteckdose verhindern und andererseits bei Ausbleiben des Drucks die Funksteckdose ausschalten. Beide Testfälle sollen 100 Mal durchgeführt werden. Der zweite Test soll die Userexperience bei mindestens 30 Nutzer:innen erfassen. Dabei sollen einerseits die Nutzer:innen während der Arbeit mit den gefertigten Sensoren beobachtet werden und andererseits danach einen Fragebogen ausgefüllt. Die dafür entwickelten Bögen befinden sich in Anhang A und B. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen als Basis für zukünftige Weiterentwicklungen dienen.

4 Datenerhebung und Ergebnisse

Anhand der verwendeten Methoden konnten im Zuge der vorliegenden Bachelorarbeit Erkenntnisse gewonnen werden, die auf den folgenden Seiten erläutert werden. Dabei wurde der Hauptfokus auf die Evaluierung der Leitfähigkeit verschiedener Filamente, Nutzer:innenbedürfnisse in der Konzeptionierung des Sensors sowie die Funktion und die Zuverlässigkeit des Sensors gelegt.

4.1 Leitfähigkeit verschiedener Filamente

Für die Durchführung der Untersuchung zur Leitfähigkeit von verschiedenen Filamenten wurden speziell dafür ausgewiesene Materialien verwendet. Zur Testung kamen ein TPU-basiertes Filament sowie ein PLA-basiertes Filament. Die Vergleiche sowie die Einschätzung zur Eignung der jeweiligen Materialien finden sich in den folgenden Unterkapiteln.

4.1.1 Allgemeine Messung der Leitfähigkeit

Um den Unterschied zwischen leitfähigem PLA und Standard-PLA festzustellen, wurde eine Widerstandsmessung durchgeführt. Dazu wurden identische Objekte, das PRUSA-Logo, gedruckt.



Abbildung 2: Widerstandsmessung eines nicht leitfähigen PLA-Drucks



Abbildung 3: Widerstandsmessung eines leitfähigen PLA-Drucks

Während sich bei der Messung des Widerstands, wie in Abbildung 2 und Abbildung 3 ersichtlich, für das nicht leitfähige PLA-Filament ein Wert von über $20\text{ M}\Omega$ ergibt, sinkt dieser bei leitfähigem PLA auf ungefähr $1\text{ k}\Omega$. Da der Unterschied zwischen Standard-PLA und leitfähigem PLA so deutlich ausfiel, wurden keine weiteren Messungen bei anderen Umgebungsbedingungen oder unterschiedlichem Anpressdruck der Krokodilklemmen durchgeführt. Die Bildrechte in der

vorliegenden Bachelorarbeit liegen, wenn nicht anders angegeben, bei der Autorin.

4.1.2 Leitfähiges TPU-basiertes Filament

Um die Annahme zu prüfen, dass eine Erhöhung des Materialwiderstandes des Materials durch Zusammendrücken eines Objektes erzielt werden kann, wurde ein 10cm x 5cm x 1cm großes Objekt gedruckt. Um das Objekt möglichst weich und flexibel zu drucken, wurde mit nur 5% Infill (= prozentuelle Füllmenge des Objektes mit Filament) und nur der halben Wandstärke der Standardeinstellung gearbeitet.

In mehreren Versuchsaufbauten wurde das Objekt an unterschiedlichen Stellen komprimiert und der Widerstandswert gemessen. Dabei wurde die Variabilität der Druckstärke bei intuitivem Drücken insofern in Kauf genommen, als dies auch den realen Bedingungen im Anwendungsfall entspräche.

4.1.2.1 Widerstandsmessung in 5 cm Abstand

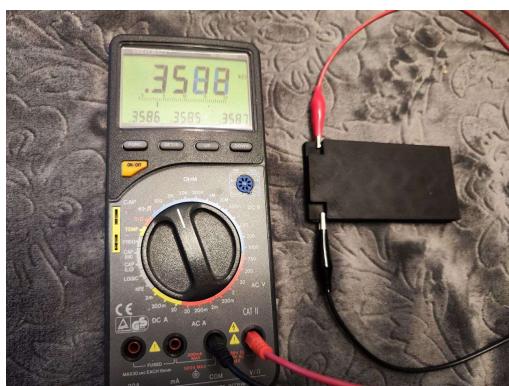


Abbildung 4: Widerstandswert bei Messung in 5 cm Abstand ohne Druck auf das Filament auszuüben

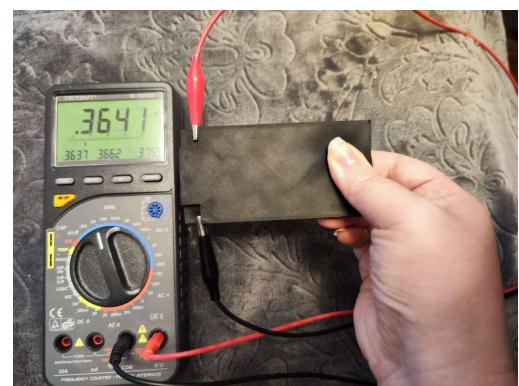


Abbildung 5: Widerstandswert bei Messung in 5 cm Abstand mit Druck auf der entfernten Seite



Abbildung 6: Widerstandswert bei Messung in 5 cm Abstand mit Druck zwischen den Klemmen



Abbildung 7: Widerstandswert bei Messung in 5 cm Abstand mit Druck in der Mitte

Werden die Anschlussklemmen des Multimeters, wie in Abbildung 4, Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7 ersichtlich, an der kurzen Seite gegenüber (in 5 cm Abstand) angeschlossen, liegen die Widerstandswerte zwischen rund 360 und 380 Ω.

4.1.2.2 Widerstandsmessung in 10 cm Abstand

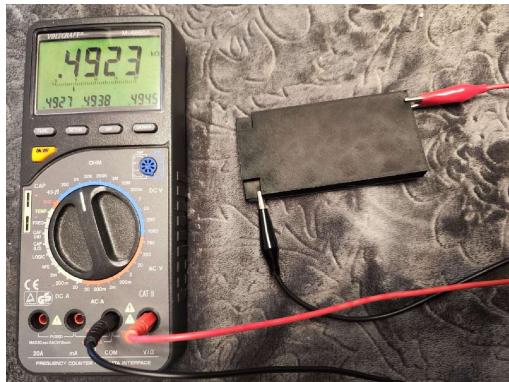


Abbildung 8: Widerstandswert bei Messung in 10 cm Abstand ohne Druck auf das Filament auszuüben

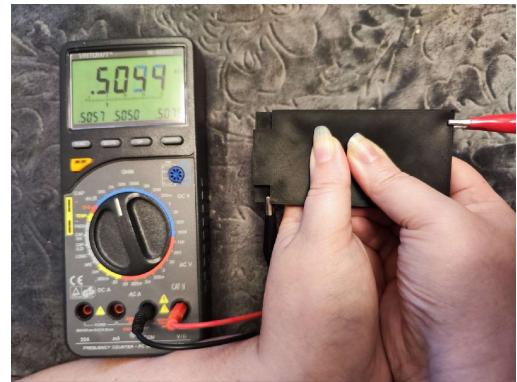


Abbildung 9: Widerstandswert bei Messung in 10 cm Abstand und Druck in der Mitte

Aufgrund der Ergebnisse aus den Messungen mit 5 cm Abstand erfolgte bei der Variante mit 10 cm Abstand eine verkürzte Messreihe. Verglichen wurde der Widerstandswert ohne Druck, wie in Abbildung 8 abgebildet, mit dem aus Abbildung 9, bei dem auf das Filament Druck in der Mitte ausgeübt wurde. Auch dabei zeigte sich, dass der Widerstandswert sich durch Ausübung von Druck nur geringfügig verändert und sich um den Wert von 500 Ω bewegt.

4.1.2.3 Erkenntnisse aus der Messung mit TPU-basiertem Filament

Aufgrund des Nichtvorhandenseins eines signifikanten Unterschiedes der oben aufgeführten Messungen kann rückgeschlossen werden, dass sich diese Methode beziehungsweise dieses Filament nicht dazu eignet, einen Sensor zur Anwesenheitskontrolle herzustellen. Wendet man mit dem TPU-basierten Filament dieselbe Methode an, die anschließend beim PLA-basierten-Filament erläutert wird, unterscheiden sich die Werte kaum von jenen des PLA-basierten Filaments, wie in 4.1.3 „Leitfähiges PLA-basiertes Filament“ dargestellt.

4.1.3 Leitfähiges PLA-basiertes Filament

Um die Annahme zu prüfen, dass eine Erhöhung des Widerstandes des Materials durch die Zusammenführung zweier gedruckter Platten (mit und ohne Druck) erzielt werden kann, wurden unterschiedlich große Platten verwendet und in den im Folgenden beschriebenen Messaufbauten getestet.

4.1.3.1 Messreihen zur Untersuchung der Leitfähigkeit mit standardisierten Größen

Als Vorbereitung für diesen Versuch wurden Platten mit 6x6 cm, 4x4 cm und 2x2 cm in der Dicke von 0,3 mm gedruckt.

Um den Widerstand zu messen, wurde, wie in Abbildung 10 gezeigt, an die gegenüberliegenden Seiten jeder Platte je eine Krokodilklemme angeschlossen und mit einem Ohmmeter verbunden. Die Klemmen ragten dabei 5 mm in die Platte hinein.

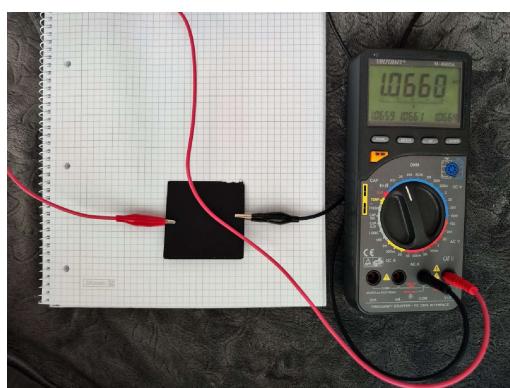


Abbildung 10: Versuchsaufbau für die Widerstandsmessung einer Platte

Der Widerstandswert sinkt kontinuierlich nach dem Anstecken um ca. 50Ω (Ohm), bis er sich zu stabilisieren schien. Es liegt die Vermutung nahe, dass sich die Klemmen durch den Druck der Feder, im Laufe der Zeit ins Material drücken.

Um die Schwankung des Widerstandswerts zu mitteln, wurden drei Messreihen durchgeführt und daraus der Mittelwert und die Standardabweichung gebildet.

Jeder Messwert wurde 5 Sekunden nach dem Anschließen der Klemmen abgelesen. Dies entsprach dem Zeitpunkt, ab dem der Widerstandswert nur noch langsam sank.

Tabelle 1: Mittelwerte und Standardabweichungen der Widerstandswerte unterschiedlich großer Platten (gerundet auf ganze Ohm)

| Plattengröße | Mittelwert in Ω | Standardabweichung in Ω |
|---------------------|--|--|
| 6 x 6 cm | 1023 | 35 |
| 4 x 4 cm | 843 | 42 |
| 2 x 2 cm | 670 | 36 |

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, sinkt der Widerstandswert mit abnehmender Plattengröße.

4.1.3.2 Messreihen zur Untersuchung der Leitfähigkeit bei variierendem Druck auf die Krokodilklemmen

Für diese Messreihen wurde die 6x6 cm große und 0,3 mm dicke PLA-Platte verwendet. Wie zuvor wurde jede Messung drei Mal durchgeführt, wodurch drei Messreihen entstanden. Daraus wurden jeweils Mittelwert und Standardabweichung, wie in Tabelle 2 erläutert, gebildet.

Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichungen der Widerstandswerte bei unterschiedlichem Druck auf die Krokodilklemmen (gerundet auf ganze Ohm)

| Druck | Mittelwert in Ω | Standardabweichung in Ω |
|-----------------------|--|--|
| Kein Druck | 1047 | 50 |
| Leichter Druck | 897 | 87 |
| Starker Druck | 820 | 56 |

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen, dass der Widerstandswert sowohl von der Größe und Dicke des gedruckten Objektes als auch von dem ausgeübten Druck auf die Krokodilklemmen abhängig ist. Dies kann als Hinweis gesehen werden, dass es möglich ist, einen Sensor mit dem vorliegenden PLA-Filament zu fertigen und über Druckausübung zu steuern. Weitere Untersuchungen wie die Folgenden sind sinnvoll.

4.1.4 Strommessung mit Spannungsquelle und LED

Mittels Strommessung mit Spannungsquelle wurde untersucht, ob über den Kontakt, der auftritt, wenn zwei Platten übereinandergelegt werden, eine LED betrieben werden kann. Dafür wurden eine 6x6 cm und eine 4x4 cm große Platte mit einer Dicke von 0,3 mm verwendet.

Das Netzgerät wird auf 5 V eingestellt. Daran wird über einen Widerstand von 220Ω eine LED angeschlossen. Der 220Ω -Widerstand stellt einen Mindestwiderstand dar, der das Zerstören der LED verhindern soll. In Serie dazu werden die beiden Platten angeschlossen.

Es wird einerseits eine Sichtkontrolle über die Leuchtstärke der LED durchgeführt und andererseits der Strom gemessen. Der Messaufbau ist in Abbildung 11 ersichtlich und die resultierenden Ergebnisse sieht man in Tabelle 3.

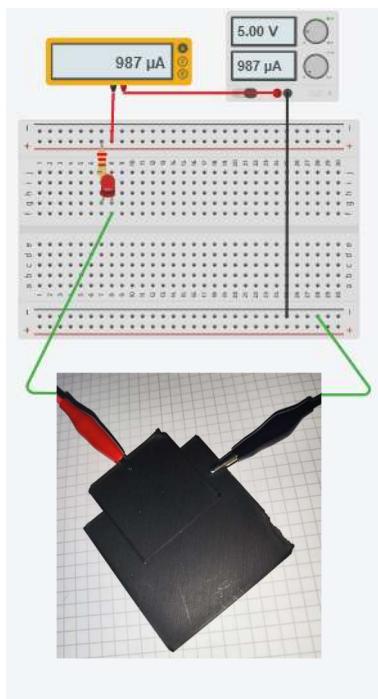


Abbildung 11: Messaufbau für den Betrieb einer LED mit zwei Platten aus leitfähigem PLA als Schalter

Tabelle 3: Widerstands- und Stromschwankungen sowie LED-Output beim Betrieb einer LED mit zwei Platten aus leitfähigem PLA als Schalter

| Druck | Widerstands-schwankung in kΩ | Strom-schwankung in mA | LED- Output |
|-----------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------|
| Kein Druck | 10 - 100 | 0,05 – 0,3 | <i>LED flackert</i> |
| Leichter Druck | 3 - 5 | 1 | <i>LED leuchtet gleichmäßig</i> |
| Starker Druck | 1,4 – 1,6 | 2,5 | <i>LED leuchtet gleichmäßig</i> |

Die Widerstandsschwankungen werden mit höherem Druck kleiner und damit der Wert konstanter. Bereits ein leichter Druck reicht für einen kontinuierlichen Stromfluss aus.

Überprüft man den gemessenen Strom mit jenem, den man über den gemessenen Widerstand über die nachstehende Formel berechnet, so stimmen die Ergebnisse gut überein. Die erwarteten Werte wurden erreicht.

$$I_{berechnet} = \frac{5V - U_{LED}}{R_{ges}} = \frac{5V - 1,8V}{R_V + R_{3D-Druck}} = \frac{3,2V}{220\Omega + R_{3D-Druck}}$$

Für $R_{3D-Druck}$ ist der Mittelwert der Widerstandsschwankung aus Tabelle 3 einzusetzen.

4.2 Sensormodelle

Bei der vorliegenden Arbeit sowie der dritten und vierten dualen Projektphase im Rahmen der Ausbildung Smart Engineering an der Fachhochschule St. Pölten wurden zwei Sensormodelle entwickelt, die im Rahmen dieser Bachelorarbeit getestet wurden und nun im Folgenden erläutert werden.

4.2.1 Aufbau der Elektronik der Sensormodelle

Dieses Kapitel widmet sich dem Aufbau des Sensormodells. Zu Beginn wird auf das Blockschaltbild eingegangen und im Weiteren werden die Funktion, die Berechnung sowie die Verbindung der einzelnen Komponenten beschrieben.

4.2.1.1 Blockdiagramm der Sensormodelle mit Erläuterung

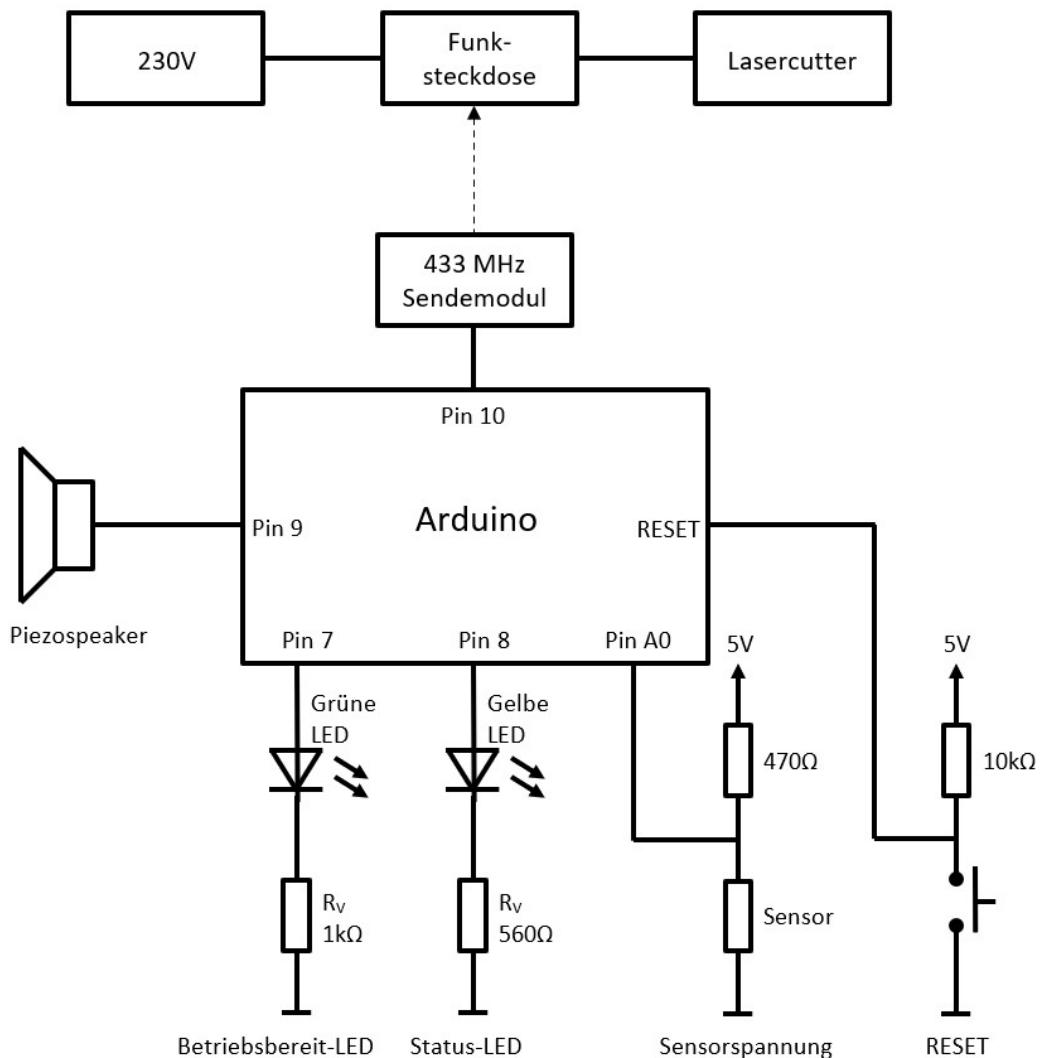


Abbildung 12: Blockschaltbild des Sensorsystems (Buzzer und Tower)

In Abbildung 12 ist das Blockschaltbild mit den eingesetzten Komponenten, die an den Arduino angeschlossen werden, dargestellt. Das zu überwachende Gerät, in diesem Fall der Lasercutter, ist über eine Funksteckdose an die 230 V-Steckdose angeschlossen. Die Funksteckdose kann prinzipiell über eine Fernbedienung geschaltet werden. Für diese Anwendung wird sie über ein 433 MHz-Sendemodul, das über einen Arduino angesteuert wird, geschaltet. Weiters ist der Arduino mit einer Betriebsbereitschafts-LED zur Anzeige, ob der Funkschalter aktiv ist, einer Status-LED zur Anzeige, dass der Sensor ausgelöst werden muss und einem Piezospeaker, der zusätzlich erinnert, dass der Sensor ausgelöst werden muss, verbunden. Über einen Taster kann der Arduino neu gestartet werden. Die Sensorspannung wird über einen Analogpin erfasst.

4.2.1.2 Anbringen der Kontakte für das Sensormodell „Buzzer“

Beim Anbringen der Kontakte wurden in einem Vorversuch zwei Ideen umgesetzt. Dabei handelt es sich einerseits um das Einschmelzen eines Pins und andererseits um das Einschmelzen eines Litzendrahts, wie in Abbildung 13 dargestellt.

Beide Konzepte wurden mit einem aus leitfähigem Material bestehenden 3D-gedruckten Objekt getestet.

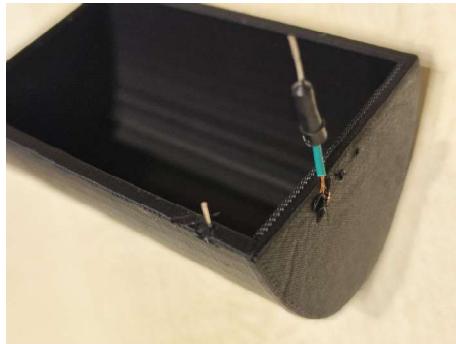


Abbildung 13: Testobjekt aus leitfähigem Filament mit eingeschmolzenem Pin und Litzendraht

Einschmelzen eines Pins

Der Pin wurde mit Hilfe eines Lötkolbens erhitzt, in das gedruckt Material gepresst und so mit dem leitfähigen Filament verbunden. Dabei zeigte sich eine deutliche Unzuverlässigkeit der Messdaten aufgrund des Wackelns des Pins im Filament.

Einschmelzen eines Litzendrahtes

Durch das Einschmelzen des Litzendrahtes entstand eine gute Verbindung mit dem leitfähigen Filament, weswegen entschieden wurde, diese Verbindungs-methode zu verwenden. Da Litzen dazu neigen, bei mehrmaligem Bewegen zu brechen, wurde die Verbindung mit Hilfe eines Isolierbandes stabilisiert.

4.2.1.3 LEDs zur Anzeige für Betriebsbereit und Status

Um anzuzeigen, dass das Gerät in Betrieb ist, wird eine grüne LED für Betriebsbereit (= BB), die die Betriebsbereitschaft kennzeichnet, verwendet. Diese signalisiert, dass die Funksteckdose und damit das Gerät eingeschaltet ist.

Zusätzlich wird eine gelbe Status-LED (= SL) eingebaut. Diese blinkt, wenn der Sensor 15 Sekunden nicht ausgelöst wird, weil die Person die Maschine entweder verlassen hat oder vergessen hat den Sensor zu betätigen. Danach bleiben noch 5 Sekunden Zeit, um den Sensor auszulösen und dadurch das Ausschalten der Maschine zu verhindern.

Beide LEDs werden über einen Digitalpin des Arduinos angesteuert, der bei HIGH 5 V liefert. Um den Strom korrekt einzustellen, ist ein Vorwiderstand R_V notwendig. Es wird ein Strom von 5 mA angenommen, damit die LED in ausreichender Helligkeit leuchtet, aber nicht zu viel Strom benötigt. Die grüne und die gelbe LED benötigen jeweils ca. 2 V Spannung.

$$R_V = \frac{5V - U_{LED}}{5mA} = \frac{5V - 2V}{5mA} = 600\Omega \rightarrow 560\Omega$$

Beim Testen der Helligkeiten der grünen und gelben LED wurde festgestellt, dass die grüne deutlich heller leuchtete. Deshalb wurde der Vorwiderstand der grünen LED so lange erhöht, bis diese in etwa gleich hell wie die gelbe LED leuchtete. Dadurch ergab sich für die grüne LED ein Vorwiderstand von 1 kΩ. Der Anschlussplan für die gelbe und grüne LED ist aus Abbildung 15 und Abbildung 14 ersichtlich.

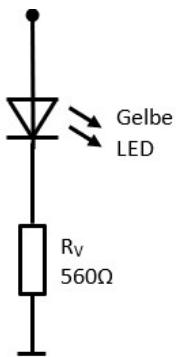


Abbildung 14: Anschluss der gelben Betriebsbereitschafts-LED an den Arduino

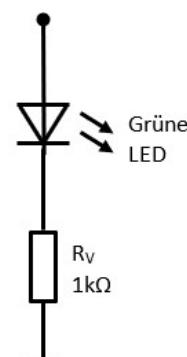


Abbildung 15: Anschluss der grünen Status-LED an den Arduino

4.2.1.4 Piezospeaker

Um den User zusätzlich zur gelben Status-LED darauf aufmerksam zu machen, dass der Sensor ausgelöst werden muss, wird ein Piezospeaker implementiert. Der Piezospeaker wird durch ein PWM-Signal angesteuert, das über einen PWM-Pin des Arduinos erzeugt wird und so einen Ton erzeugt. Nach Ertönen des Warnsignals bleiben noch 3,5 Sekunden Zeit, um den Sensor auszulösen und dadurch das Ausschalten der Maschine zu verhindern.

4.2.1.5 Reset

Der Funkschalter wird beim Einschalten des Arduinos in der Setup-Routine eingeschaltet. Nach dem Ausschalten des Funkschalters soll der Arduino neu gestartet und somit der Funkschalter wieder eingeschaltet werden. Da der Reset-Button des Arduinos nicht leicht zugänglich ist, wurde dies über den Reset-Pin und einen herausgeführten Taster mit Pullup-Widerstand umgesetzt. Ist der Taster nicht gedrückt, liegen über den Widerstand 5 V am Reset-Pin an. Wird der Taster gedrückt, wird der Reset-Pin über den Taster mit GND verbunden und es liegen 0 V am Reset-Pin an, wodurch der Arduino neu gestartet wird.

4.2.1.6 433 MHz-Sendemodul und Funksteckdose

Um die Funksteckdose ansprechen zu können, muss die korrekte Adresse, wie in Abbildung 16 ersichtlich, eingestellt werden. Dies erfolgt durch Einstellen der DIP-Schalter. Die Nummern 1 bis 5 sind zum Einstellen der Adresse. Diese Adresse muss im Programmcode eingestellt werden. Die Buchstaben A bis E sind zum Zuordnen für die Taste der Fernbedienung, die jedoch für dieses Projekt nicht verwendet wurde. Im Programmcode muss auch die Zuordnung korrekt gesetzt werden.



Abbildung 16: Funksteckdose mit DIP-Schaltern zur Konfiguration

Die Bibliothek RCSwitch.h ermöglicht die Nutzung der Befehle zum Schalten der Funksteckdose. Diese muss zu Beginn im Library Manager der Arduino IDE installiert werden.

Beim Testen wurde festgestellt, dass der Funkschalter nicht verlässlich ein- und ausschaltet. Deshalb wurde der entsprechende Code mehrfach gesendet. Dies verbesserte zwar die Schaltquote, führte aber noch immer zu einem unzufriedenstellenden Ergebnis. Ewald (2019) beschreibt, dass eine externe Antenne zu einem besseren Ergebnis führt. Deshalb wurde ein 17 cm langer Draht an den vorgesehenen Pin am 433 MHz-Sendemodul angelötet. Dies wurde umgesetzt (Abbildung 17), führte aber noch immer nicht zu einer zufriedenstellenden Schaltquote.

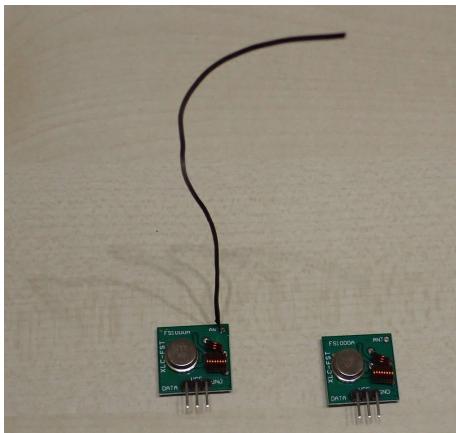


Abbildung 17: 433 MHz-Sendemodul mit und ohne Antenne

In weiteren Recherchen wurde herausgefunden, dass für Funksteckdosen unterschiedliche Einstellungen getroffen werden müssen. Diese Einstellungen können mit einem 433 MHz-Empfangsmodul ausgelesen werden. Grundlage dafür war das Beispielprogramm aus der RCSwitch-Bibliothek „ReceiveDemo_Advanced.ino“. Daraus ergeben sich die Einstellungen für den verwendeten Stecker „Protocol 1“ und „PulseLength 324“. Diese müssen im Setup nach dem Befehl „mySwitch.enableTransmit(10);“ gesetzt werden:

```
mySwitch.setProtocol(1);
mySwitch.setPulseLength(324);
```

Durch diese Maßnahme wurde der Funkschalter konsequent ein- und ausgeschaltet.

4.2.1.7 Gesamtaufbau der Elektronik

Der Aufbau wurde über ein Steckbrett, wie in Abbildung 18 dargestellt, umgesetzt. Die beiden langen Steckleisten wurden für +5V und GND, die aus dem Arduino bezogen wurden, verwendet. Daran wurden die einzelnen Blöcke laut Abbildung 12 angeschlossen und mit den entsprechenden Pins des Arduinos verbunden.

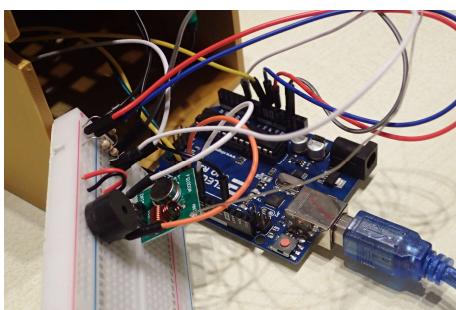


Abbildung 18: Umsetzung des Aufbaus mit Arduino und Steckbrett

4.2.2 Sensormodell „Buzzer“

Das Sensormodell „Buzzer“ besteht, wie in Abbildung 19, Abbildung 20 und Abbildung 21 dargestellt, aus einer Buzzerbox (1) mit einem einsteckbaren Buzzerunterteil (2) sowie einem aufgelegtem Buzzeroberteil (3). Um einen Zugang zur Elektronik zu schaffen, wurde die Buzzerbox unten offen gelassen und ein Boden (4) zum Verschließen vorgesehen.

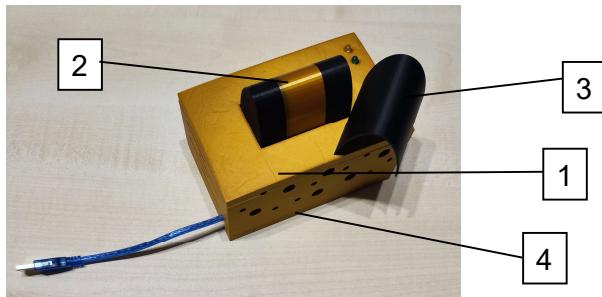


Abbildung 19: Außenansicht des gedruckten Sensormodelles „Buzzer“

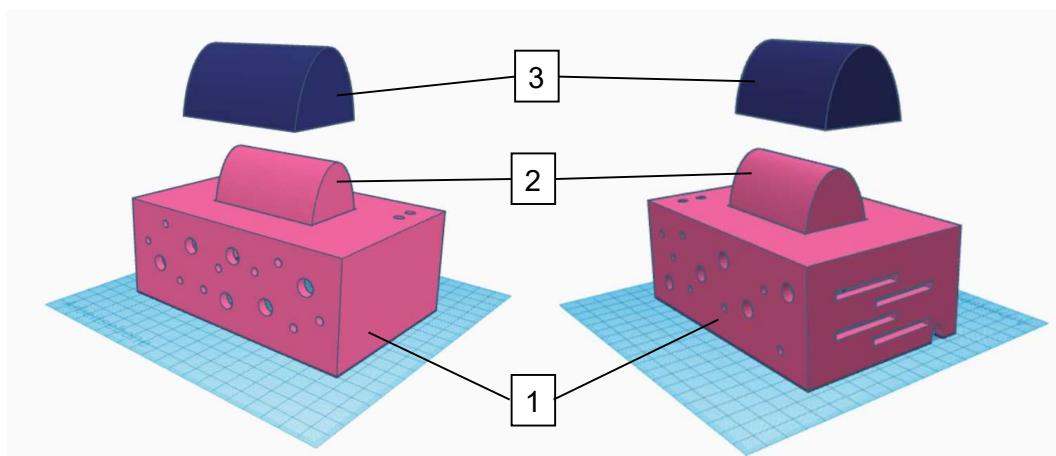


Abbildung 20: CAD-Modell der Vorderansicht des Sensormodells „Buzzer“

Abbildung 21: CAD-Modell der Rückansicht des Sensormodells „Buzzer“

Das Sensormodell „Buzzer“ besteht aus folgenden 3D-gedruckten Teilen:

- **Buzzerbox (1):** Die Buzzerbox besteht aus einem nichtleitenden PLA mit runden und schlitzförmigen Aussparungen zur Belüftung der elektronischen Bauteile, um einem Wärmestau vorzubeugen, sowie zwei Öffnungen für die benötigten LEDs. Eine Aussparung an der Oberseite der Buzzerbox bietet die Möglichkeit, den fixen Buzzerteil einzusetzen. Zusätzlich wurde ein Auslass für die Stromversorgung konstruiert.

- **Fixer Buzzerteil (2):** Der fixe Buzzerteil wurde so konstruiert, dass es in die Aussparung der Buzzerbox passt. Als Filamente wurden leitfähiges PLA mit nichtleitfähigem PLA abgewechselt, sodass durch den leitfähigen Buzzerteil ein Kontakt hergestellt werden kann.
- **Buzzerteil (3):** Der Buzzerteil wurde aus flexilem, leitfähigem Filament gedruckt, sodass dieser durch Druckausübung eine Verbindung der leitfähigen Teile des fixen Buzzerteiles erzielen kann.
- **Buzzerbox-Boden (4):** Der Buzzerbox-Boden wurde aus einem nichtleitenden PLA so konstruiert, dass die Buzzerbox passgenau aufgesetzt werden kann und daher ein Herausfallen der Bauteile verhindert. Auch hier wurde ein Auslass für die Stromversorgung konstruiert.

Um die Leitfähigkeit des Sensormodells „Buzzer“ herstellen zu können, wurde auf die nicht leitfähige Buzzerbox der fixe Buzzerteil gesetzt, der sich dadurch auszeichnetet, dass zwei leitfähig gedruckte Flächen (schwarz) durch eine nicht leitfähige Fläche (bronzefarben) unterbrochen sind. Legt man nun den leitfähigen, flexiblen Buzzerteil darauf und übt Druck aus, kann eine Leitfähigkeit hergestellt werden.

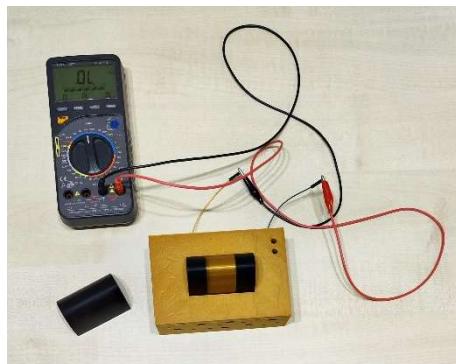


Abbildung 22: Widerstandswert beim Sensormodell „Buzzer“ ohne Buzzerteil

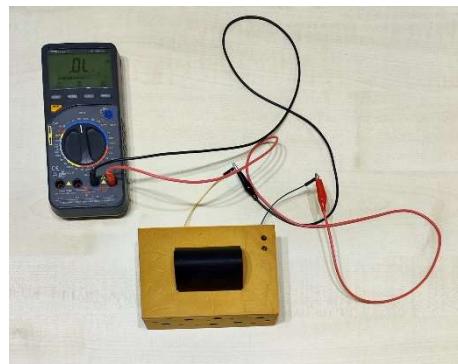


Abbildung 23: Widerstandswert beim Sensormodell „Buzzer“ mit Buzzerteil

Sowohl ohne als auch mit aufgesetztem Buzzerteil (ohne Druckausübung) ist der Widerstand, wie in Abbildung 22 und Abbildung 23 ersichtlich, konstant bei über 20 kΩ. Der Sensor leitet nicht.

Erst durch das Ausüben von Druck auf den Buzzerteil schließt sich die Verbindung und der Sensor wird mit den Widerstandswerten laut Tabelle 4 leitfähig:

Tabelle 4: Widerstandsschwankungen beim Sensormodell „Buzzer“

| Versuch | Druck von oben (Werte in kΩ) | Druck durch Umschließen (Werte in kΩ) |
|----------------|---|--|
| 1 | 0,53 | 0,40 |
| 2 | 0,51 | 0,65 |
| 3 | 0,49 | 0,32 |
| 4 | 0,52 | 1,50 |
| 5 | 0,66 | 0,44 |

Aus den kurzen Messreihen mit je fünf Versuchen liegt der Schluss nahe, dass der vorliegende Sensor bei einem Druck von oben konstantere Widerstandswerte liefert, als dies durch Umschließen mit der Hand (Druck von oben, vorne und hinten) der Fall ist.

4.2.3 Sensormodell „Tower“

Das Sensormodell „Tower“ besteht, wie in Abbildung 24, Abbildung 25 und Abbildung 26 dargestellt, aus der Towerbox (1), dem Towerbox-Boden (2) und einer in den Schlitz eingelegten flexiblen Matte (3).

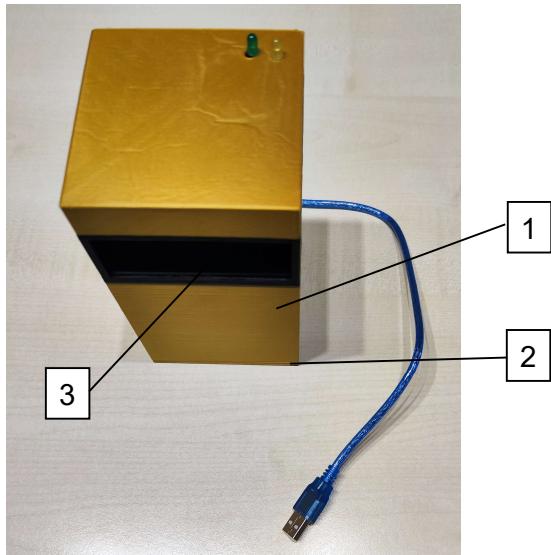


Abbildung 24: Außenansicht des gedruckten Sensormodelles „Tower“

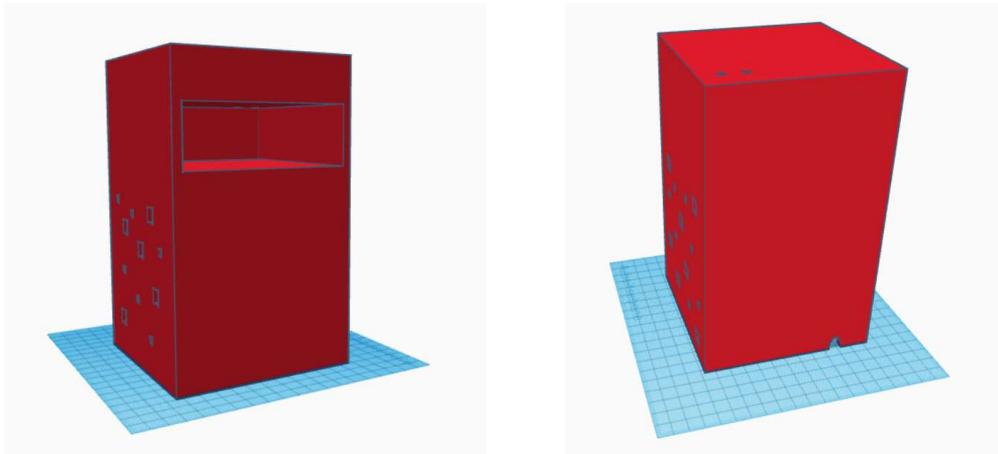


Abbildung 25: CAD-Modell der Vorderansicht des Sensormodelles „Tower“

Abbildung 26: CAD-Modell der Rückansicht des Sensormodelles „Tower“

Das Sensormodell „Tower“ besteht aus folgenden 3D-gedruckten Teilen:

- **Towerbox (1):** Die Towerbox besteht aus einem nichtleitenden PLA mit quadratischen Aussparungen zur Belüftung der elektronischen Bauteile, um einem Wärmestau vorzubeugen, sowie zwei Öffnungen für die benötigten LEDs. Im Bereich der großen Aussparung wurde leitfähiges PLA verwendet, um den eigentlichen Sensor zu beherbergen. Darin kann eine Matte aus flexiblem, leitfähigem Filament eingebracht werden. Zusätzlich wurde ein Auslass für die Stromversorgung konstruiert.
- **Towerbox-Boden (2):** Der Towerbox-Boden wurde aus einem nichtleitenden PLA so konstruiert, dass die Towerbox passgenau aufgesetzt werden kann und daher ein Herausfallen der Bauteile verhindert. Auch hier wurde ein Auslass für die Stromversorgung konstruiert.
- **Matte (3):** Die Matte wurde aus einem flexiblen, leitfähigen Filament gedruckt, ist 2mm dick und dient dazu, die Leitfähigkeit herzustellen.

Um die Leitfähigkeit des Sensormodells „Tower“ herstellen zu können, wurde in die aus nicht leitfähigem Filament gedruckte Towerbox ein 3 cm breiter Schlitz aus leitfähigem Filament integriert, das auch von diesem umgeben ist. In diesem Schlitz befindet sich eine flexible, leitfähige Matte. Durch einen Druck mit der Handfläche darauf, wie in Abbildung 28, wird der Widerstand zwischen Towerbox und Matte verringert und damit die Leitfähigkeit erhöht. Im hinteren Bereich des Towers befindet sich ein Spalt, der nach unten führt. Dieser dient als Kabelschacht für die LED-Anschlüsse und um das Anschlusskabel von der Matte nach unten zum Arduino zu führen.

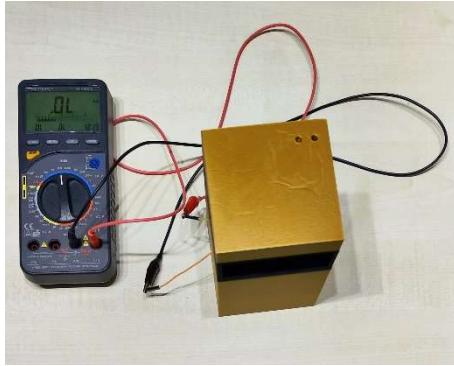


Abbildung 27: Widerstandswert beim Sensormodell „Tower“ ohne Druck

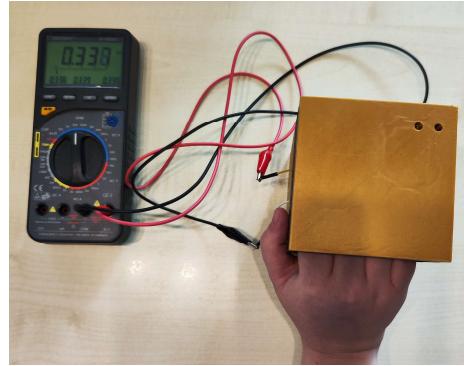


Abbildung 28: Widerstandswert beim Sensormodell „Tower“ mit Druck

Anders als beim Sensormodell „Buzzer“ liegt der Widerstandswert ohne Druck deutlich unter $20\text{ k}\Omega$. Deshalb wurde nach jedem Druck auch der Wert ohne Druck erfasst. Die Ergebnisse dieser fünf Messungen sind in Tabelle 5 ersichtlich. Es ergab sich ein mittlerer Wert ohne Druck von $3,3\text{ k}\Omega$ und mit Druck von $0,35\text{ k}\Omega$. Der Unterschied von ca. dem Faktor 10 ermöglicht dennoch eine ausreichend große Unterscheidung der beiden Zustände

Tabelle 5: Widerstandsschwankungen beim Sensormodell „Tower“

| Versuch | Ohne Druck (Werte in $\text{k}\Omega$) | Mit Druck (Werte in $\text{k}\Omega$) |
|----------------|--|---|
| 1 | 3,0 | 0,33 |
| 2 | 3,2 | 0,38 |
| 3 | 3,0 | 0,37 |
| 4 | 3,5 | 0,34 |
| 5 | 3,3 | 0,35 |

4.2.4 Anwendung der Sensoren mit Arduino

Der Sensor entspricht, wie in Abbildung 29 zu sehen ist, einem variablen Widerstand. Dieser kann mit Hilfe eines Spannungsteilers über einen Analogpin des Arduinos erfasst werden. Der zweite Widerstand sollte in etwa dem Widerstandswert des aktiven Sensors entsprechen. Deshalb wird ein Widerstand von 470Ω gewählt. Dieser liegt zwischen dem aktiven Sensormodell „Buzzer“-Wert (500Ω) und dem aktiven Sensormodell „Tower“-Wert (350Ω).

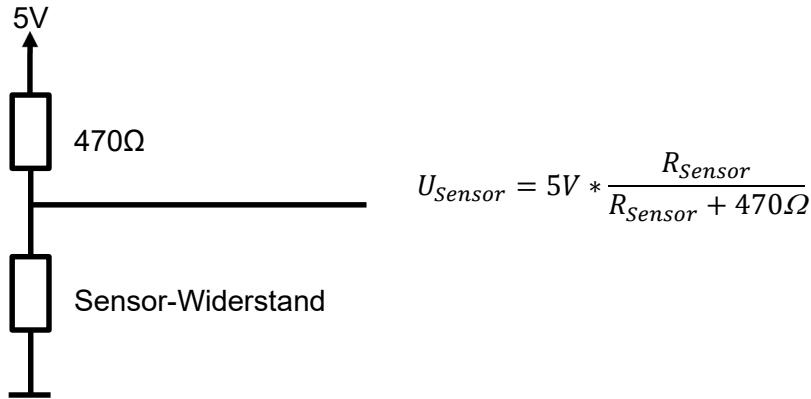


Abbildung 29: Schaltung zum Erfassen des Sensors und der Sensorspannung sowie der Spannungsteilerformel

Die Spannung am Widerstand kann über die Spannungsteilerformel aus Abbildung 29 berechnet werden.

Tabelle 6: Widerstands- und Spannungswerte der Sensormodelle „Buzzer“ und „Tower“ in gedrücktem und nicht gedrücktem Zustand

| | Sensor gedrückt | Sensor nicht gedrückt | | |
|----------|-----------------|-----------------------|------------------------|-------------|
| | R in Ω | U in Volt | R in Ω | U in V |
| „Buzzer“ | 500 | 2,58 | 10 000 – 20 000 000 | 4,77 – 5 |
| „Tower“ | 350 | 2,13 | 3 000 | 4,32 |

Aufgrund der in Tabelle 6 berechneten Spannungswerte sollte der Schwellenwert zwischen 2,6 V und 4,3 V liegen.

Es wurde ein Spannungswert von 4V gewählt und daraus die 10-Bit-Zahl berechnet.

$$10\text{-Bit-Zahl} = 1024 * \frac{4V}{5V} = 819$$

Für die Programmierung wurde als Schwellwert 820 gewählt. Beim Testen wurde festgestellt, dass beim Sensormodell „Buzzer“ der Sensor nicht immer ausgelöst wurde. Deshalb wurde der Wert auf 900 erhöht, was einer Spannung von 4,4V entspricht. Für das Sensormodell „Tower“ stellte sich der Wert von 820 als zuverlässig heraus.

4.2.5 Softwarekonzept

Das Softwarekonzept, wie es in Abbildung 30 dargestellt ist, basiert auf dem Konzept einer Finite State Machine. Eine Finite State Machine ist ein endlicher Automat beziehungsweise ein mathematisches Modell, der nur eine endliche Menge an Zuständen annehmen kann (Brilliant.org, 2023). Es hat damit endlich viele in diesem Fall sieben Zustände und sechs Übergänge.

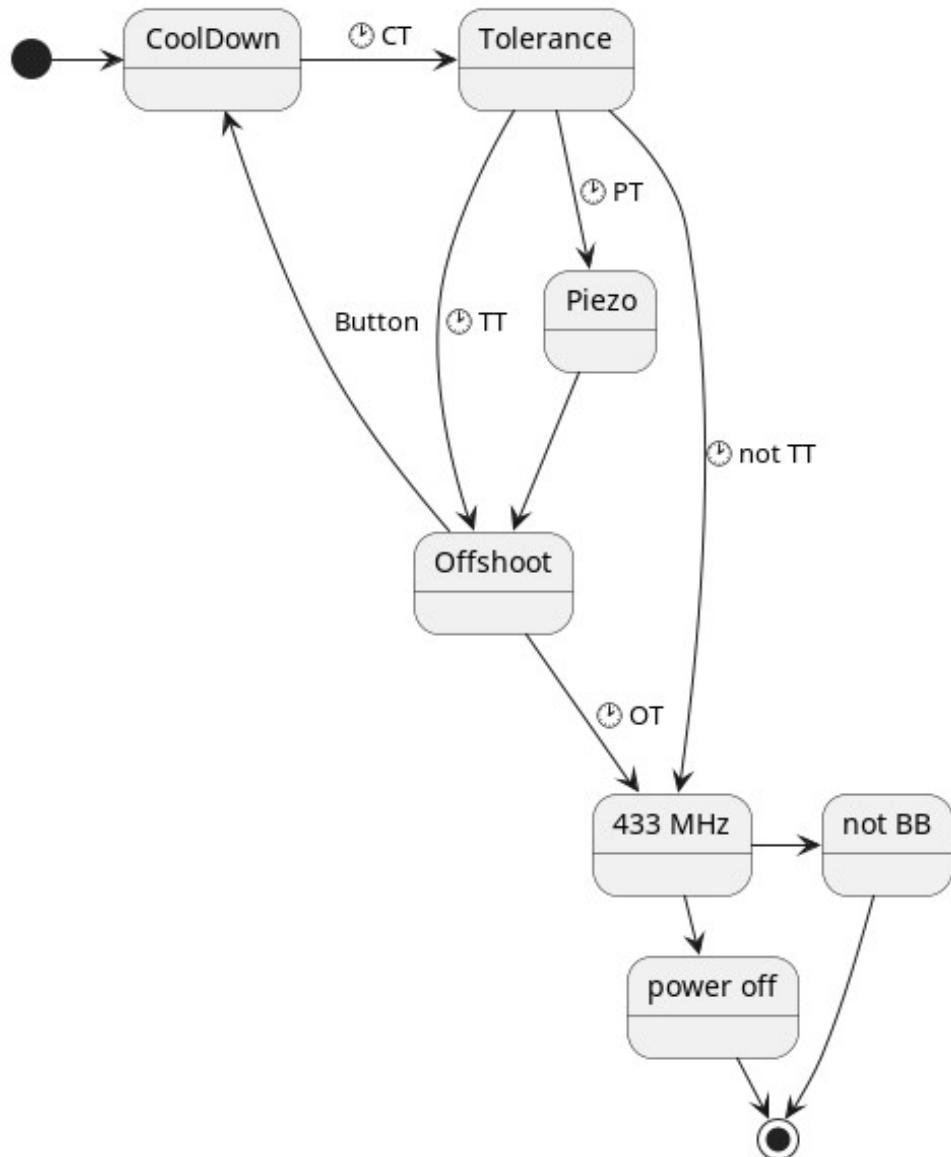


Abbildung 30: Finite State Machine der vorliegenden Sensoren

4.2.5.1 Finite State Machine und Begriffserklärung

Die Finite State Machine kennt sieben Status:

- **Coldown:** Im Status Cooldown ist der Sensor betriebsbereit und läuft.
- **Tolerance:** Innerhalb des Status Tolerance muss der Sensor aktiviert worden sein.
- **Piezo:** Im Status Piezo ist der Piezospeaker aktiv.
- **Offshoot:** Im Status Offshoot darf der Sensor nicht betätigt sein.
- **433 MHz:** Im Status 433 MHz wurde die Verbindung getrennt.
- **Not BB:** Im Status Not BB (= Nicht betriebsbereit) ist die Betriebsbereitschafts-LED (= grün) aus und der Sensor kann nicht verwendet werden.
- **Power off:** Im Status Power off ist der Strom deaktiviert.

Des Weiteren gibt es fünf Übergänge:

- **CT:** CT bezeichnet die Cooldown Time, also jene Zeit, in der keine Aktion der Nutzer:innen nötig ist. Sie führt vom Status Cooldown in den Status Tolerance.
- **TT:** TT bezeichnet die Tolerance-Time und ist damit jene Zeit, innerhalb derer die Aktion von den Nutzer:innen durchgeführt werden muss, um den Stromfluss nicht zu unterbrechen und damit die Funktion aufrecht zu erhalten. Innerhalb der TT blinkt die Status LED (= SL). TT führt vom Status Tolerance direkt zum Status Offshoot.
- **PT:** PT bezeichnet die Piezo-Time und beträgt TT/2. Während der Piezo-Time ist der Piezospeaker aktiv, um die Nutzer:innen zusätzlich zur blinkenden LED darauf aufmerksam zu machen, dass nun die Aktion stattfinden muss.
- **Not TT:** bezeichnet die Nicht Tolerance-Time und wird aktiviert, wenn die Nutzer:innen den Sensor nicht innerhalb der vorgegebenen TT aktivieren. Not TT führt vom Status Tolerance in den Status 433MHz.
- **OT:** bezeichnet die Offshoot-Time und wird aktiviert, wenn die Hand nicht vom Sensor genommen wird. Die Offshoot-Time führt vom Status Offshoot in den Status 433MHz über.
- **Button:** dieser Übergang wird aktiviert, wenn der Sensor innerhalb der vorgegebenen Zeit erfolgreich aktiviert wird, und führt vom Status Offshoot in den Status Cooldown.

4.2.6 Umsetzung des Softwarekonzepts

Der vollständige Programmcode befindet sich im Anhang dieser Arbeit. Nachfolgend wird die Umsetzung beschrieben. Zu Beginn werden die Werte für die Konstanten gesetzt.

Im nachfolgenden Codesnippet sind die Konstanten mit der Zeitzuweisung aufgelistet.

```
#define CT 15000 // Cooldown Time - Start Time until the sensor must be  
pressed (no action needed)  
#define TT 5000 // Tolerance Time - Time until the user must press the  
button  
#define PT 1500 // Piezo Time - Time until the piezo-tone starts  
#define OT 5000 // Offshoot Time - Time to release the sensor  
#define BT 500 // Blink Time for LEDs
```

Beim Starten des Arduinos werden in der Setup-Routine die verwendeten Pins gesetzt, die Ausgabe auf dem Serial Monitor gestartet, das 433 MHz-Sendemodul initialisiert und über die Sensor-Design-Auswahl die Schwellspannung gesetzt, bei der der Sensor als ausgelöst erkannt wird. Ebenfalls wird in der Setup-Routine noch die Betriebs-LED eingeschaltet sowie der Funkschalter über das 433 MHz-Sendemodul aktiviert.

Im Hauptprogramm werden die Status und die Übergänge gemäß des Konzepts der in Abbildung 30 dargestellten Finite State Machine abgearbeitet. Wie unter 4.2.1.6 „433 MHz-Sendemodul und Funksteckdose“ beschrieben, wird das Signal zum Ein- bzw. Ausschalten des Funkschalters mehrfach gesendet, damit der Vorgang zuverlässig ausgeführt wird. Das Signal wird jeweils fünfmal übertragen.

Zum Erheben der statistischen Daten wurden Parameter wie beispielsweise die Zeitdauer bis zum Sensorauslösen, bzw. bis dieser wieder losgelassen wurde, im Serial Monitor ausgegeben. Von dort aus können diese Werte für die Berechnung der statistischen Parameter herangezogen werden. Die statistische Analyse ist im nachfolgenden Kapitel 4.3 dokumentiert. Die Codezeilen zur Erhebung der statistischen Daten wurden nach dieser Auswertung wieder auskommentiert, weil sie für die Programmfunction nicht notwendig sind und sehr viel Speicherplatz am Mikrocontroller benötigen.

4.3 Zuverlässigkeit der Sensoren

Um die Zuverlässigkeit der Sensoren überprüfen zu können, wurde die oben beschriebene Funktion der Sensoren 100-mal getestet und die entsprechende Werte wurden erhoben und in eine Tabelle eingetragen. Erhoben wurde dabei, ob die Sensoren entsprechend der Erwartungen den Stromfluss aufrechterhalten solange der Sensor in den vorgegebenen Zeitintervallen betätigt wird. Zusätzlich wurde geprüft und eingetragen, ob der Sensor bei Nichtbetätigung innerhalb des

Zeitintervalls den Lasercutter wie geplant vom Strom trennt und damit die Funktion des Lasercutters völlig einstellt, um möglichen Gefahren wie zum Beispiel einem Brand vorzubeugen.

4.3.1 Sensormodell „Buzzer“

4.3.1.1 Zuverlässigkeit der Aufrechterhaltung des Stromflusses

Zur Überprüfung der Zuverlässigkeit der Aufrechterhaltung des Stromflusses beim Sensormodell „Buzzer“ wurde dieser 102-mal betätigt, um das Verhalten des Sensors zu überprüfen.

```
# Survived for 102 steps.  
# Tolerance Timers:  
tolerance = [1802, 1518, 1154, 1107, 3, 1114, 1358, 1204, 1466, 1076, 1877, 1905, 2071, 2012, 926, 1564,  
1592, 1560, 1123, 1987, 1264, 1767, 1014, 917, 2637, 1871, 1928, 2047, 1014, 1370, 1023, 1539, 1382, 1686,  
947, 1433, 1574, 1342, 1950, 2037, 1370, 1398, 1320, 1348, 1442, 1819, 1135, 1956, 1918, 1865, 1580, 2018,  
985, 1423, 1480, 1943, 1932, 1351, 1558, 1421, 776, 1408, 1439, 1433, 1743, 1915, 1563, 1170, 1424, 1041,  
876, 2005, 910, 1480, 1410, 1370, 816, 1238, 1080, 1965, 1458, 1386, 1693, 1207, 867, 1388, 3, 1846, 934, 1420,  
3, 1583, 1599, 1260, 1717, 1906, 1057, 949, 1439, 1640, 2121]  
# Avg 1415.79  
# Offshoot Timers:  
offshoot = [431, 274, 272, 287, 2055, 10, 243, 219, 207, 219, 94, 185, 60, 67, 106, 72, 82, 82, 62, 72, 63, 110,  
69, 59, 157, 4, 4, 9, 85, 288, 216, 78, 70, 123, 73, 56, 103, 66, 76, 47, 62, 92, 79, 5, 57, 59, 4, 62, 10, 79, 72, 57, 4,  
61, 4, 60, 53, 75, 116, 66, 64, 116, 94, 63, 68, 63, 67, 79, 66, 64, 94, 51, 57, 50, 39, 61, 76, 94, 13, 79, 63, 70, 63, 66,  
66, 70, 2040, 66, 120, 82, 1733, 135, 229, 134, 126, 107, 73, 157, 208, 120, 193, 101]  
# Avg: 149.13
```

Abbildung 31: Überprüfung der Zuverlässigkeit der Aufrechterhaltung des Stromflusses beim Sensormodell „Buzzer“

Die Ergebnisse in Abbildung 31 zeigen, dass der Sensor bei den 102 Versuchen 102-mal richtig reagierte und den Stromfluss weiterhin aufrechterhielt. Das entspricht 100 Prozent. Zusätzlich ist ersichtlich, dass der Sensor im Durchschnitt nach 1414,79 Millisekunden nach Beginn des Blinkens der gelben LED betätigt wurde und im Durchschnitt nach 149,13 Millisekunden die Hand wieder vom Sensor genommen wurde.

Anhand dieses Ergebnisses kann rückgeschlossen werden, dass es bei sachgemäßer Handhabung des Sensors als sichergestellt gilt, dass das Sensormodell „Buzzer“ den Stromfluss richtigerweise aufrechterhält und daher kein Risiko auf einen ungewünschten Abbruch birgt.

4.3.1.2 Zuverlässigkeit der Trennung des Stromflusses

Zur Überprüfung der Zuverlässigkeit der Trennung des Stromflusses bei Nichtbetätigung beziehungsweise nicht-rechtzeitiger Betätigung des Sensormodells „Buzzer“ wurde dieser in 100 Versuchen nicht betätigt.

In 100 Fällen (100%) löste das 433 MHz-Sendemodul beim ersten Sendepaket aus. Dieses Sendepaket enthält fünf Abbruchsbefehle, in 97 Fällen (97%) direkt beim ersten Sendeversuch.

Anhand dieses Ergebnisses kann rückgeschlossen werden, dass das Sensormodell „Buzzer“ den Stromfluss zuverlässig trennt und daher eine adäquate Anwesenheitskontrolle darstellt.

4.3.2 Sensormodell „Tower“

4.3.2.1 Zuverlässigkeit der Aufrechterhaltung des Stromflusses

Zur Überprüfung der Zuverlässigkeit der Aufrechterhaltung des Stromflusses beim Sensormodell „Tower“ wurde dieser 102-mal betätigt, um das Verhalten des Sensors zu überprüfen.

```
# Survived for 102 steps.
# Tolerance Timers:
tolerance = [1082, 798, 1470, 1285, 1640, 748, 707, 2090, 736, 1705, 2720, 1318, 2735, 542, 566, 4560,
1175, 2394, 359, 363, 1238, 425, 2597, 1058, 506, 1526, 335, 2393, 1023, 385, 2816, 1539, 666, 2422, 1172,
2096, 428, 1937, 1317, 465, 1912, 1376, 1395, 2382, 1844, 703, 1204, 1714, 688, 731, 2466, 2544, 1965, 1865
, 1717, 1308, 1695, 1734, 2590, 2543, 722, 2544, 1079, 760, 2600, 2945, 1327, 1895, 2383, 291, 1595, 1552,
1336, 1725, 1202, 3047, 2397, 1387, 2887, 2285, 1559, 1233, 1609, 1589, 1730, 891, 390, 1364, 2692, 1516,
1261, 1521, 766, 1051, 1905, 1405, 415, 735, 2096, 1292, 2284, 1886]
# Avg 1519.37
# Offshoot Timers:
offshoot = [182, 64, 166, 141, 3, 129, 116, 197, 129, 151, 284, 88, 178, 216, 160, 147, 94, 163, 126, 110, 105,
104, 20, 85, 105, 61, 107, 104, 98, 57, 8, 7, 1374, 6, 89, 85, 79, 66, 7, 85, 100, 10, 110, 94, 115, 95, 73, 51, 82,
96, 101, 94, 4, 91, 70, 91, 92, 97, 76, 8, 85, 72, 70, 7, 7, 81, 7, 111, 76, 28, 7, 8, 4, 7, 59, 76, 7, 94, 8, 47, 91, 74,
65, 4, 4, 57, 51, 3, 34, 86, 82, 33, 4, 61, 4, 4, 4, 76, 56, 94, 91, 91]
# Avg: 87.97
```

Abbildung 32: Überprüfung der Zuverlässigkeit der Aufrechterhaltung des Stromflusses beim Sensormodell „Tower“

Die Ergebnisse in Abbildung 32 zeigen, dass der Sensor bei den 102 Versuchen 102-mal richtig reagierte und den Stromfluss weiterhin aufrechterhielt. Das entspricht 100 Prozent. Zusätzlich ist ersichtlich, dass der Sensor im Durchschnitt nach 1519,37 Millisekunden nach Beginn des Blinkens der gelben LED betätigt wurde und im Durchschnitt nach 87,97 Millisekunden die Hand wieder vom Sensor genommen wurde.

Anhand dieses Ergebnisses kann rückgeschlossen werden, dass es bei sachgemäßer Handhabung des Sensors als sichergestellt gilt, dass das Sensormodell „Tower“ den Stromfluss richtigerweise aufrechterhält und daher kein Risiko auf einen unerwünschten Abbruch birgt.

4.3.2.2 Zuverlässigkeit der Trennung des Stromflusses

Zur Überprüfung der Zuverlässigkeit der Trennung des Stromflusses bei Nichtbetätigung beziehungsweise nicht-rechtzeitiger Betätigung des Sensormodells „Tower“ wurde dieser in 100 Versuchen nicht betätigt.

In 100 Fällen (100%) löste das 433 MHz-Sendemodul beim ersten Sendepaket aus. Dieses Sendepaket enthält fünf Abbruchsbefehle, in 98 Fällen (98%) direkt beim ersten Sendeversuch.

Anhand dieses Ergebnisses kann rückgeschlossen werden, dass das Sensormodell „Buzzer“ den Stromfluss zuverlässig trennt und daher eine adäquate Anwesenheitskontrolle darstellt.

4.4 Analyse und Ergebnisse der Nutzer:innenbedürfnisse

Die Nutzer:innenbedürfnisse in Bezug auf den Sensor zur Anwesenheitskontrolle wurden anhand eines Fragebogens und eines Beobachtungsbogens, wie dies auch bei anderen Usability-Test, etwa bei Greifeneder et al. (2011), beschrieben ist sowie der Möglichkeit, zwei verschiedene Sensoren zu testen, erhoben.

Insgesamt wurden die Sensoren mit Hilfe von 34 Personen evaluiert. 100% der Daten können als gültig angesehen werden und flossen in die Auswertung ein. Ein Datensatz wurde dann als gültig angesehen, wenn kein unvorhersehbarer Abbruch von Seiten der Testperson stattgefunden hat sowie die Sensoren erwartungsgemäß funktioniert haben. Im Zuge der Voruntersuchungen im Rahmen des vierten dualen Projektes an der Fachhochschule St. Pölten konnten Erkenntnisse gewonnen werden, die direkt in den Fragebogen und die Vorgehensweise für die vorliegende Arbeit eingeflossen sind. Zum Einen wurde der Fragebogen um als redundant erlebte Fragen gekürzt und der Modus insofern geändert, dass der Fragebogen vom Testleiter ausgefüllt wurde und zum Anderen wurden den Testpersonen für die Untersuchung die Sensoren alternierend vorgelegt. Das bedeutet, dass 50% der Testpersonen (das waren 17 Personen) die Untersuchung mit dem Sensormodell „Buzzer“ begannen und die anderen 17 Personen mit dem Sensormodell „Tower“. So sollte den Äußerungen der Testpersonen entgegengewirkt werden, dass hier ein Lerneffekt vorliegen könnte.

Während der Testdurchläufe wurden die Personen dazu angehalten, ein beliebiges Video anzusehen. Dies sollte simulieren, dass die Nutzer:innen nicht die ganze Aufmerksamkeit beim Sensor haben, da ihre Aufmerksamkeit bei der Arbeit des Lasercutters liegen soll. Die Sensoren sollen, um einen Beitrag zur Sicherheit der Nutzung leisten zu können, auch unter ablenkenden Bedingungen bedient werden können.

4.4.1 Fragebogen

Die Auswertung der Fragebögen ergab, dass die Mehrheit der Nutzer:innen (88,24 Prozent), das waren 30 Personen, das Sensormodell „Buzzer“ bevorzugte.

Folgende Vor- und Nachteile wurden dem bevorzugten Sensormodell „Buzzer“ zugeordnet und unten in Tabelle 7 und Tabelle 8 zusammengefasst. Dabei wurden die Antworten sinngemäß zusammengefasst, sodass sich folgende Ergebnisse ergaben. Die Werte in Klammer geben die absolute Häufigkeit an.

Tabelle 7: Genannte Vorteile des Sensormodell "Buzzer"

| Vorteile |
|--|
| <i>Bessere Erreichbarkeit des Sensors (27)</i> |
| <i>Bessere Optik (20)</i> |

Tabelle 8: Genannte Nachteile des Sensormodell "Buzzer"

| Nachteile |
|---|
| <i>Der Buzzerteil kann leicht verloren gehen (16)</i> |
| <i>Schlechtere Optik (6)</i> |
| <i>Falsche Größe / zu klein für die Hand (1)</i> |

Insgesamt sahen damit die Nutzer:innen den Hauptvorteil des Sensors „Buzzer“ an der besseren Erreichbarkeit, da man zur Betätigung des Sensors nicht in den Tower hineingreifen muss, sondern dieser direkt zugänglich ist. Ebenfalls häufig erwähnt wurde die Gefahr, dass beim Sensormodell „Buzzer“ jener Teil leicht verloren gehen kann, der die Verbindung herstellt und damit für die Funktionsfähigkeit des Sensors unerlässlich ist.

Auf die Frage, ob bei den Sensoren etwas verändert werden sollte, antworteten 6 Personen mit „Nein“ (17,65 Prozent) und 28 Personen mit „Ja“ (82,35 Prozent). Insgesamt wurden 31 Änderungsvorschläge gemacht. Von Änderungsvorschlägen war das Sensormodell „Tower“ mit 87,10% der gemachten Änderungsvorschläge besonders betroffen. Diese wurden thematisch zusammengefasst und in Tabelle 9 und Tabelle 10 für die jeweiligen Sensormodelle dargestellt.

4 Datenerhebung und Ergebnisse

Tabelle 9: Genannte Veränderungsvorschläge für das Sensormodell "Buzzer"

| Vorschläge für das Sensormodell „Buzzer“ | |
|---|--|
| „Befestigen“ des Buzzerteils (3) | |
| Buzzer vergrößern (1) | |

Tabelle 10: Genannte Veränderungsvorschläge für das Sensormodell "Tower"

| Vorschläge für das Sensormodell „Tower“ | |
|---|--|
| Bessere Erreichbarkeit des Sensors - offen oder mit größerem Schlitz (27) | |

Auf die Frage nach der Sinnhaftigkeit der Verwendung eines solchen Sensors im Use-Case Lasercutter an der Fachhochschule St. Pölten, antworteten 34 Personen mit „Ja“ (100 Prozent) und 0 Personen reagierten mit Ablehnung (0 Prozent). Dies lässt sich laut Befragung unter anderem durch die Einsicht erklären, dass Sicherheit, vor allem in Bezug auf eine Brandprävention, sinnvoll und wichtig ist. Dennoch gaben 11 Personen (32,35 Prozent) an, dass sie selbst die Maßnahme einer Anwesenheitskontrolle nicht brauchen würden.

Insgesamt antworteten nur 2 Personen (5,88 Prozent) bei der Rubik „Weitere Eindrücke“ und nannten Folgendes:

Tabelle 11: Angaben zu weiteren Eindrücken

| Weitere Eindrücke der Testpersonen |
|--|
| „Ist eine gute Idee, weil man dann wirklich daneben stehen bleibt.“ |
| „Wenn man lange an der Maschine arbeiten muss, wird es sicher lästig – sinnvoll ist es aber halt trotzdem“ |

Bezogen auf diese Ergebnisse, kann zusammenfassend rückgeschlossen werden, dass sich ein Großteil der Nutzer:innen eine Designüberarbeitung des Sensormodells „Tower“ in Hinsicht auf eine einfachere Benutzbarkeit wünscht, wohingegen die Nutzer:innen mit dem Sensormodell „Buzzer“ sehr zufrieden sind. Nur eine Person wünscht sich eine Vergrößerung des Sensors. Insgesamt bevorzugen die Nutzer:innen das Sensormodell „Buzzer“ gegenüber dem Sensormodell „Tower“.

4.4.2 Beobachtungsbogen

Die Nutzer:innen testeten jedes der zwei Sensormodelle für jeweils drei Minuten und wurden dabei von einem Testleiter beobachtet. Dieser füllte je Testperson und je Sensor einen Beobachtungsbogen aus. Die Vorlage des Beobachtungsbogens findet sich im Anhang.

Im Zuge der Beobachtung konnte erkannt werden, dass die Mehrheit der Nutzer:innen (85,29 Prozent), das sind 29 Personen, mit der Benutzung der Sensormodelle gut zureckkam und die Tests bis zum Ende (Ablauf der drei Minuten) durchgeführt werden konnten und der Test nur in 5 Fällen, also 14,71 Prozent, vom System abgebrochen wurde. 20% der Abbrüche konnten beim Sensormodell „Buzzer“ beobachtet werden und entsprechend 80% beim Sensormodell „Tower“.

Beim Testen des Sensormodelles „Buzzer“ kam es bei 8 Personen zu insgesamt 11 Äußerungen in Zusammenhang mit der Testung. Von den erfassten Äußerungen waren 5 (das sind 45,45%) mit Ärger konnotierte Äußerungen. 100% der Äußerungen, die mit Ärger konnotierbar sind, wurden beim Testen des Sensormodelles „Tower“ geäußert. Insgesamt kam es damit beim Sensormodell „Tower“ zu mehr Äußerungen im Zuge der Testung.

Die Rückmeldungen der Testpersonen bezogen auf die beiden Sensormodelle finden sich in Tabelle 12. Diese wurden inhaltlich zusammengefasst und die Zahlen in Klammer entsprechen den absoluten Häufigkeiten:

Tabelle 12: Rückmeldung der Nutzer:innen im Zuge des Beobachtungsbogens

| Rückmeldungen der Testpersonen |
|---|
| Zu geringe Größe des Sensorschlitzes beim Tower (3) |
| Unangenehme Geschlossenheit des Sensormodells Tower (2) |
| Wahrnehmung von Spaß beim Bedienen des Sensors – bei beiden Modellen (2) |
| Wahrnehmung der Sinnhaftigkeit der Verwendung eines Anwesenheitssensors (4) |

Bezogen auf diese Ergebnisse kann zusammenfassend gesagt werden, dass beide Sensormodelle von den Nutzer:innen gut verwendet werden konnten und eine Mehrheit der Testpersonen die Sensoren bis zum Ende der drei Minuten problemlos betreiben konnten. Auffällig dabei war, dass die Testpersonen mit dem Sensormodell „Buzzer“ leichter zureckkamen. Nur bei einer Person kam es zum Abbruch.

5 Fazit und Ausblick

Im Folgenden und damit letzten Kapitel der vorliegenden Bachelorarbeit folgt eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse sowie die Beantwortung der anfangs aufgestellten Forschungsfragen. Zusätzlich wird auf die gewonnenen Erkenntnisse wie Lessons Learned, mögliche Einschränkungen sowie Hinweise auf weitere notwendige beziehungsweise von der Autorin als sinnvoll erachtete Forschung gegeben.

5.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Im Folgenden sollen die anfangs aufgestellten Forschungsfragen unter Berücksichtigung der Literatur und der vorliegenden Forschungsergebnisse beantwortet werden.

5.1.1 Hauptforschungsfrage

Wie kann ein individualisierter Sensor aus leitfähigem 3D-Filament hergestellt werden, um Daten zur Anwesenheit von Personen generieren zu können?

Das dahinterliegende Grundprinzip ist das eines Schalters, bei dem mittels leitfähigem Material eine nicht leitende Stelle überbrückt wird. Im Falle der im Rahmen dieser Bachelorarbeit konstruierten Sensoren wurde die nichtleitende Stelle mit Standard-PLA und die leitfähige Verbindung mit leitfähigem Filament gedruckt. Die individuelle Gestaltung des Sensors ermöglicht wie im Kapitel 4.4 „Analyse und Ergebnisse der Nutzer:innenbedürfnisse“ eine hohe Akzeptanz durch die Nutzer:innen.

5.1.2 Nebenforschungsfrage 1

Welches 3D-Filament weist eine geeignete Leitfähigkeit auf, um daraus einen Sensor wie oben beschrieben entwickeln zu können?

Im Rahmen der Recherchen für die vorliegende Arbeit konnten sowohl ein elektrisch leitfähiges 3D-Druckfilament auf der Basis von PLA, das die erforderlichen Kriterien erfüllt, als auch ein flexibles elektrisch leitfähiges 3D-Druckfilament mit ähnlichen Eigenschaften gefunden werden. Die verwendeten Filamente finden sich unter 3.2.3 „3D-Drucker und Filamente“.

5.1.3 Nebenforschungsfrage 2

Welche Anforderungen haben potenzielle Nutzer:innen an einen Sensor aus leitfähigem 3D-Filament in Bezug auf Größe und Form?

Durch die durchgeführten Untersuchungen mit potenziellen Nutzer:innen sowie deren Befragung und Beobachtung konnte festgestellt werden, dass die Größen, die aufgrund der benötigten Elektronikteile benötigt werden, auch für die Nutzer:innen sinnvolle Größen darstellen. Lediglich eine Testperson hätte sich einen größeren Sensor gewünscht. Die häufigste Aussage in Bezug auf die Sensoren bezog sich auf die Erreichbarkeit des Sensors beim Sensormodell „Tower“. Hier gab es Wünsche in Bezug auf eine Erweiterung des Sensorschlitzes oder einer generell offener gestalteten Form.

5.1.4 Nebenforschungsfrage 3

Welche Möglichkeiten der Umsetzung des Sensors ergeben sich durch die unterschiedlichen Materialien?

Die Kombination von Standard-PLA und elektrisch leitfähigem PLA ergibt viele individualisierbare Gestaltungsmöglichkeiten durch abwechselnden Druck dieser Materialien. Speziell in Kombination mit elektrisch leitfähigem, flexiblem Filament lassen sich durch geschickte Materialkombinationen variable, leitfähige Stellen konstruieren, die somit als Sensor eingesetzt werden können. Unter 4.2.2 „Sensormodell „Buzzer“ und 4.2.3 „Sensormodell „Tower““ werden zwei mögliche Designs zur Realisierung eines individualisierbaren Sensors vorgestellt.

5.1.5 Nebenforschungsfrage 4

Wie können die gewonnenen Erkenntnisse für den Use-Case des Lasercutters an der Fachhochschule St. Pölten umgesetzt werden?

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass die beiden entwickelten Sensormodelle konsequent auslösen und bei ausbleibendem Sensordruck der Funkschalter zuverlässig ausgeschaltet wird. Damit kann ein an diese Funksteckdose angeschlossenes Gerät überwacht werden kann.

5.2 Lessons learned und Empfehlung

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass elektrisch leitfähiges Filament in Kombination mit Standard-Filament zur Herstellung eines Sensors für den Einsatz im industriellen Umfeld geeignet ist. Beide hier entwickelten Modelle eignen sich für den Einsatz als Sensor hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit und der Nutzer:innenakzeptanz. Jedoch zeigte sich eine klare Präferenz der Nutzer:innen

für das Sensormodell „Buzzer“. Zusätzlich konnten beim Sensormodell „Buzzer“ bessere Zeitergebnisse hinsichtlich der benötigten Zeit bis zum Drücken des Sensors nach erstmaligem Aufleuchten der LED in den Testdurchläufen erzielt werden. Anhand dieser Ergebnisse erscheint es sinnvoll, für zukünftige Testungen sowie Weiterentwicklungen eine Orientierung nach dem Sensormodell „Buzzer“ vorzunehmen. Nachfolgend werden einige Verbesserungs- bzw. Erweiterungsoptionen dargestellt.

Bei dem hier vorliegenden Testaufbau ist die Anschlussleistung der verwendeten Funksteckdose, die bei 1 kW liegt, eine wesentliche Einschränkung. Für den Betrieb eines Lasercutters ist eine Funksteckdose mit höherer Anschlussleistung notwendig. Des Weiteren wurde der Testaufbau, wie unter 4.2.1.7 beschrieben, mit einem Steckbrett und Steckkabeln realisiert. Durch Transport oder Bewegung des Sensors können sich Kabel lösen und den Sensor somit unbrauchbar machen. Dies kann sich sowohl im Ausschalten trotz Drückens des Sensors als auch im Nichteinschalten der Funksteckdose äußern. Kleinere Auswirkungen wären das Außerkraftsetzen der LEDs oder des Piezospeakers. Eine Verbesserung dafür sollte die Umsetzung mit Lötverbindungen bringen.

Mit der derzeitigen Umsetzung kann die Anwesenheitskontrolle trotz bereits vieler eingebauter Mechanismen wie zum Beispiel der Erfordernis, dass die Hand auch wieder vom Sensor gehoben werden muss und damit kein Gegenstand auf den Sensor gelegt werden kann (4.2.5 „Softwarekonzept“), noch umgangen werden. So kann der Arduino gestartet und damit die Funksteckdose im Setup eingeschaltet werden. Wird der Arduino anschließend sofort abgesteckt, kann der weitere Programmcode nicht mehr ausgeführt werden und die Anwesenheitskontrolle wird außer Kraft gesetzt. Hier könnte man das System so ändern, dass der Zugang zur Stromversorgung des Arduinos versperrt wird.

Ein weiteres Problem der derzeitigen Bauform des Sensormodells „Buzzer“ stellt der zweiteilige Aufbau dar. Der leitfähige Oberteil ist nicht mit dem Hauptteil des Sensors verbunden, wodurch dieser abhandenkommen kann. Eine Verbindung der beiden Teile könnte eine Abhilfe schaffen. Bezuglich der Bauform könnte auch die Verwendung eines kleineren Mikrocontrollers eine Verbesserung ermöglichen. Speziell beim Sensormodell „Tower“ wären dadurch eine deutlich kleinere Bauform und eine damit verbundene Materialeinsparung möglich.

Bei der Fertigung der Sensoren kommt auch flexibles Filament zum Einsatz. Aufgrund der Materialeigenschaften kann es, wie in Kapitel 2.1.2 „Häufige Fehlerquellen beim 3D-Druck“ beschrieben, leicht zur Verstopfung der Druckdüse und somit zu einem Fehldruck kommen. Deshalb ist es wichtig, sich vor dem Drucken mit flexiblem Material damit zu beschäftigen. Für den praktischen Einsatz des Sensors zur Anwesenheitskontrolle ist es sinnvoll, zuvor die Anwendung des

Sensors an einem Modell zu üben und sich mit der Funktionsweise vertraut zu machen, um so unnötige Fehlabbrüche zu vermeiden.

Aufbauend auf diese Arbeit sollte auch die Alterung des Materials näher untersucht werden. Es könnte ein Einfluss entstehen, wenn der Sensor sehr oft betätigt wird oder das Material mehrere Jahre alt ist. Um dies herauszufinden, wäre ein Langzeittest im realen Umfeld anzudenken. Bezuglich der Funkübertragung sollten noch weitere Tests an anderen Orten durchgeführt werden. Speziell Orte mit vielen technischen Geräten könnten Störungen verursachen, die eine ordnungsgemäße Übertragung des Funksignals verhindern könnten. Ebenso könnten die Temperatur der Umgebung und des Materials einen Einfluss auf die Leitfähigkeit haben. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden alle Tests bei Raumtemperatur durchgeführt, dieser Parameter wurde somit weitestgehend konstant gehalten. Für weitere Forschungen erscheint es jedoch sinnvoll, diese Temperaturen zu variieren und die Ergebnisse zu evaluieren, um einen zuverlässigen Einsatz bei verschiedenen Temperaturen wie sie unter anderem auch in MakerLabs vorkommen können, zu sicherstellen zu können.

Die Ergebnisse dieser Bachelorarbeit können für andere Anwendungsbereiche adaptiert werden. Als Anwesenheitskontrolle könnte der Sensor in adaptierter Form im Hochschulbereich verwendet werden, um zum Beispiel bei Onlineeinheiten sicherzustellen, dass die Studierenden anwesend sind. Die Ergebnisse hinsichtlich der Leitfähigkeit zeigen, dass leitfähiges 3D-Druckfilament für individualisierte Modelle in der Medizin, der Therapie oder der Industrie eingesetzt werden kann. Im Consumerbereich bietet leitfähiges, flexibles Filament auch die Möglichkeit, dieses in sogenannte Wearables zu integrieren.

5.3 Limitationen der vorliegenden Arbeit und zukünftige Forschungsmöglichkeiten

In diesem Kapitel werden die Limitationen dieser Arbeit dargelegt und von der Autorin empfohlene weitere Forschungsmöglichkeiten diskutiert.

Eine ungleichmäßige Druckausübung durch unterschiedliche Nutzer:innen wurde durch die in Kapitel 4.4 „Analyse und Ergebnisse der Nutzer:innenbedürfnisse“ beschriebenen Test überprüft und führte zu keinen Problemen. Dennoch wurde im Kapitel 4.2.2 festgestellt, dass das Sensormodell „Buzzer“ anders reagiert, wenn der Druck von oben anstatt von der Seite kommt. Hier könnten noch weitere Tests, insbesondere mit klar definierten und verschiedenen Kräften, durchgeführt werden.

Auch bezüglich der für die Evaluierung der Sensoren nach dem Zufallsprinzip herangezogenen potenziellen Nutzer:innen gab es aufgrund des zeitlich

5 Fazit und Ausblick

möglichen Umfangs einer Bachelorarbeit eine Limitation. So sollten hier noch weitere Personen herangezogen werden, um eine repräsentative Stichprobe zu erreichen. Derzeit wurden keine demographischen Daten, wie zum Beispiel Geschlecht, Alter oder Bildung, erhoben. Dies wäre aber notwendig, um den Sensor mit den passenden Gruppen zu testen und somit wissenschaftlich gesichert in unterschiedlichen Anwendungsfällen einsetzen zu können.

Des Weiteren erscheinen längere Tests sinnvoll, um Ermüdungserscheinungen zu erfassen. Zusätzlich zu erwähnen ist, dass dem Anspruch eines Design-based research in dieser Arbeit nicht zur Gänze genüge getan werden konnte, da mehrere Iterationen (= Durchläufe mit Anpassung an die Ergebnisse) den Umfang der Bachelorarbeit überstiegen hätte. Zur weiteren Verbesserung der vorliegenden Prototypen sollte dies gemacht werden.

Literaturverzeichnis

- Aimar, A., Palermo, A., & Innocenti, B. (2019). The Role of 3D Printing in Medical Applications: A State of the Art. *Journal of Healthcare Engineering*, 2019, e5340616. <https://doi.org/10.1155/2019/5340616>
- Bates-Green, K., & Howie, T. (2018). *Laser_Cutter_Materials.pdf*. https://www.materialseducation.org/educators/matedu-modules/docs/Laser_Cutter_Materials.pdf
- BedeutungOnline, P. von. (2020, Oktober 5). *Was ist ein Makerspace / FabLab? Bedeutung, Definition, Erklärung.* Bedeutung Online. <https://www.bedeutungonline.de/was-ist-ein-makerspace-fablab-bedeutung-definition-erklaerung/>
- Brilliant.org. (2023). *Finite State Machines | Brilliant Math & Science Wiki*. <https://brilliant.org/wiki/finite-state-machines/>
- De León, A. B., Saorin, J. L., De la Torre-Cantero, J., Meier, C., & Cabrera-Pardo, M. (2019). Flexible 3D Printed Molds for Educational Use. Digital Fabrication of 3D Typography. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, 15(13), 4. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v15i13.11155>
- Dey, A., & Yodo, N. (2019). A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(3), 64. <https://doi.org/10.3390/jmmp3030064>
- Ewald, W. (2019, März 8). *433 MHz Funk mit dem Arduino*. <https://wolles-elektronikkiste.de/433-mhz-funk-mit-dem-arduino>

Filament2Print. (2022). *3D Print with Conductive Filaflex*.

https://filament2print.com/gb/blog/155_print-with-conductive-filaflex.html

Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing* (Second edition). Springer.

Greifeneder, E., Heyroth, M., Klingbeil, K., Krisam, M., Näther, C., & Schnur, S. (2011). *Interaktion mit RFID Ausleih- und Rückgabeautomaten. Ergebnisse quantitativer und qualitativer Beobachtungen*. 35(1), 48–52.
<https://doi.org/10.1515/bfup.2011.007>

Haferkamp, H., Goede, M., Busse, A. von, & Thuerk, O. (1998). Laser cutting: Industrial relevance, process optimization, and laser safety. *Opto-Contact: Workshop on Technology Transfers, Start-Up Opportunities, and Strategic Alliances*, 3414, 34–43. <https://doi.org/10.1117/12.323544>

Kamran, M., & Saxena, A. (2016). *A Comprehensive Study on 3D Printing Technology*. 6(2).

Kurth, M. (2018, April 18). *Vielfältige optische Schutzeinrichtungen*.
<https://www.ke-next.de/automation/sensorik-messtechnik/vielfaeltige-optische-schutzeinrichtungen-347.html>

Kwok, S. W., Goh, K. H. H., Tan, Z. D., Tan, S. T. M., Tjiu, W. W., Soh, J. Y., Ng, Z. J. G., Chan, Y. Z., Hui, H. K., & Goh, K. E. J. (2017). Electrically conductive filament for 3D-printed circuits and sensors. *Applied Materials Today*, 9, 167–175. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.07.001>

Leigh, S. J., Bradley, R. J., Purssell, C. P., Billson, D. R., & Hutchins, D. A. (2012). A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors. *PLoS ONE*, 7(11), e49365.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049365>

Makerspace. (2023, Mai 17). Cambridge Dictionary.
<https://dictionary.cambridge.org/de/worterbuch/englisch/makerspace>

- Mishra, V., Negi, S., Kar, S., Sharma, A. K., Rajbahadur, Y. N. K., & Kumar, A. (2022). Recent advances in fused deposition modeling based additive manufacturing of thermoplastic composite structures: A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 089270572211028. <https://doi.org/10.1177/08927057221102857>
- Nichols, M. R. (2019). How does the automotive industry benefit from 3D metal printing? *Metal Powder Report*, 74(5), 257–258. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2019.07.002>
- Pfeiffer, F. (2018, Juni 21). *Umfrage als wissenschaftliche Methode für die Bachelorarbeit*. Scribbr. <https://www.scribbr.at/methodik-at/umfrage-wissenschaftliche-methode/>
- Pilastro, D., Monte, M., & Oboe, R. (2021). KF distance observer and destructive collision avoidance for laser cutting head. *2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISIE45552.2021.9576190>
- Savini, A., & Savini, G. G. (2015). A short history of 3D printing, a technological revolution just started. *2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/HISTELCON.2015.7307314>
- Schmauder, M., Höhn, K., Jung, P., Lehmann, K., Paritschkow, S., Westfeld, P., & Sardemann, H. (2016). *Sichere Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion*. <https://doi.org/10.21934/BAUA:BERICHT20161102>
- Scott, E. E., Wenderoth, M. P., & Doherty, J. H. (2020). Design-Based Research: A Methodology to Extend and Enrich Biology Education Research. *CBE—Life Sciences Education*, 19(3), es11. <https://doi.org/10.1187/cbe.19-11-0245>
- Zheng, Y., Huang, X., Chen, J., Wu, K., Wang, J., & Zhang, X. (2021). A Review of Conductive Carbon Materials for 3D Printing: Materials, Technologies,

Properties, and Applications. *Materials*, 14(14), 3911.

<https://doi.org/10.3390/ma14143911>

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Ablauf der verschiedenen Methodenansätze zur Erarbeitung des Prototyps | 4 |
| Abbildung 2: Widerstandsmessung eines nicht leitfähigen PLA-Drucks | 14 |
| Abbildung 3: Widerstandsmessung eines leitfähigen PLA-Drucks | 14 |
| Abbildung 4: Widerstandswert bei Messung in 5 cm Abstand ohne Druck auf das Filament auszuüben | 15 |
| Abbildung 5: Widerstandswert bei Messung in 5 cm Abstand mit Druck auf der entfernten Seite | 15 |
| Abbildung 6: Widerstandswert bei Messung in 5 cm Abstand mit Druck zwischen den Klemmen | 16 |
| Abbildung 7: Widerstandswert bei Messung in 5 cm Abstand mit Druck in der Mitte | 16 |
| Abbildung 8: Widerstandswert bei Messung in 10 cm Abstand ohne Druck auf das Filament auszuüben | 16 |
| Abbildung 9: Widerstandswert bei Messung in 10 cm Abstand und Druck in der Mitte | 16 |
| Abbildung 10: Versuchsaufbau für die Widerstandsmessung einer Platte..... | 17 |
| Abbildung 11: Messaufbau für den Betrieb einer LED mit zwei Platten aus leitfähigem PLA als Schalter | 19 |
| Abbildung 12: Blockschaltbild des Sensorsystems (Buzzer und Tower)..... | 21 |
| Abbildung 13: Testobjekt aus leitfähigem Filament mit eingeschmolzenem Pin und Litzendraht..... | 22 |
| Abbildung 14: Anschluss der gelben Betriebsbereitschafts-LED an den Arduino | 23 |
| Abbildung 15: Anschluss der grünen Status-LED an den Arduino..... | 23 |
| Abbildung 16: Funksteckdose mit DIP-Schaltern zur Konfiguration..... | 24 |
| Abbildung 17: 433 MHz-Sendemodul mit und ohne Antenne | 25 |
| Abbildung 18: Umsetzung des Aufbaus mit Arduino und Steckbrett..... | 25 |
| Abbildung 19: Außenansicht des gedruckten Sensormodelles „Buzzer“ | 26 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 20: CAD-Modell der Vorderansicht des Sensormodelles „Buzzer“..... | 26 |
| Abbildung 21: CAD-Modell der Rückansicht des Sensormodelles „Buzzer“ | 26 |
| Abbildung 22: Widerstandswert beim Sensormodell „Buzzer“ ohne Buzzerteil... | 27 |
| Abbildung 23: Widerstandswert beim Sensormodell „Buzzer“ mit Buzzerteil..... | 27 |
| Abbildung 24: Außenansicht des gedruckten Sensormodelles „Tower“..... | 28 |
| Abbildung 25: CAD-Modell der Vorderansicht des Sensormodelles „Tower“ | 29 |
| Abbildung 26: CAD-Modell der Rückansicht des Sensormodelles „Tower“ | 29 |
| Abbildung 27: Widerstandswert beim Sensormodell „Tower“ ohne Druck | 30 |
| Abbildung 28: Widerstandswert beim Sensormodell „Tower“ mit Druck | 30 |
| Abbildung 29: Schaltung zum Erfassen des Sensors und der Sensorspannung sowie der Spannungsteilerformel..... | 31 |
| Abbildung 30: Finite State Machine der vorliegenden Sensoren | 32 |
| Abbildung 31: Überprüfung der Zuverlässigkeit der Aufrechterhaltung des Stromflusses beim Sensormodell „Buzzer“ | 35 |
| Abbildung 32: Überprüfung der Zuverlässigkeit der Aufrechterhaltung des Stromflusses beim Sensormodell „Tower“ | 36 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Mittelwerte und Standardabweichungen der Widerstandswerte unterschiedlich großer Platten (gerundet auf ganze Ohm)..... | 18 |
| Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichungen der Widerstandswerte bei unterschiedlichem Druck auf die Krokodilklemmen (gerundet auf ganze Ohm) | 18 |
| Tabelle 3: Widerstands- und Stromschwankungen sowie LED-Output beim Betrieb einer LED mit zwei Platten aus leitfähigem PLA als Schalter | 20 |
| Tabelle 4: Widerstandsschwankungen beim Sensormodell „Buzzer“ | 28 |
| Tabelle 5: Widerstandsschwankungen beim Sensormodell „Tower“ | 30 |
| Tabelle 6: Widerstands- und Spannungswerte der Sensormodelle „Buzzer“ und „Tower“ in gedrücktem und nicht gedrücktem Zustand | 31 |
| Tabelle 7: Genannte Vorteile des Sensormodell "Buzzer"..... | 38 |
| Tabelle 8: Genannte Nachteile des Sensormodell "Buzzer"..... | 38 |
| Tabelle 9: Genannte Veränderungsvorschläge für das Sensormodell "Buzzer" . | 39 |
| Tabelle 10: Genannte Veränderungsvorschläge für das Sensormodell "Tower". | 39 |
| Tabelle 11: Angaben zu weiteren Eindrücken | 39 |
| Tabelle 12: Rückmeldung der Nutzer:innen im Zuge des Beobachtungsbogens | 40 |

Anhang

A. Beobachtungsbogen

Beobachtungsbogen

Der Beobachtungsbogen ist vom Beobachter auszufüllen. Dauer pro Sensor 3 Minuten.

| | | | | | |
|------------------------------|--|--|--|--|--|
| Beobachtungsnummer (laufend) | | | | | |
| Sensortyp | | | | | |

| | | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|--|
| Wurde der Sensor im Zeitintervall gedrückt? | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

| | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|
| Wurde der Versuch abgebrochen? (Grund) | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|

| | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|
| Gab es Äußerungen des Ärgers? (Anzahl) | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|

| | | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|--|
| Generelle Äußerungen der Testperson während des Testens | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

| | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|
| Rückmeldung der Testperson nach dem Testen | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

| | | | | | | |
|--------------------------|--|--|--|--|--|--|
| Eindruck des Beobachters | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

B. Fragebogen

Fragebogen

| | |
|----------------------------|--|
| Fragebogennummer (laufend) | |
|----------------------------|--|

| | |
|--------------------------------|---|
| Welcher Sensor wird bevorzugt? | <input type="checkbox"/> Buzzer <input type="checkbox"/> Tower |
|--------------------------------|---|

Warum?

Gibt es etwas zu verändern? Was würde die Userexperience verbessern?

Findest du die Verwendung des Sensors sinnvoll?

Was willst du noch mitteilen?

C. Programmcode

```
#include <RCSwitch.h>

#define PIEZO_ACTIVATED 1 // 0 = no beep, 1 = beep
#define OFFSHOOT_ACTIVATED 1 // 0 = Hand (or other object) can keep on
the sensor, 1 = Hand must be taken off the Sensor

#define DESIGN 0 // 0 = Buzzer Design, 1 = Tower Design, ...

#define BUZ_OFFSET 900 // 4V -> 1024*4/5=820 -> tests showed that 900
works better
#define TOW_OFFSET 820 // 4V -> 1024*4/5=820

#define SENSOR_PIN A0
#define BBLED_PIN 7 // green LED - Betriebsbereit-LED
#define STLED_PIN 8 // yellow LED - Status-LED
#define PIEZO_PIN 9
#define RF_PIN 10 //
#define CT 15000 // Cooldown Time - Start Time until the sensor must
be pressed (no action needed)
#define TT 5000 // Tolerance Time - Time until the user must press
the button
#define PT 1500 // Piezo Time - Time until the piezo-tone starts
#define OT 5000 // Offshoot Time - Time to release the sensor
#define BT 500 // Blink Time for LEDs

enum States {
    DOWN,
    COOLDOWN,
    TOLERANCE,
    PIEZO,
    OFFSHOOT
};
int state = COOLDOWN;

unsigned long lastTime = millis();
unsigned long blinkTime = millis();

int offset;
bool blink = false;
bool piezo_state = false;

// for statistic purpose
/*
    int tolerance_timers[300];
    int offshoot_timers[300];
    int step = 0;
*/
RCSwitch mySwitch = RCSwitch(); // initialize RF-Switch
```

```

void init_IO() {
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("Beginning");
    if (PIEZO_ACTIVATED) {
        pinMode(PIEZO_PIN, OUTPUT);
    }
    pinMode(BBLED_PIN, OUTPUT);
    pinMode(STLED_PIN, OUTPUT);
}

void init_433MHz() {
    mySwitch.enableTransmit(10);
    // Optional set pulse length. The length was tested with an
    Testprogramm and pushing the button on the RF-Transmitter-Module ->
    hast to be set to 324
    mySwitch.setPulseLength(324);
}

void setup() {
    init_IO();
    init_433MHz();

    if (DESIGN == 0) { // Buzzer-Sensor
        offset = BUZ_OFFSET;
    } else if (DESIGN == 1) { // Tower-Sensor
        offset = TOW_OFFSET;
    } else { // Testing or more designs
        offset = 512;
    }

    digitalWrite(BBLED_PIN, HIGH);
    on_433MHz();
}

// activate the RF-Module
void on_433MHz() {
    bool blink = true;
    for (int i = 0; i < 5; i++) { // send multiple times as the RF-
        module doesn't work every time
        Serial.println("Sending ON");
        digitalWrite(BBLED_PIN, blink);
        mySwitch.switchOn("01011", "01000"); // code for the used RF-
        switch-plug
        blink = !blink;
        delay(50);
    }
    digitalWrite(BBLED_PIN, HIGH);
}

// deactivate the RF-Module
void off_433MHz() {
}

```

```

    bool blink = true;
    for (int i = 0; i < 5; i++) { // send multiple times as the RF-
        module doesn't work every time
        Serial.println("Sending OFF");
        digitalWrite(BBLED_PIN, blink);
        mySwitch.switchOff("01011", "01000"); // code for the used RF-
        switch-plug
        blink = !blink;
        delay(50);
    }
    digitalWrite(BBLED_PIN, LOW);
}

void cleanup() {
    piezo_state = false;
    digitalWrite(STLED_PIN, LOW);
    if (PIEZO_ACTIVATED) {
        analogWrite(PIEZO_PIN, 0);
    }
}

// for statistic purpose
/*
void print_statistic(int reason) { // 0 = killed because not pressed
fast enough, 1 = killed because not released fast enough
    if (reason == TOLERANCE) {
        Serial.println("Killed because not pressed fast enough.");
    } else if (reason == OFFSHOOT) {
        Serial.println("Killed because not released fast enough.");
    }
    Serial.print("Survived for ");
    Serial.print(step);
    Serial.println(" steps.");
    Serial.println("Tolerance Timers:");
    Serial.print("[");
    float sum = 0.0;
    for (int x = 0; x < step - 1; x++) {
        sum += tolerance_timers[x];
        Serial.print(tolerance_timers[x]);
        Serial.print(",");
    }
    sum /= step;
    Serial.print(tolerance_timers[step-1]);
    Serial.println("]");
    Serial.print(" Avg ");
    Serial.println(sum);
    if (OFFSHOOT_ACTIVATED) {
        Serial.println("Offshoot Timers:");
        Serial.print("[");
        float sum = 0.0;
        for (int x = 0; x < step - 1; x++) {

```

```

        sum += offshoot_timers[x];
        Serial.print(offshoot_timers[x]);
        Serial.print(",");
    }
    if (reason == OFFSHOOT) {
        step -= 1; // to dont offset the average as it has not inputted
        a value for OFFSET as it didnt reache it as it killed before
    }
    sum /= step;
    Serial.print(offshoot_timers[step-1]);
    Serial.println("]");
    Serial.print(" Avg: ");
    Serial.println(sum);
}
}

void loop() {
    unsigned long currTime = millis();
    if (state == COOLDOWN) {
        if (lastTime + CT < currTime) {
            Serial.println("Pls press");
            state = TOLERANCE;
            lastTime = currTime;
            blinkTime = currTime;
        }
    } else if (state == TOLERANCE) {
        if (PIEZO_ACTIVATED && lastTime + PT < currTime && !piezo_state) {
            Serial.println("Start piezo");
            // PIEZO speak
            piezo_state = true;
        }
        if (piezo_state) {
            analogWrite(PIEZO_PIN, 63);
        }
        if (blinkTime + BT < currTime) {
            Serial.println("Toggle Blink");
            blink = !blink;
            digitalWrite(STLED_PIN, blink);
            if (piezo_state) {
                analogWrite(PIEZO_PIN, 512 * blink);
            }
            blinkTime = currTime;
        }
        if (analogRead(SENSOR_PIN) < offset) {
            int timer = currTime - lastTime;
            Serial.print("Button pressed after ");
            Serial.print(timer);
            // for statistic purpose
            /*
            Serial.print(", [");
            Serial.print(step);

```

```

        Serial.println("]");
        tolerance_timers[step] = timer;
        step++;
    */
    if (OFFSHOOT_ACTIVATED) {
        Serial.println("Offshoot timer activated");
        state = OFFSHOOT;
    } else {
        state = COOLDOWN;
    }
    lastTime = currTime;
    cleanup();
}
if (lastTime + TT < currTime) {
    Serial.println("NOT PRESSED FAST ENOUGH");
    state = DOWN;
    lastTime = currTime;
    cleanup();
    // for statistic purpose
    //print_statistic(TOLERANCE);
}
} else if (state == OFFSHOOT) {
if (lastTime + OT < currTime) {
    Serial.println("NOT RELEASED FAST ENOUGH");
    state = DOWN;
    lastTime = currTime;
    cleanup();
    // for statistic purpose
    //print_statistic(OFFSHOOT);
}
if (PIEZO_ACTIVATED && lastTime + PT < currTime && !piezo_state) {
    Serial.println("Start piezo");
    // PIEZO speak
    piezo_state = true;
}
if (piezo_state) {
    analogWrite(PIEZO_PIN, 127);
}
if (analogRead(SENSOR_PIN) > offset) {
    int timer = currTime - lastTime;
    Serial.print("Successful after ");
    Serial.println(timer);
    // for statistic purpose
    //offshoot_timers[step - 1] = timer;

    state = COOLDOWN;
    lastTime = currTime;
    cleanup();
}
} else { // DOWN
    digitalWrite(BBLED_PIN, LOW);
    off_433MHz();
}

```

```
    delay(5000);
}
delay(3);
}
```