

DIPLOMARBEIT

Gesamtprojekt

Agilis

Entwicklung einer Steuerung von dielektrischen Elastomer-Aktoren mittels Image-Tracking

Simon Gruber 5AHEL

Betreuer: Dipl.-Ing. Harald Salhofer

Selma Hasanović 5AHEL

Kooperationspartner: Johannes-Kepler-Universität Linz, Institut für Experimentalphysik,
Abteilung Physik weicher Materie

ausgeführt im Schuljahr 2019/20

Abgabevermerk:

Datum: 02.04.2020

übernommen von:

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Salzburg, am 02.04.2020


Verfasserinnen / Verfasser:



Simon Gruber



Selma Hasanović

	HÖHERE TECHNISCHE BUNDESLEHR- UND VERSUCHSANSTALT Salzburg
	Elektronik und Technische Informatik


DIPLOMARBEIT DOKUMENTATION

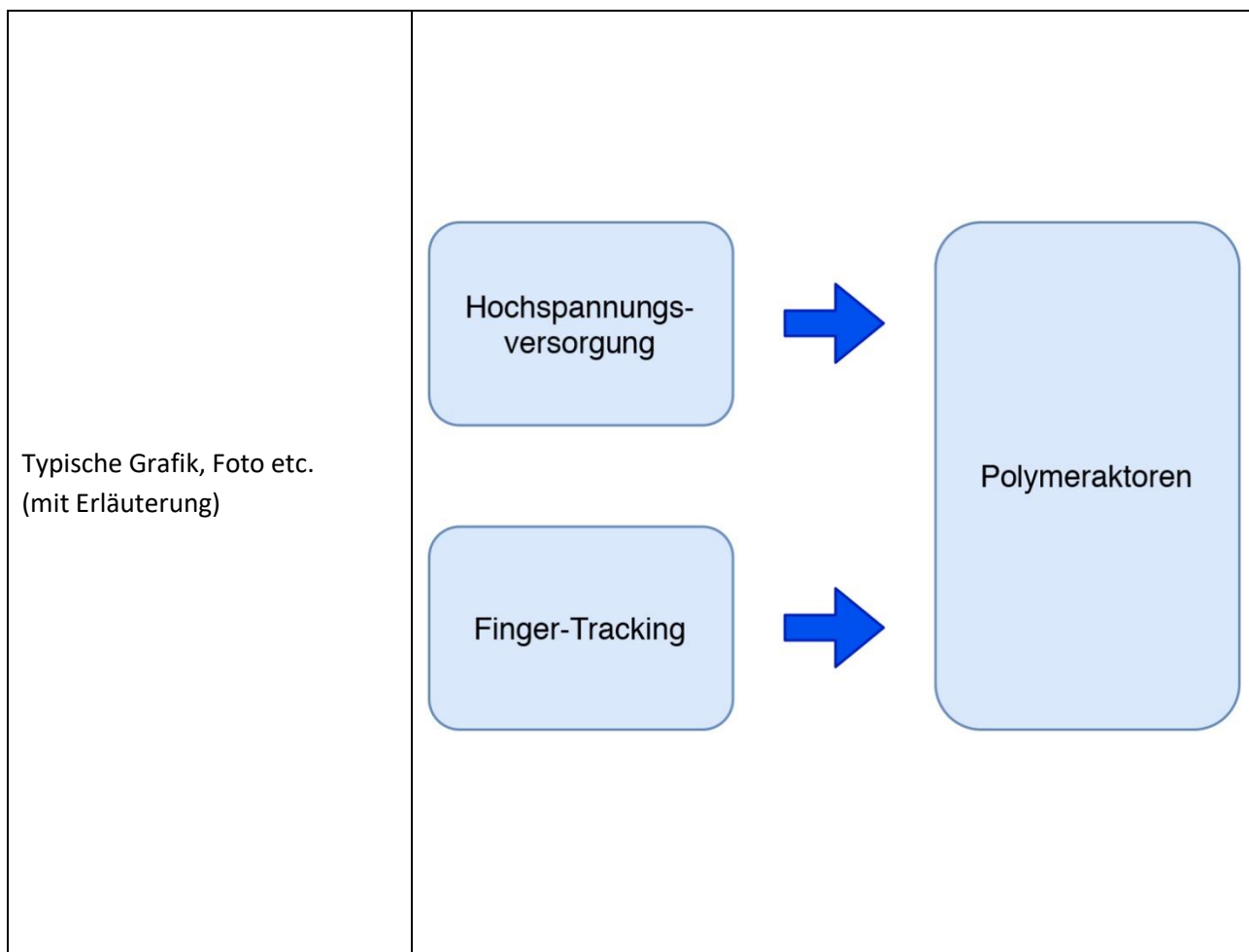
Namen der Verfasserinnen / Verfasser	Simon Gruber Selma Hasanović
Jahrgang Schuljahr	5AHEL 2019/20
Thema der Diplomarbeit	Entwicklung einer Steuerung von dielektrischen Elastomer-Aktoren mittels Image-Tracking
Kooperationspartner	Johannes-Kepler-Universität Linz, Institut für Experimentalphysik, Ab- teilung Physik weicher Materie

Aufgabenstellung	<p>Aufgrund ihrer hohen Dynamik und Kraft bei sehr geringem Gewicht gewinnen Polymer-Aktoren als künstliche Muskeln stets an Bedeutung in der Robotik und Medizin, aber auch in der Industrie. Dennoch sind sie nach wie vor nur sehr spärlich im Einsatz und immer noch Gegenstand der Forschung. Agilis soll nun als Praxismodell dienen, die aufkommende Technologie auch an der HTBLuVA Salzburg zu testen.</p>
------------------	---


Realisierung	<p>Eine Software-Schnittstelle wurde zur Steuerung der Elastomer-Aktoren bereitgestellt. Diese Schnittstelle kann von einem eigens entwickelten Control Panel, sowie einer Image-Tracking-Software genutzt werden. Weiters wurde eine Hochspannungsversorgung zur Speisung der Aktoren entwickelt und eine Steuerplatine für diese entworfen und gefertigt.</p>
--------------	---

Ergebnisse	<p>Es wurden funktionstüchtige Polymeraktoren, welche über die einwandfrei arbeitende Hochspannungsversorgung angesteuert werden können, hergestellt. Auch wurde ein Platinendesign, sowie die Firmware zur PWM-Steuerung mehrerer CCFL-Inverter via Arduino entwickelt. Überdies wurde die Software zum Finger-Tracking mit der Xbox-Kinect zusätzlich zum Control Panel fertig ausprogrammiert.</p>
------------	---

	HÖHERE TECHNISCHE BUNDESLEHR- UND VERSUCHSANSTALT Salzburg
	Elektronik und Technische Informatik



Möglichkeiten der Einsicht- nahme in die Arbeit	Sharepoint-Server der HTBLuVA Salzburg
--	--

	COLLEGE OF ENGINEERING Salzburg
	Electronics and Computer Engineering

DIPLOMA THESIS


Documentation

Author(s)	Simon Gruber Selma Hasanović
Form Academic year	SAHEL 2019/20
Topic	Development of a control system for dielectric elastomer actuators using image tracking
Co-operation Partners	Johannes-Kepler University Linz, Institute of Experimental Physics, Department of Physics of soft matter

Assignment of Tasks	Due to their high dynamic and power at a very low weight, polymer actuators are increasingly becoming important as artificial muscles in robotics and medicine, but also in industry. Nevertheless, they are very rarely in use and still a study subject. Agilis is supposed to be a practice model to test the emerging technology also at the HTBLuVA Salzburg.
---------------------	--

Realisation	A software interface has been provided to control the elastomer actuators. This interface can be used by a specially developed control panel, as well as by an image-tracking-software. Furthermore, a high-voltage power supply has been developed to supply the actuators and a control board has been designed and crafted for them.
-------------	---

Results	Functional polymer actuators were produced, which can be controlled via the perfectly working high-voltage supply. Furthermore, a board design and the firmware for PWM control of multiple CCFL inverters via Arduino was developed. Also, the software for finger tracking with the Xbox-Kinect in addition to the control panel was fully programmed.
---------	--

	COLLEGE OF ENGINEERING Salzburg
	Electronics and Computer Engineering

<p>Illustrative Graph, Photo (incl. explanation)</p>	<pre> graph LR A[High voltage supply] --> D[Polymer actuators] B[Finger-Tracking] --> D </pre>
--	--

<p>Accessibility of Diploma Thesis</p>	<p>Sharepoint server of HTBLuVA Salzburg</p>
--	--

Vorwort

Beim Behandeln des Kapitels *Aktorik* im Rahmen des Messtechnikunterrichts des vierten Jahrgangs wurde das Interesse an *künstlichen Muskeln* geweckt. Nach intensiver Beschäftigung mit dieser Thematik entstand die Idee für *Agilis*. Es sollte ermöglicht werden, eben diese Muskeln – realisiert durch Polymeraktoren – mit Hilfe einer intuitiven Steuerung zu bedienen.

Unser Projekt soll als Praxismodell dienen, Polymeraktoren als aufkommende Technologie auch an der HTBLuVA Salzburg zu testen. Neben einer Vielzahl bekannter Aktoren ist die Untersuchung zahlreicher neuer Stoffe unter der Verwendung als künstliche Muskeln nämlich nach wie vor Gegenstand wissenschaftlicher Forschung.

Aufgrund der momentan durch COVID-19 verursachten Situation in Österreich und der daraus resultierenden Ausgangssperre war es uns leider nicht mehr möglich, alle Vorhaben in diesem Projekt zur Gänze auszuarbeiten.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Diplomarbeit die Sprachform des generischen Maskulinums angewandt. Diese Art der Formulierung impliziert jedoch keine Benachteiligung des weiblichen Geschlechts, sondern soll als geschlechtsunabhängig verstanden werden.

Danksagung

Unser herzlicher Dank gilt unserem Projektbetreuer Prof. Dipl.-Ing. Harald Salhofer und insbesondere seiner immerwährenden Unterstützung im Laufe des Projektes. Ebenso bedanken wir uns bei unserem Jahrgangsvorstand Prof. Dipl.-Ing. Roman Schragl, der uns in den vergangenen Jahren stets zur Seite stand.

Schlussendlich sei unseren Familien und Freunden gedankt, ohne deren mentalen Beistand der Erfolg dieses Projektes nicht gewährt hätte werden können.

Nichtsdestotrotz sei gesagt: Am Ende gebührt alles Lob Gott.

Abstract

The interest in artificial muscles was aroused when the chapter on actuators was dealt with in the fourth year of measurement technology lessons. After intensive study of this topic, the idea for *Agilis* was born. It should be made possible to control these muscles - realized by polymer actuators - with the help of an intuitive control.

Our project should serve as a practical model to test polymer actuators as an emerging technology at the HTBLuVA Salzburg as well. In addition to a large number of known actuators, the investigation of numerous new substances using them as artificial muscles is still the subject of scientific research.

Due to the current situation in Austria caused by COVID-19 and the resulting curfew, it was unfortunately no longer possible for us to work out all the plans in this project in their entirety.

For reasons of better readability, the language form of the generic masculine is used in this diploma thesis. However, this type of formulation does not imply any discrimination against the female sex but should be understood as gender independent.

Acknowledgement

Our sincere thanks go to our project supervisor Prof. Dipl.-Ing. Harald Salhofer and especially to his constant support during the project. We would also like to thank our class leader Prof. Dipl.-Ing. Roman Schragl, who has always been by our side over the past years.

Finally, we would like to thank our families and friends, without whose mental support the success of this project could not have been assured.

Nevertheless, it should be said that in the end all praise is due to God.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	11
2.	Individuelle Zielsetzung & Aufgabenstellung.....	13
2.1.	Projektorganisation	13
2.2.	Zielsetzung.....	13
3.	Künstliche Muskeln	14
3.1.	Vergleich zu natürlichen Muskeln	14
3.2.	Anwendung.....	15
4.	Polymeraktoren.....	16
4.1.	Übersicht.....	16
4.2.	Vorteile	17
4.3.	Nachteile.....	17
4.4.	Funktionsweise	17
4.4.1.	Kondensator-Funktionsprinzip.....	17
4.4.2.	Das Elektrische Feld.....	19
4.5.	Aufbau	22
4.5.1.	Kunststoffrahmen.....	22
4.5.2.	3M Klebeband	23
4.5.3.	8481 Premium Carbon Conductive Grease.....	23
5.	Hochspannungsversorgung.....	25
5.1.	CCFL-Inverter	25
5.1.1.	Royer Circuit	26
5.1.2.	Modernes Schaltungsprinzip.....	27
5.1.3.	Funktionsweise.....	27
5.1.4.	Steuerplatine	30
5.1.5.	Messergebnisse.....	32
5.2.	Cockroft-Walton-Generator	34
5.2.1.	Spannungsverdoppler nach Villard	34
5.2.2.	Greinacher-Schaltung.....	35
5.2.3.	Funktionsweise.....	35
5.2.4.	Simulation in LTSpice.....	38
5.2.5.	Messergebnisse.....	38
6.	Xbox Kinect Sensorleiste	43
6.1.	Hardware im Überblick.....	43

6.2. Time of Flight Technologie	44
6.2.1. Verwendung und Möglichkeiten	44
6.2.2. Realisierung	45
7. Treibersoftware	47
7.1. libfreenect2	47
7.2. Verwendung in Agilis	47
8. Fingererkennung	48
8.1. OpenCV-Library	48
8.1.1. Vorverarbeitung und Filterung der Daten	48
8.1.2. Sklasky's Algorithmus	49
9. Nutzerinteraktion	50
9.1. Control Panel	50
9.2. Finger-Tracking	53
9.2.1. Verhalten bei zu vielen / Zu wenigen Fingern	54
9.2.2. Fingererkennung mithilfe der ermittelten Handkontur	54
10. Steuerung der Aktoren durch den ATmega328P	56
11. Gehäuse- und Gelenkkonstruktion	59
11.1. Gehäuse	59
11.2. Design des Greifelements	59
11.2.1. Funktionsprinzip	60
11.2.2. Aufbau der Fingergelenke	61
11.2.3. Aufbau des Greifelements	62
12. Fazit und Ausblick	63
13. Literaturverzeichnis	64
14. Abbildungsverzeichnis	68
15. Formelverzeichnis	69
16. Tabellenverzeichnis	69
17. Begleitprotokoll gemäß § 9 Abs. 2 PrO-BHS	70
18. Besprechungsprotokoll	71
19. Gantt-Diagramm	72

1. Einleitung

Zur Erklärung der Funktionsweise von *Agilis* im Überblick bezieht sich diese Einleitung zum einfacheren Verständnis auf *Abbildung 1*. Zunächst wird die 12V-Eingangsspannung, welche aus einem konventionellen Netzgerät gewonnen wird, über den CCFL-Inverter auf einen Spitzenwert von knapp 2.000V Wechselspannung transformiert. Weiters wird diese Hochspannung über den Cockcroft-Walton-Generator bis auf etwa 6.000V erhöht und gleichgerichtet. Über diese Gleichspannung werden die Polymeraktoren versorgt. Als Basis für die Hochspannungsversorgung diente die entwickelte Hardware von Team Statron [1].

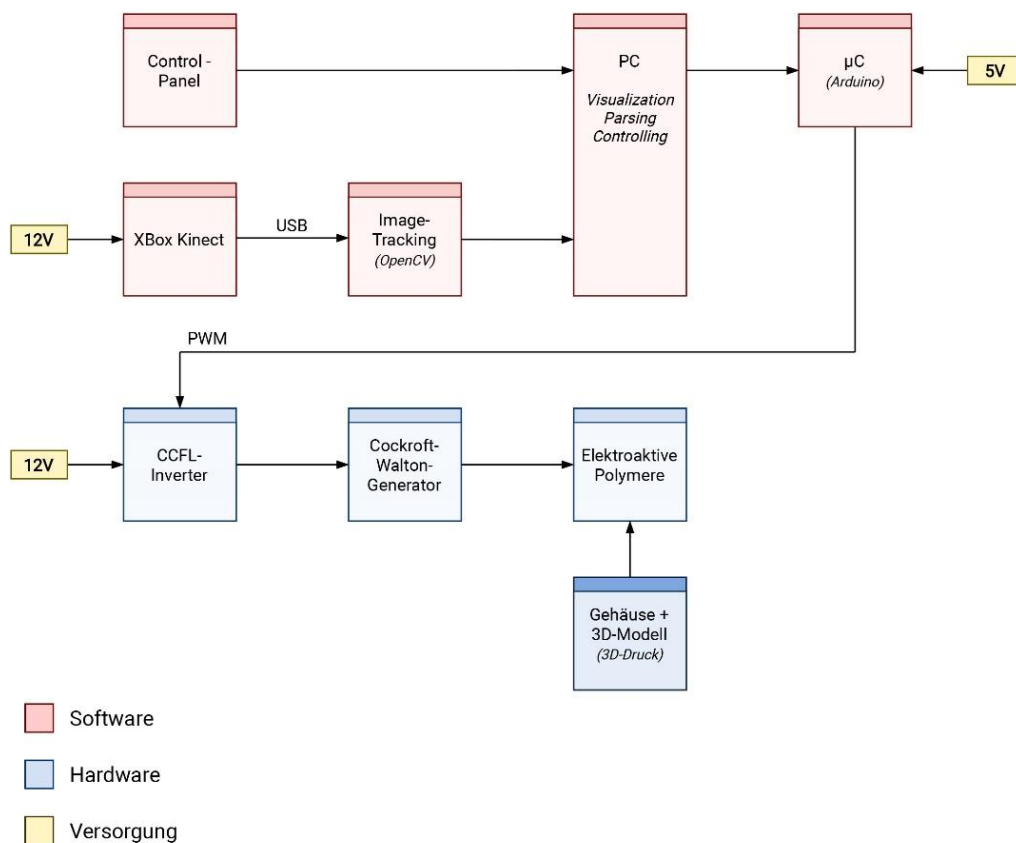


Abbildung 1: Blockschaltbild Agilis [E]

Um den Softwareteil vorweg spezifisch zu erklären, wird nachfolgend bereits näher darauf eingegangen. Wie in *Abbildung 2* zu sehen, ist die Funktionalität der Software in unterschiedliche Blöcke aufgeteilt.

Neben den in dieser Arbeit erklärten Funktionsweise des Codes ist die genaue Dokumentation der gesamten Software auf dem beiliegenden USB-Stick als (Zeilen-) Kommentar innerhalb der Quelldateien zu finden. Ebenso kann für dieses Projekt eine Doxygen-Dokumentation [2] generiert werden.

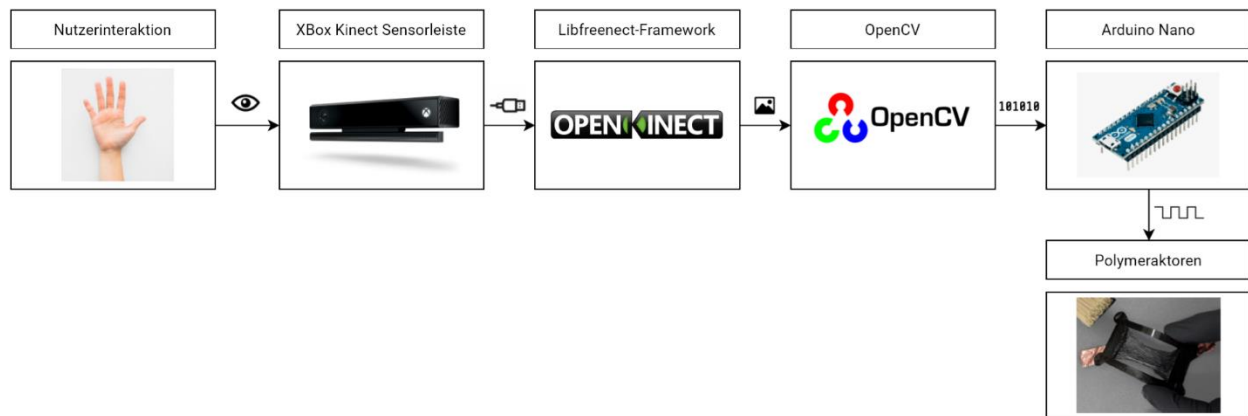


Abbildung 2: Blockschaltbild Software [E]

Nutzerinteraktion und Xbox Kinect Sensorleiste [3]:

Um Agilis per Gestensteuerung kontrollieren zu können, hält der Benutzer seine Hand vor die Xbox Kinect v2 Sensorleiste. Diese ist in der Lage, mittels einer Vielzahl an eingebauten Sensoren die genaue Position jeglicher Objekte in ihrem Sichtfeld zu ermitteln.

Libfreenect-Framework:

Die aufgenommenen Bild- und Positionsdaten werden anschließend mithilfe des speziell für die Xbox Kinect v2 entwickelten libfreenect2-Frameworks über eine USB 3.0 Verbindung ausgelesen.

OpenCV [4]:

Den Kern des Softwareteils von Agilis bildet OpenCV, welches das effiziente Verarbeiten der aufgenommenen Frames ermöglicht. Die Hauptaufgabe des Programmes besteht darin, die von der Kinect aufgenommene Hand des Nutzers möglichst ohne Verzögerung zu erkennen, vom Hintergrund zu unterscheiden und schließlich mithilfe mehrerer Algorithmen die Lage und Position der einzelnen Finger zu ermitteln.

Arduino Nano [5] (ATmega 328P [6]):

Der in diesem Projekt genutzte Arduino Nano kann zur Steuerung der unterschiedlichen Polymeraktoren genutzt werden. Hierzu erhält der Mikrocontroller per USB-Verbindung Anweisungen vom Hauptprogramm. Mithilfe des Controllers beziehungsweise des verbauten *Atmega 328P* ist es in diesem Projekt möglich, per PWM bis zu 5 verschiedene Aktoren unterschiedlich anzusteuern.

2. Individuelle Zielsetzung & Aufgabenstellung

Zunächst soll zur Speisung der Aktoren eine Hochspannungsversorgung entwickelt werden. Weiters sollen die Polymeraktoren aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Neben der geplanten Hardware soll das Control Panel beziehungsweise die Image-Tracking-Software zur Steuerung eingesetzt werden.

2.1. Projektorganisation

- Selma Hasanović (Projektleiter/-mitarbeiter):
 - Entwicklung einer Hochspannungsversorgung
 - Entwicklung der Steuerungshardware für die Polymeraktoren
 - Inbetriebnahme der Hardware und Erfassung der Messdaten
- Simon Gruber (Projektmitarbeiter):
 - Entwicklung der Finger-Tracking-Software
 - Entwicklung der Firmware zur Steuerung der Polymeraktoren
 - 3D-Modellierung und Herstellung der benötigten Komponenten
- Prof. Dipl.-Ing. Harald Salhofer (Projektbetreuer)

2.2. Zielsetzung

Das Projekt soll als Anschauungsmodell der Anwendung von Polymeraktoren als künstliche Muskeln dienen. Die Software-Schnittstelle soll die Steuerung der Polymeraktoren ermöglichen. Diese Schnittstelle kann von dem eigens entwickelten Control Panel, sowie der Image-Tracking-Software genutzt werden.

3. Künstliche Muskeln

Unter *künstlichen Muskeln* versteht man Aktoren oder Materialien, die Eigenschaften besitzen, mit denen sie natürliche Muskel ersetzen können. Äußere Einflüsse wie elektrische Spannung, Druck oder Temperaturveränderungen führen zu einer Kontraktion, Expansion oder Rotation des Materials. Dabei müssen diese drei Reaktionen in nur einer einzigen Komponente durchführbar sein. Andernfalls spricht man von herkömmlichen Motoren/Antrieben [7].

Unterteilt werden künstliche Muskeln je nach Steuerungsmechanismus in vier Hauptgruppen, auf deren Bedeutung bis auf die der elektroaktiven Polymere nicht weiter eingegangen wird [7]:

1. Betätigung durch Anlegen eines elektrischen Felds (elektroaktive Polymere)
2. Betätigung basierend auf Gasdruck (pneumatische künstliche Muskeln)
3. Betätigung basierend auf Ionenbewegung (Ionische elektroaktive Polymere)
4. Betätigung basierend auf thermischer Ausdehnung (Formgedächtnislegierungen, verdrillte Kohlenstoffnanoröhrchen)

Spricht man von künstlichen Muskeln, darf man den Begriff der *intelligenten Materialien* nicht weglassen. Darunter versteht man Materialien, die aktorische Eigenschaften vorweisen und gleichzeitig als (ihr eigener) Sensor betrieben werden können. Dieser Effekt wird auch als *Self-Sensing Effekt* bezeichnet [8].

3.1. Vergleich zu natürlichen Muskeln

Aufgrund der Tatsache, dass die Funktionsweise künstlicher Muskeln auf anderen physikalischen Prinzipien als die von natürlichen Muskeln beruht, gibt es keine Möglichkeit eines universellen Vergleichs. Daher wurden von Aktor-Entwicklern einige Leistungskriterien festgestellt, um derartige Vergleiche zu erleichtern beziehungsweise erst zu ermöglichen.

Dazu zählen unter anderem [9]:

- Aktor-Wirkungsgrad („Verhältnis von erzeugter mechanischer Arbeit zur zugeführten Energie“)
- Druck („Kraft pro Querschnittsfläche, unter der die Aktor-Materialien geprüft werden“; wichtig ist es, die Materialeigenschaften zu berücksichtigen)
- Dehnung („Verschiebung normalisiert um die ursprüngliche Materiallänge in Betätigungsrichtung“)
- Dehnungsrate („durchschnittliche Dehnungsänderung pro Zeiteinheit während eines Stellgliedhubs“; entspricht der Geschwindigkeit der Kontraktion des künstlichen Muskels)
- Zykluslebensdauer („Anzahl nützlicher Hübe, von denen bekannt ist, dass sie das Material durchlaufen können“)

Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der maximalen Spannung und der maximalen Dehnung, da diese beiden Eigenschaften die Kraft und Verschiebung eines Aktors begrenzen.

Anhand der festgelegten Leistungskriterien erkennt man viele Vorteile künstlicher Muskeln gegenüber natürlichen Muskeln. Insbesondere, wenn man die Langlebigkeit künstlicher Muskeln und deren enorme Kräfte in Betracht zieht, sind sie deutlich überlegen. So ist beispielsweise Forschern des MIT und der Harvard University gelungen, einen künstlichen Muskel mit einem Eigengewicht von 2,6 Gramm, Objekte mit einer Masse von drei Kilogramm heben zu lassen. Der Durchschnittsmensch hingegen ist nur in der Lage ungefähr sein eigenes Körpergewicht zu heben.

3.2. Anwendung

Aufgrund ihrer hohen Dynamik und Kraft bei sehr geringem Gewicht gewinnen künstliche Muskeln, obwohl sie momentan noch sehr spärlich zum Einsatz kommen, stets an Bedeutung in der Robotik und Medizin, aber auch in der Industrie (dazu gehören zum Beispiel Automobilindustrie, Kleidung, Spielzeug, Lärmschutz, Stromgeneratoren und vieles mehr). Künftig wird sich ihr Anwendungsgebiet auch auf die Luft- und Raumfahrttechnik erweitern.

4. Polymeraktoren

Elektroaktive Polymere (kurz EAP) werden der ersten in Abschnitt 3 genannten Gruppe zugeteilt. Ihre Aktivierung/Deaktivierung erfolgt somit durch Anlegen/Entfernen eines elektrischen Feldes. Durch die elektrische Stimulation verändern EAP ihre Größe und Form [10]. Dadurch können sie elektrische in mechanische Energie überführen.

Da sie sowohl als Aktor, als auch als Sensor eingesetzt werden können, zählen sie ebenfalls zu den eingangs beschriebenen *intelligenten Materialien* [11].

EAP werden in zwei Hauptklassen unterteilt [12]. Verwendet wurden nur Polymere, die der Klasse der elektronenaktiven Polymere – konkret dielektrische Elastomere (DE) – zugeteilt werden.

4.1. Übersicht

Aktoren mit dielektrischen Elastomeren funktionieren im Wesentlichen wie ein Kondensator, entsprechend *Abbildung 3*. Dabei stellt eine dielektrische, elastische Folie das aktive Material dar, das von zwei Elektroden umschlossen wird. Wird an diese beiden Elektroden eine elektrische Spannung angelegt, so entsteht ein elektrisches Feld, wodurch das Elastomer einer Formveränderung ausgesetzt wird, das Volumen allerdings konstant bleibt [12, 13].

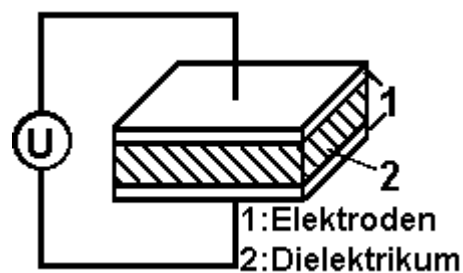


Abbildung 3: Aufbau eines Plattenkondensators [14]

4.2. Vorteile

Polymeraktoren zeichnen sich durch zahlreiche Vorteile aus [10]:

- Geringes Gewicht
- Leise im Betrieb
- Präzise Steuerung über Regelkreise
- Große Dehnung (bis zu 380%)
- Hohe Energieeffizienz (Rekuperation durch Federeigenschaft, geringer Stromverbrauch)
- Hohe Energiedichte
- Langlebig bei Raumbedingungen (mehrere Millionen Betriebszyklen)
- Schnelle Reaktion (im ms-Bereich)

4.3. Nachteile

- Hohe Betätigungsspannungen und hohe elektrische Felder

Durch die Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile dielektrischer Elastomere, wurde deutlich, dass diese für den Anwendungsfall in *Agilis* besonders gut geeignet sind.

4.4. Funktionsweise

Wie bereits erwähnt, erfolgt die Ansteuerung der Polymeraktoren über ein elektrisches Feld, welches von der in Abschnitt 5 beschriebenen Hochspannung erzeugt wird.

4.4.1. Kondensator-Funktionsprinzip

Legt man eine reale elektrische Gleichspannung, also eine Gleichspannungsquelle mit Innenwiderstand, an einen Kondensator an, so fließt ein elektrischer Strom, welcher die beiden Elektroden gegenpolig auflädt. Dadurch stellt sich im Kondensator eine ständig zunehmende Spannung ein.

Durch das sich aufbauende elektrische Potential an den Elektroden baut sich im Raum zwischen den Elektroden ein elektrisches Feld auf.

Die Spannungsladekurve an einem RC-Glied ist eine Exponentialfunktion. Der Strom läuft also mit der Zeit asymptotisch gegen null. Man spricht davon, dass der Kondensator *geladen* ist, wenn am Kondensator die gleiche Spannung wie an der Spannungsquelle anliegt und kein Strom mehr fließt. Die auf den Elektroden befindliche Ladung wird vom Kondensator gespeichert [15]. Werden zwei zueinander parallele leitfähige Platten (Plattenkondensator) entgegengesetzt geladen, so entsteht ein homogenes elektrisches Feld (siehe 4.4.2) [16].

Setzt man ein sogenanntes *Dielektrikum*, also ein nichtleitfähiges Material, in ein homogenes elektrisches Feld ein, so bewegt sich unter anderem jeder Atomkern etwas aus seiner Elektronenhülle. Die Ladungsschwerpunkte innerhalb der Atome verschieben sich, wodurch alle Atome zu elektrischen Dipolen werden. Dies bezeichnet man neben weiteren Effekten als *Verschiebungspolarisation* [16].

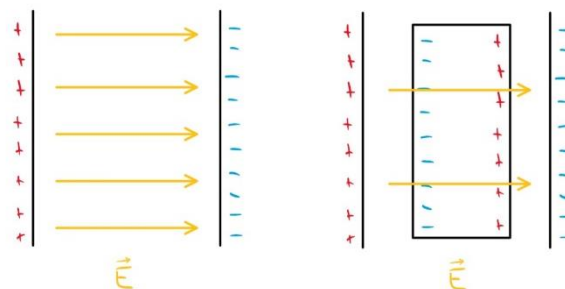


Abbildung 4: Verschiebungspolarisation im Plattenkondensator [E]

links: ohne Dielektrikum, rechts mit Dielektrikum

Dabei verringert sich der Wert der elektrischen Feldstärke um den Faktor der relativen Dielektrizitätszahl ϵ_r , einer Materialkonstante. Dadurch ergibt sich die allgemein gültige Formel für das elektrische Feld in einem Plattenkondensator, wobei ϵ_0 die elektrische Feldkonstante bezeichnet:

$$E = \frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0} * \frac{Q}{A} = \frac{1}{\epsilon_r} * \frac{U}{d}$$

Formel 1: Elektrische Feldstärke

Durch die nun gesenkte elektrische Feldstärke ergibt sich eine geringere Spannung zwischen den beiden Kondensatorplatten. Um wieder den Wert der außen anliegenden Spannung zu erreichen, müssen mehr Ladungsträger auf die Platten fließen. Somit kann ein Kondensator mit Dielektrikum also mehr Ladung speichern als einer ohne. Dies ist auch in der Formel für die Kapazität ersichtlich [16]:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r * \frac{A}{d}$$

Formel 2: Kapazität

4.4.2. Das Elektrische Feld

Als elektrisches Feld bezeichnet man den Raum zwischen zwei unterschiedlich geladenen Teilchen. Sie werden hauptsächlich durch spannungsführende Gegenstände/Leitungen erzeugt [17]. Dabei wird der Raum selbst nicht lediglich als Volumen betrachtet, sondern als physikalisches per se. Demnach werden dem Raum auch physikalische, veränderbare Eigenschaften zugeschrieben. Findet eine Ladungsänderung im Raum statt, so verändern sich seine physikalischen Eigenschaften und er gerät in einen neuen physikalischen Zustand. Das elektrische Feld benennt diesen Zustand [18]. Die elektrische Feldstärke ist ein Maß für die Kraftauswirkung, die eine elektrische Ladung auf eine positive Probeladung ausübt [16]:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$$

Formel 3: Elektrische Feldstärke (Kraft)

Neben der elektrischen Feldstärke zählen außerdem seine Ausbreitungsgeschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit), seine Gerichtetheit, wie auch die Tatsache, dass jede zeitliche Veränderung gleichzeitig ein magnetisches Feld erzeugt, zu den wichtigsten Eigenschaften des elektrischen Feldes. Unter elektrostatischen Feldern versteht man elektrische Felder ohne zeitliche Veränderung. Ruhende Ladungen sind also immer von einem elektrostatischen Feld umgeben [18].

Mathematisch betrachtet ist das elektrische Feld ein Vektorfeld, das jedem Punkt im Raum eine Kraft zuordnet [19]. Die wirkende Kraft ist positiv, wenn die beiden Ladungen das gleiche Vorzeichen haben. Die Ladungen stoßen sich gegenseitig ab. Haben die beiden Ladungen jedoch unterschiedliche Vorzeichen, so ist die Kraft negativ und die Ladungen ziehen einander an [16].

„Die Stärke und Richtung des elektrischen Feldes werden durch Feldlinien dargestellt. Die Richtung der Feldlinien verläuft von Plus nach Minus. Die Richtung der Feldlinien bestimmen die Kräfte, die im elektrischen Feld auf Objekte wirken [17].“

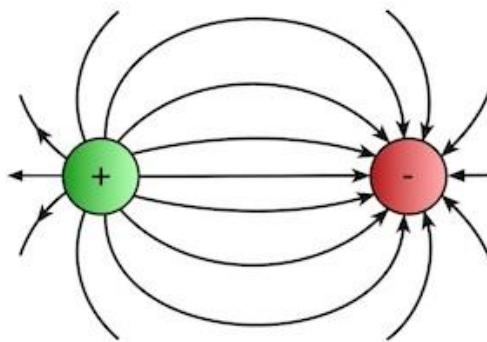


Abbildung 5: Feldlinien zwischen zwei ungleichen Ladungen [20]

Feldlinien verlaufen, wie auch aus Abbildung 5 ersichtlich, immer senkrecht von der positiven Ladung zur negativen, durchkreuzen sich nicht und laufen niemals zusammen. Die Dichte der Feldlinien ist ein Maß für die Stärke des elektrischen Feldes [16, 21].

Die elektrische Feldstärke ist abhängig von der Größe des Ladungsunterschieds, also der elektrischen Spannung, sowie dem Abstand zwischen den Ladungsträgern. Je größer die Spannung und je kleiner der Abstand ist, desto größer ist die elektrische Feldstärke (siehe Formel 1 in 4.4.1).

Daraus ergibt sich auch die Einheitengleichung für die elektrische Feldstärke:

$$\frac{V}{m} = \frac{\frac{J}{C}}{m} = \frac{J}{C * m} = \frac{N * m}{C * m} = \frac{N}{C}$$

Formel 4: Einheitengleichung der elektrischen Feldstärke

Wird die Spannung allerdings zu groß, beziehungsweise der Abstand zu klein, so findet ein Ladungsaustausch statt, bei welchem die freiwerdende Energie sehr groß sein kann. Ein Lichtbogen und ein Knistern kennzeichnen diesen Ladungsaustausch. Diesen Vorgang nennt man *Durchschlagen*. Als *Durchschlagsfestigkeit* bezeichnet man die elektrische Feldstärke, welche ein Stoff aushält, bevor er durchschlägt. Übersteigt man die Durchschlagsfestigkeit, werden die Elektronen im elektrischen Feld so stark beschleunigt, dass bei der Kollision mit neutralen Atomen Ionen und Elektronen entstehen. Für die Durchschlagsfestigkeit ist die Elektrodenbeschaffenheit von großer Bedeutung. So kann bei zwei gegenüberliegenden, spitzen Elektroden bereits 1kV genügen, damit das Material durchschlägt. Diesen Effekt kann man beobachten, da die Feldlinien an den Rändern der Elektroden sehr dicht sind beziehungsweise die elektrische Feldstärke sehr hoch ist [17].

Unterschieden wird zwischen homogenen und inhomogenen elektrischen Feldern. Im homogenen elektrischen Feld verlaufen die Feldlinien überall parallel, an den Rändern eines Plattenkondensators sind die Feldlinien allerdings gekrümmt, siehe

Abbildung 6.

Weiters sind die Feldlinien gleich dicht und gleichgerichtet. Daher ist die Kraft und somit die Feldstärke auf eine Probeladung im homogenen elektrischen Feld auch an allen Stellen gleich groß. Im inhomogenen elektrischen Feld sind die Feldlinien nicht parallel und die Kraft, beziehungsweise das elektrische Feld, ist von Ort zu Ort unterschiedlich stark [16, 21].

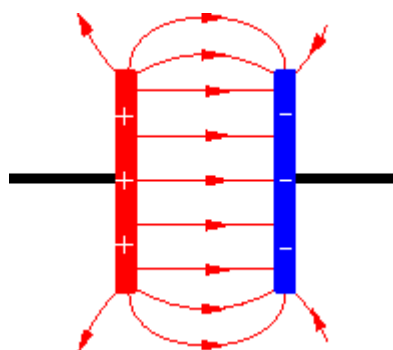


Abbildung 6: Homogenes elektrisches Feld [22]

4.5. Aufbau

Der experimentelle Aufbau zur Inbetriebnahme der Aktoren besteht aus den in den folgenden drei Punkten behandelten Komponenten.

4.5.1. Kunststoffrahmen

Das Grundgerüst bildet ein 3D-gedruckter Polylactid (PLA)-Rahmen mit den in *Abbildung 7* dargestellten Maßen und einer Materialdicke von 0,1 mm. Dabei ist dieser als Trägermaterial für die Stabilität des gesamten Aktors verantwortlich. Gleichzeitig muss allerdings die für die Verformung notwendige Flexibilität gewährleistet bleiben. Die richtigen Maße zu ermitteln stellte daher eine große Herausforderung dar. Wichtig war außerdem, darauf zu achten, dass die Ecken und Kanten des Rahmens abgerundet, nicht scharf sind, sodass das Elastomer, welches über den Rahmen gespannt wird, nicht beschädigt wird.

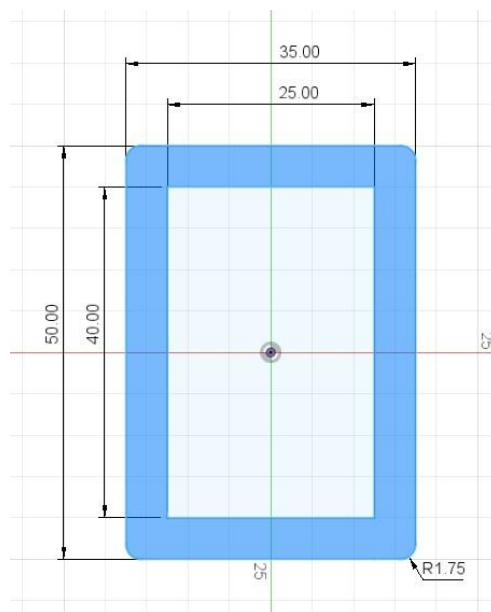


Abbildung 7: PLA-Rahmen [E]

4.5.2. 3M Klebeband

Das Kernelement des Aktors als dielektrisches Elastomer ist das doppelseitig-klebende Band VHB4910 der Marke 3M. Dieses eignet sich aufgrund mehrerer Faktoren besonders gut für den vorliegenden Anwendungsfall. Dazu zählt in erster Linie die starke Elastizität des Bandes (es können Dehnungen bis zu 300% der ursprünglichen Länge erreicht werden) und die hohe Durchschlagsfestigkeit, aber auch die hohe Temperaturbeständigkeit (kurzzeitig bis 150°C, dauerhaft bis 90°C), sowie die gute Alterungsbeständigkeit [23]. Hierbei musste durch zahlreiche Versuche die richtige Spannung des Klebebandes ermittelt werden. Um eine ideale Haftung an den PLA-Rahmen zu gewährleisten, wurden die Oberflächen mit Isopropanol (Isopropylalkohol) gereinigt.

4.5.3. 8481 Premium Carbon Conductive Grease

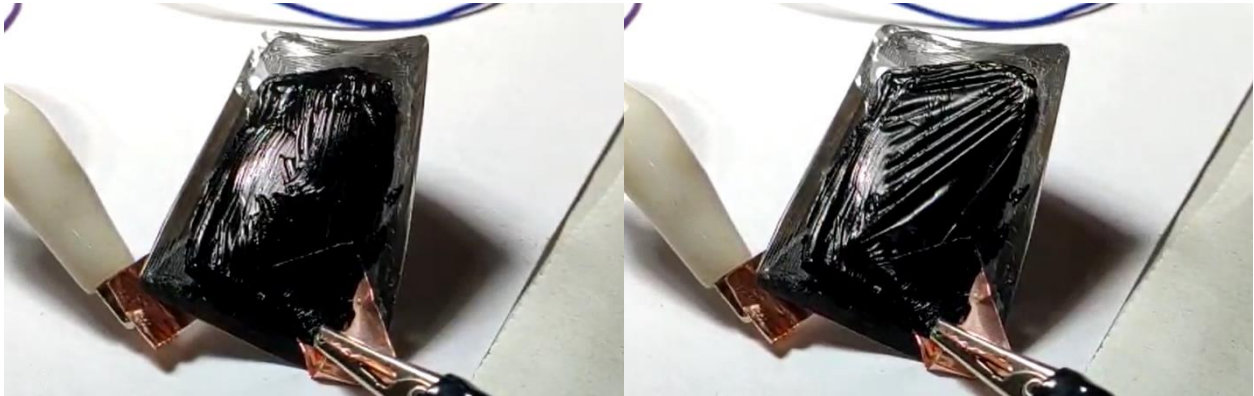
Als flexible Elektrode wird das Premium Carbon Conductive Grease, ein elektrisch leitendes Fett mit synthetischer Ölbasis, der Firma *M.G. Chemicals* verwendet. Dabei dient ein amorphes¹ Sili- ciumoxid als flexibilitätsgewährende Komponente, dadurch, dass es nicht aushärtet oder austrocknet. Acetylenruß (Korndurchmesser: 30-50 nm) stellt die elektrisch leitfähige Komponente². Das Premium Carbon Conductive Grease eignet sich besonders gut dafür, elektrischen Kontakt zwischen unregelmäßigen, unförmigen Oberflächen herzustellen [24, 25].

Ein selbstklebendes Kupferband dient als Kontaktstelle zwischen dem Premium Carbon Conduc- tive Grease und den Anschlussklemmen der Hochspannungsversorgung.

¹ Nicht-kristalline, unregelmäßige Struktur eines Stoffes

² Die Inhaltsstoffe können der Rückseite des Produktes entnommen werden.

Beim Auftragen des Premium Carbon Conductive Grease war besondere Vorsicht geboten, da es sehr schnell, sehr stark an jeglichen Oberflächen haftet und leicht verschmiert. Dadurch besteht die große Gefahr, die beiden entstandenen Elektroden kurzzuschließen. Weiters ist es sehr empfehlenswert, Schutzhandschuhe zu tragen. Weiters kann es bei ungenauem Auftragen sein, dass Funken von einer Seite zur anderen überspringen und dadurch der Aktor zerstört wird.



*Abbildung 8: Fertig aufgebauter Polymeraktor-Prototyp [E]
links ohne elektrische Spannung, rechts unter elektrischer Hochspannung*

5. Hochspannungsversorgung

Die zur Ansteuerung der Aktoren benötigte Hochspannung wird mit Hilfe eines CCFL-Inverters erzeugt. Ein gewöhnlicher Boost-Converter wäre als Hochspannungsgenerator ungeeignet gewesen, da die Schalttransistoren einen sehr geringen Einschaltwiderstand und eine hohe Sperrspannung aufweisen müssten, sich diese beiden Eigenschaften aber gegenseitig ausschließen [26]. Der CCFL-Inverter wird mit 12V Gleichspannung gespeist und gibt eine sinusförmige Hochspannung mit hoher Frequenz aus. Anschließend wird diese Wechselspannung über eine Hochspannungskaskade gleichgerichtet und verstärkt.

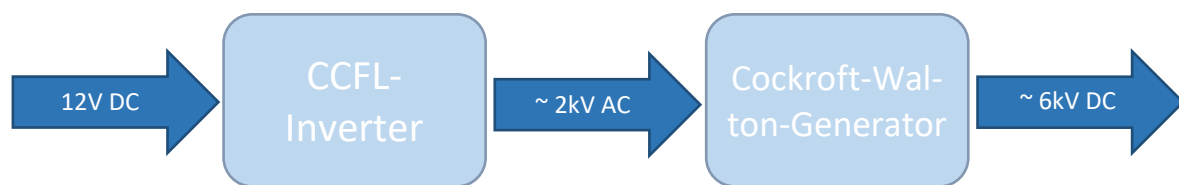


Abbildung 9: Blockschaftbild Hochspannungsversorgung [E]

5.1. CCFL-Inverter

CCFL-Inverter sind als Wechselrichter eine Variante von Resonanzwandlern [27], die (bei etwa 50 kHz) mit Hochfrequenz und typischerweise möglichst konstanter Last arbeiten [28, 29]. Resonanzwandler sind primär getaktete Wandler³ mit galvanischer Trennung zwischen Eingang und Ausgang [26]. In Resonanzwandlern werden die Transistoren durch einen LC-Resonanzkreis im Stromnulldurchgang (Zero Current Switching) beziehungsweise im Spannungsnulldurchgang (Zero Voltage Switching) geschaltet. Somit sind die Schaltverluste sehr gering (als Kollektorresonanz-Prinzip bezeichnet) [29, 30]. Darüber hinaus kann man auch bei hohen Leistungen mit hohen Schaltfrequenzen arbeiten [26].

Verwendet werden CCFL-Inverter hauptsächlich für Beleuchtung (Leuchtstofflampen und Leuchtstoffröhren, Hintergrundbeleuchtung für LCD-Displays, Werbeschilder, et cetera), aber auch für induktive Erwärmung (Härten, Schmelzen, Anlassen, Induktionskochplatten) [29].

³ Primär getaktet, bedeutet, dass die Schalttransistoren auf der Primärseite des Transformators arbeiten [30].

5.1.1. Royer Circuit

Die auch als Royer Converter (nach George H. Royer) bezeichnete Schaltung, war die erste, die, basierend auf dem Prinzip der Transformatorkernsättigung, nach der Funktionsweise heutiger CCFL-Inverter operierte [29].

Die in *Abbildung 10* zu sehende Darstellung der Royer-Schaltung entspricht einem Halbbrückenwandler. Das bedeutet, dass die Versorgungsspannung über zwei Kondensatoren (wechselgerichtet) halbiert und einem Wicklungsende der Primärwicklung zugeführt wird. Über zwei Transistoren wird das andere Wicklungsende abwechselnd auf die Versorgungsspannung und Ground geschaltet [31].

Zur vereinfachten Erklärung, wird angenommen, dass die Schaltung nicht selbststartend ist. Gerät der Transformatorkern in Sättigung, bricht die in einer der Hilfswicklungen des Transformators induzierte Spannung ein. Ein Strom wird induziert, wodurch einer der beiden Bipolartransistoren in die Sperrphase gelangt und der andere in die Leitphase. So ergibt ein ständiges Umschalten zwischen Sperr- und Leitphase. Dadurch entsteht eine Wechselspannung, welche allerdings als Rechtecksignal ausgegeben wird.

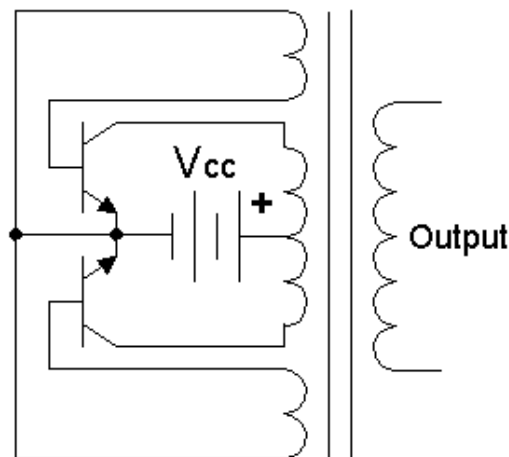


Abbildung 10: Prinzipschaltung nach Royer [32]

Für ein sinusförmiges Ausgangssignal muss eine Schaltungserweiterung um einen der Primärwicklung parallel geschalteten Kondensator vorgenommen werden. So wird die positive Halbwelle des Sinussignals an der Primärwicklung erzeugt und ausgegeben, die negative Halbwelle des Sinussignals an der Sekundärwicklung. Am Ausgang erhält man anschließend einen vollständigen Sinus [33].

5.1.2. Modernes Schaltungsprinzip

In den ersten Schaltungsentwürfen arbeitete die sekundärseitige Schaltung des Transformators auf einer wesentlich höheren Frequenz als die primärseitige Schaltung. Als eine weiterentwickelte Verbesserung gilt die sogenannte *Resonanzschaltung der dritten Harmonischen*. Dabei ist die Resonanzfrequenz des sekundärseitigen Stromkreises das Dreifache der primärseitigen Resonanzfrequenz. So wird eine harmonische Schwingung dritter Ordnung auf der Sekundärseite erzeugt [34]. Dadurch verkleinern sich nicht nur die Maße der Wechselrichterschaltung, sondern auch der Wirkungsgrad verbessert sich erheblich [29, 34].

Mittlerweile arbeiten jedoch Primär- und Sekundärseite des Transformators nahezu bei gleicher Grundfrequenz. Hierbei wird die Primärseite über den Schalttransistor direkt vom Resonanzstrom des sekundärseitigen Stromkreises geschaltet. Dies verbessert wiederum den Wirkungsgrad und vereinfacht den Schaltungsaufbau [34].

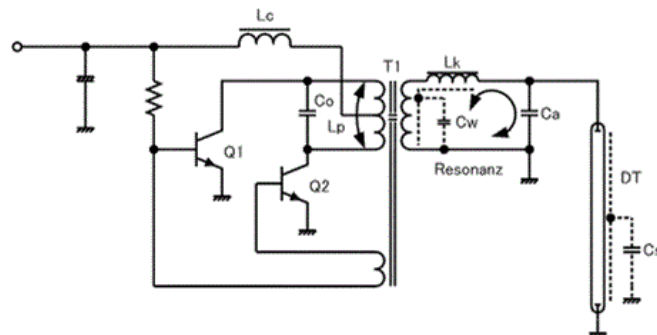


Abbildung 11: Moderne Resonanzwandlerschaltung [35]

5.1.3. Funktionsweise

Die Funktionsweise wird im folgenden Abschnitt anhand von Abbildung 12 erklärt. Zunächst wird über die beiden Feldeffekttransistoren T_1 und T_2 , welche in Halbbrückenkonfiguration geschaltet sind, eine Rechteckspannung erzeugt. Hinter den Transistoren befindet sich der primärseitige LC-Serienresonanzkreis, zu welchem der Trenntransformator T_r in Serie geschaltet ist [26]. Der Schwingkreis wird über T_1 und T_2 angesteuert, wobei beide abwechselnd durchschaltend die gleiche Leitphasendauer haben.

„Kleine Störungen und Rauschen führen wie bei jedem anderen Oszillator zum Anschwingen. Sobald Schwingungen auftreten, werden die beiden Transistoren stets gegenphasig angesteuert und können nie zugleich leiten [29].“

Im ersten Moment beträgt die Spannung am Kondensator C_r 0V. Wird der Transistor T_1 leitend, so fließt ein Strom in Form einer Sinushalbwelle durch die primärseitige Transformatorwicklung in den Kondensator C_r des Serienschwingkreises. Dieser lädt sich bis der Ladestrom Null wird auf die Eingangsspannung U_e auf. Dann sperrt der Transistor T_1 , T_2 wird niederohmig. Die Resonanzkapazität C_r entlädt sich anschließend über die Primärwicklung des Transformators und den T_2 , welcher dadurch in seine Leitphase gerät. Nun fließt der Strom in die entgegengesetzte Richtung gegen Ground, wodurch die negative Halbwelle der Sinusschwingung entsteht. Der Strom nimmt wieder auf 0A ab, T_1 sperrt. Der gesamte Prozess startet mit dem Leitendwerden des Transistors T_1 von vorne.

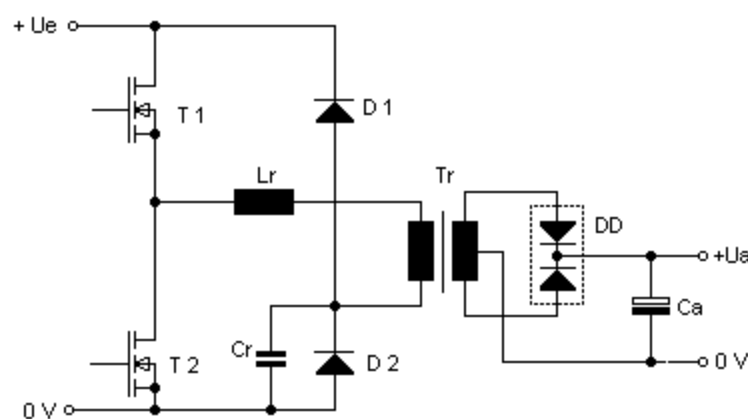


Abbildung 12: CCFL-Inverter Prinzipschaltung [26]

„Bei jedem Umschwingen wird eine bestimmte Energiemenge von der Primärseite auf die Sekundärseite des Transformators abgegeben. Der Transformator verhält sich dabei primärseitig wie eine Spannungsquelle [30].“

Der aus den beiden Halbwellen „zusammengefügte“ sinusförmige Gesamtstrom induziert in der sekundärseitigen Wicklung des Transformators eine nahezu sinusförmige Wechselspannung. Dadurch entstehen praktisch keine Oberwellen. Die sekundärseitige Ausgangsspannung wird während der Stromhalbwelle auf die Primärseite transformiert und wirkt dort dem Strom entgegen [30, 36].

Der maximale Ausgangsstrom wird erreicht, wenn der Wandler bei Resonanzfrequenz arbeitet [26, 36]. Diese leitet sich wie folgt aus dem LC-Serienschwingkreis her:

$$Z = j\omega_R L + \frac{1}{j\omega_R C}$$

$$Z = j * \left(\omega_R L - \frac{1}{\omega_R C} \right) = 0$$

$$\omega_R L = \frac{1}{\omega_R C}$$

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$f_R = \frac{1}{2\pi * \sqrt{LC}}$$

Formel 5: Herleitung der Resonanzfrequenz im LC-Serienschwingkreis

Halten die Bauteile diesen maximalen Strom dauerhaft aus, spricht man von *Dauerkurzschlussfestigkeit*, was einen großen Vorteil von Resonanzwandlern darstellt. Der Resonanzkreis würde den Strom im Falle eines ausgangsseitigen Kurzschlusses immer weiter aufschaukeln und somit den Rechteckgenerator zu stark belasten bis dieser zerstört wird. Die primärseitig implementierten Dioden dienen der Spannungsbegrenzung am Kondensator des Serienschwingkreises. Gleichzeitig bedeutet dies auch eine Strombegrenzung im Kurzschlussfall [26].

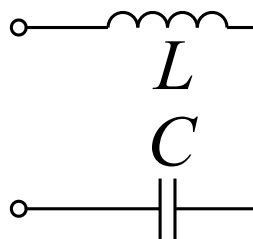


Abbildung 13: Idealer LC-Serienschwingkreis [37]

CCFL-Inverter bieten neben den geringen Schaltverlusten noch zahlreiche weitere Vorteile. So sind sie beispielsweise, wie bereits erläutert, auch ohne elektronische Überwachung leerlauf- und kurzschlussfest. Da außerdem in den Zuleitungen der Transistoren keine schnellen Änderungen der Ströme auftreten, verringern sich EMV-Probleme sowie Schwierigkeiten beim Leiterbahn-Design [26, 30]. Des Weiteren sind sie sehr klein und kompakt bei sehr hohem Wirkungsgrad [34].

5.1.4. Steuerplatine

Für die Ansteuerung des CCFL-Inverters wurde eine Schaltung mit dem Programm *EAGLE 9.2.2.* der Firma *Autodesk* [38]. entworfen, welche einen Spannungsregler enthält. Dieser ist notwendig, da der verwendete CCFL-Inverter sowohl eine 5V-, als auch eine 12V-Versorgungsspannung benötigt.

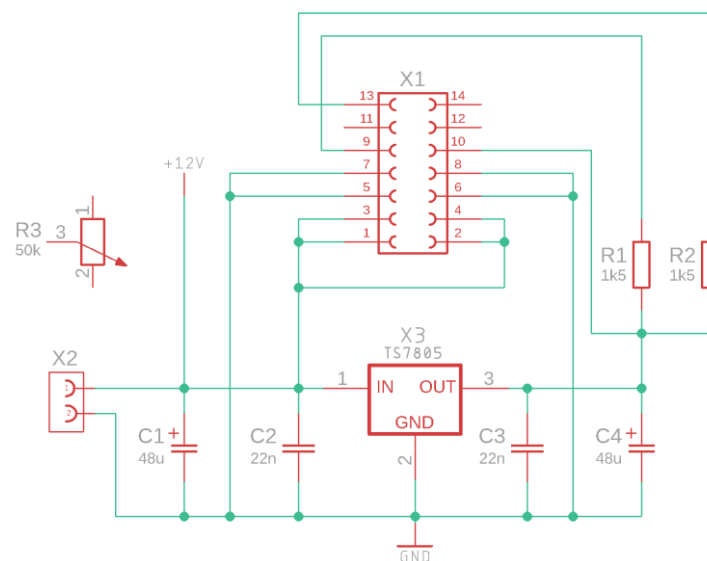


Abbildung 14: Schaltplan Steuerplatine [E]

Über die Eingangsklemmen X_2 -1 (+12V) und X_2 -2 (Ground) wird die Versorgungsspannung für die gesamte Schaltung herbeigeführt. Der 14-polige Wannenstecker X_1 verbindet den CCFL-Inverter mit der Leiterplatte. Dabei dienen die Pins 1 bis 4 der Spannungsversorgung mit 12V und die Pins 5 bis 8 der Verbindung zu Ground. Mit dem Vorwiderstand R_1 beziehungsweise R_2 werden die Pins 9 und 13 an die 5V Spannung des Spannungsreglers TS7805 angeschlossen, während Pin 10 direkt am Ausgang des TS7805 liegt.

Die Bohrungen mit einem Durchmesser von 3mm in allen vier Ecken der Platine dienen der Möglichkeit, die Platine mit dem CCFL-Inverter fest und sicher zu verbinden.

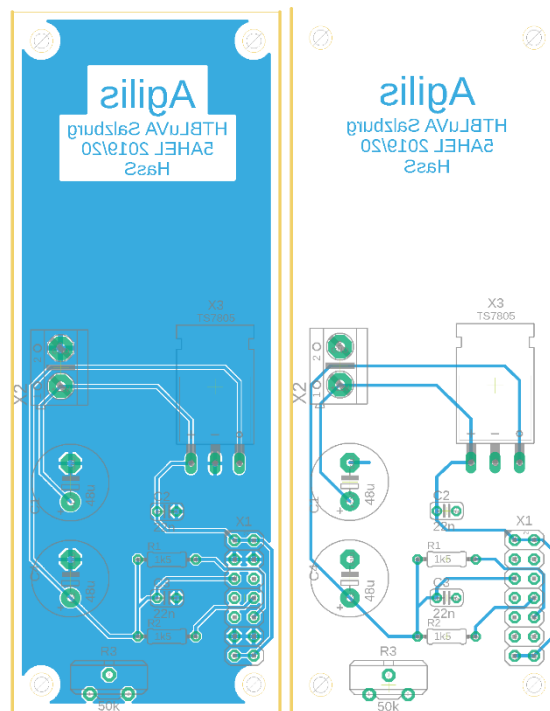


Abbildung 15: Layout Steuerplatine [E]
links mit Ground-Polygon; rechts zur besseren Veranschaulichung ohne Polygon

5.1.5. Messergebnisse

Die Messwerte für den Spannungsverlauf und die Frequenz, welche in Tabelle 2 dargestellt ist, wurden mittels eines Hochspannungstastkopfes und eines Oszilloskops erfasst. Weiters wurde der Stromverlauf mit einer Stromzange aufgenommen.

Aus der Messung wird ersichtlich, dass der CCFL-Inverter zwischen ungefähr 4V und 12V arbeiten kann.

Eingangsspannung U_E in [V]	Ausgangsspannung $U_{A,ss}$ in [V]	Ausgangsspannung $U_{A,eff}$ in [V]	Eingangsstrom $I_{E,eff}$ in [mA]	Ausgangsstrom $I_{A,eff}$ in [mA]
0	0	0	0	0
1	6	2	5	1
2	8	3	7	2
3	12	4	15	2
4	900	318	19	4
5	1400	495	28	5
6	1860	658	36	6
7	2120	750	42	7
8	2400	849	59	7
9	2660	940	101	8
10	2760	976	204	8
11	2760	976	267	9
12	2780	983	302	9

Tabelle 1: Messwerte CCFL-Inverter

Spannungsverlauf CCFL-Inverter

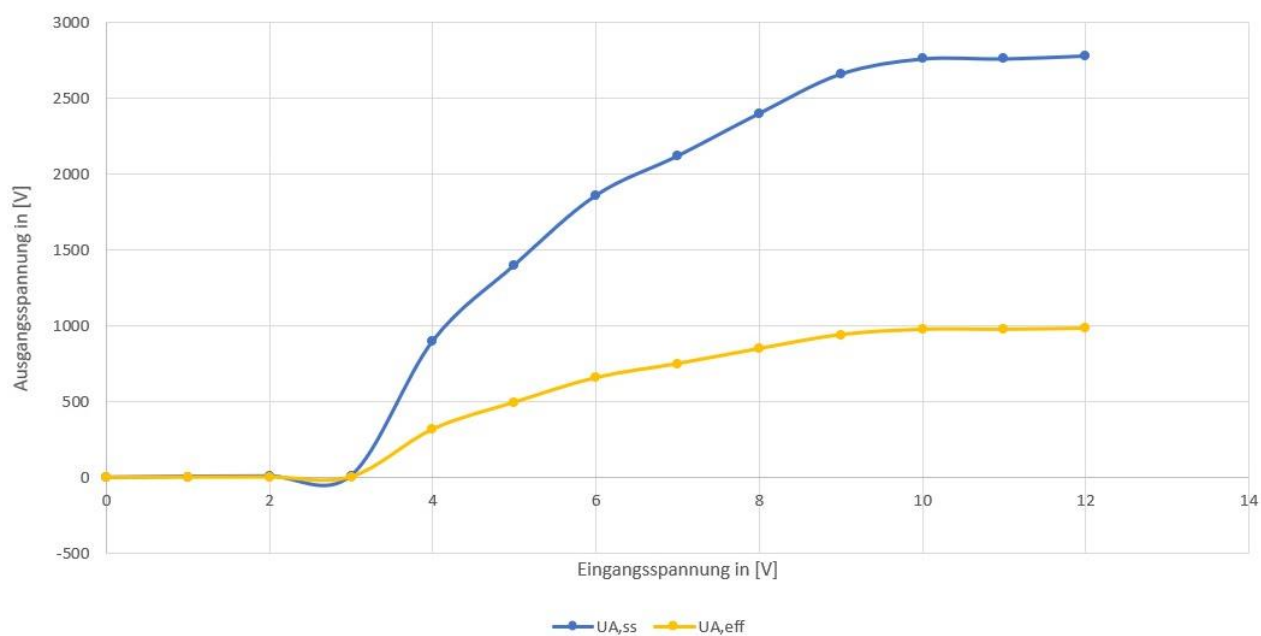


Abbildung 16: Spannungsverlauf CCFL-Inverter [E]

Stromverlauf CCFL-Inverter

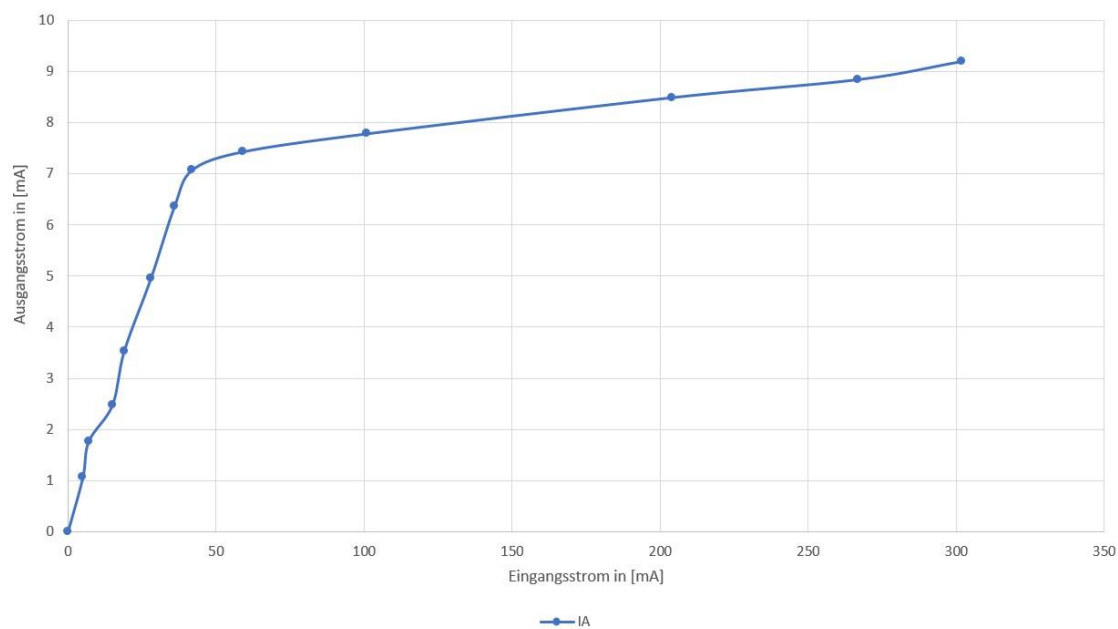


Abbildung 17: Stromverlauf CCFL-Inverter [E]

5.2. Cockroft-Walton-Generator

Der Cockroft-Walton-Generator ist ein Spannungsvervielfacher, der eine (niedrige) Wechselspannung in eine hohe Gleichspannung umwandelt. Er ist benannt nach den beiden Physikern John Cockroft und Ernest Walton, die diese Schaltung entwickelten. In den 1930er Jahren gelang damit zum ersten Mal der Versuch einer Kernreaktion mittels künstlich beschleunigter Teilchen. Typischerweise kommt er bei Anwendungen, bei welchen keine hohen Ströme benötigt werden, zum Einsatz [39, 40].

Bestehend aus zwei Kondensatorsäulen, der Schubsäule und der Ladesäule, welche über hochspannungsfeste Dioden miteinander verbunden sind, ist der Cockroft-Walton-Generator eine Kaskade von Spannungsverdopplern nach Villard oder Greinacher. Dabei wird die Spannung nur näherungsweise verdoppelt und vielmehr stufenweise erhöht [41].

5.2.1. Spannungsverdoppler nach Villard

Die nach Paul Villard benannte Schaltung besteht aus einem Kondensator und einer in Reihe geschalteten Diode. Der Kondensator wird während der negativen Sinushalbwellen auf die Eingangsspitzenspannung aufgeladen. Im Leerlauf ist am Ausgang, parallel zur Diode, der doppelte Spannungswert der Eingangswechselspannung messbar. Die Nulllinie der Eingangsspannung wird um ihren eigenen Spitzenwert in positiver Richtung verschoben, während die negativen Halbwellen auf die positive Durchlassspannung der Dioden gerichtet werden. So wird eine Einweggleichrichtung erreicht [42, 43].

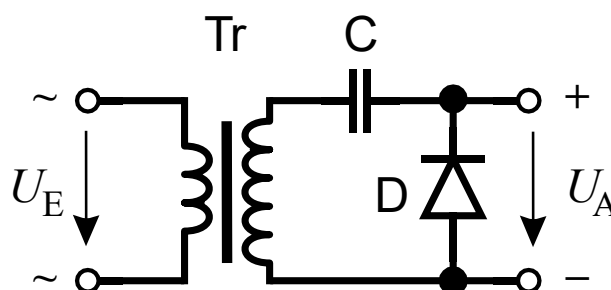


Abbildung 18: Villard Schaltung [44]

5.2.2. Greinacher-Schaltung

Dieses von Heinrich Greinacher erfundene Gleichrichtersystem besteht aus zwei Villard-Stufen. Sie ist auch bekannt als Halbwellen-Spannungsverdoppler, da die Kondensatoren während jeder Halbperiode geladen werden [42, 43]. Die Schaltung soll den größten Teil der Welligkeit bei gleichbleibender Spitzenausgangsspannung entfernen [43].

Dabei werden beide Kondensatoren auf den Spitzenwert der Eingangswechselspannung aufgeladen. Parallel zur Reihenschaltung der Kondensatoren wird die Ausgangsspannung, welche keinen eindeutigen Massebezug hat, gemessen [42].

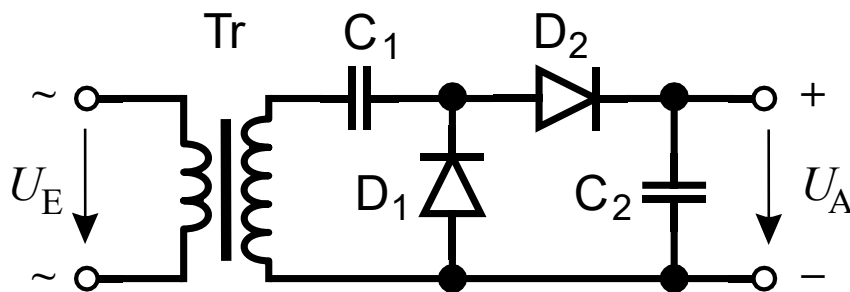


Abbildung 19: Greinacher Schaltung [45]

5.2.3. Funktionsweise

Schaltet man mehrere Greinacher- beziehungsweise Villard-Stufen hintereinander, können theoretisch unendlich hohe Gleichspannungen erzeugt werden. In der Praxis ist dies allerdings nicht möglich, da sich durch die Reihenschaltung der Kondensatoren ihre kapazitiven Blindwiderstände aufsummieren. Somit steigt der Innenwiderstand der Kaskade mit wachsender Anzahl der Stufen immer weiter an und der Strom wird geringer. Weiters wird die Kapazität der Kondensatoren dadurch, dass sie in Reihe geschaltet sind immer kleiner und die Ausgangsspannung bricht schließlich bereits bei minimaler Belastung zusammen [46, 47]. Anhand von Abbildung 20 soll die Funktionsweise des Cockroft-Walton-Generators erklärt werden.

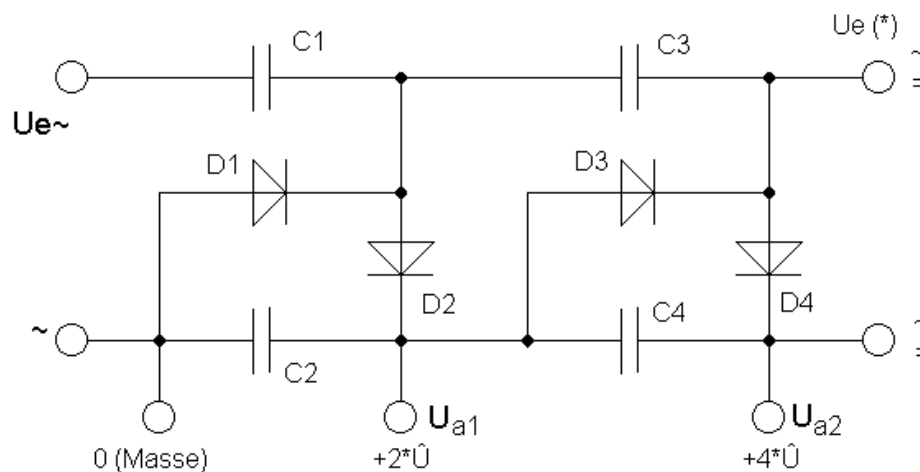


Abbildung 20: Cockcroft-Walton-Generator Schaltung [46]

Der linken Seite wird die speisende Wechselspannung zugeführt, auf der rechten Seite können weitere Kaskadenstufen folgen. Während der negativen Halbwelle der Eingangswechselspannung fließt ein Strom von Ground weg über die Diode D_1 und den Kondensator C_1 . Der Kondensator C_1 wird bis zum Spitzenwert der Eingangsspannung U_e aufgeladen. Währenddessen sind der Kondensator C_2 und die Diode D_2 stromlos. Sobald die negative Halbwelle der Eingangsspannung ihren Nulldurchgang erreicht, fließt kein Strom mehr, der Kondensator C_1 bleibt geladen und die Eingangsspannung wird positiv.

Der Strom fließt nun über die beiden Kondensatoren C_1 und C_2 , sowie die Diode D_2 gegen Masse. Dadurch entlädt sich C_1 (nicht vollständig) über C_2 , welcher somit aufgeladen wird. Der gesamte Vorgang wiederholt sich ständig, beginnend mit der negativen Halbwelle der Eingangswechselspannung. Es sind mehrere Schwingungsperioden nötig, um den Kondensator C_2 auf die doppelte Spitzenspannung des Eingangswertes zu laden. Dies dauert relative lange, da sich der Kondensator C_1 immer ein wenig entlädt. Ist der Kondensator C_2 geladen, fließt kein weiterer Ladestrom mehr, die beiden Kondensatoren bleiben geladen [46].

An den Ausgang der ersten Kaskadenstufe wird über C_3 die zweite Stufe geschaltet. Der Gleichspannungsanteil, der in der ersten Stufe bereits enthalten ist, dringt nicht bis zur zweiten Stufe durch. Allerdings lassen die beiden Kondensatoren C_1 und C_2 den eingangsseitigen Wechselstrom der Quelle durch.

So bekommt also auch die zweite Stufe ihre speisende Wechselspannung und kann sie (theoretisch) verdoppeln [46]. Basierend auf diesem Funktionsprinzip muss jeder Kondensator eine Spannungsfestigkeit von nur der doppelten Eingangsspannung aufweisen. Aus demselben Grund ist auch die Frequenz der Restwelligkeit gleich der der speisenden Wechselspannung [47].

Nach einigen Schwingungsperioden ist auch der Kondensator C_4 auf dieselbe Spannung wie C_2 geladen. Dadurch, dass C_2 und C_4 in Reihe geschaltet sind, addieren sich ihre Einzelspannungen auf. Schließlich erhält man am Ausgang insgesamt den vierfachen Wert der Eingangsspannung. Jede weitere Stufe addiert nach diesem Prinzip die verdoppelte Eingangsspannung dazu. Daher liefert die Kaskade auch keine reine Gleichspannung [46].

Der Eingangsstrom und der Ausgangsstrom sind zueinander über einen Proportionalitätsfaktor, welcher der Anzahl der Kaskadenstufen entspricht, direkt proportional [42]:

$$I_E = n * I_A$$

Formel 6: Eingangsstrom des Cockroft-Walton-Generators

Wichtige Eigenschaften der verwendeten Bauteile sind hier hohe Güte (geringe Verluste) und hohe Spannungsfestigkeit bei den Kondensatoren, sowie die Tatsache, dass die Dioden schnelle Schaltdioden sein sollten.

Der größte Vorteil des Cockroft-Walton-Generators liegt in seiner Einfachheit. Die Anforderungen an einen schweren Transformator entfallen. Dadurch wird die Schaltung erheblich leichter/kompakter und auch kostengünstiger [48].

5.2.4. Simulation in LTSpice

In *LTSpice XVII* wurde die Schaltung entsprechend dem realen Aufbau mit vier Kaskadenstufen simuliert. Die Ausgangsspannung stimmt dabei auch ungefähr mit den in Tabelle 2 aufgenommenen Werten überein.

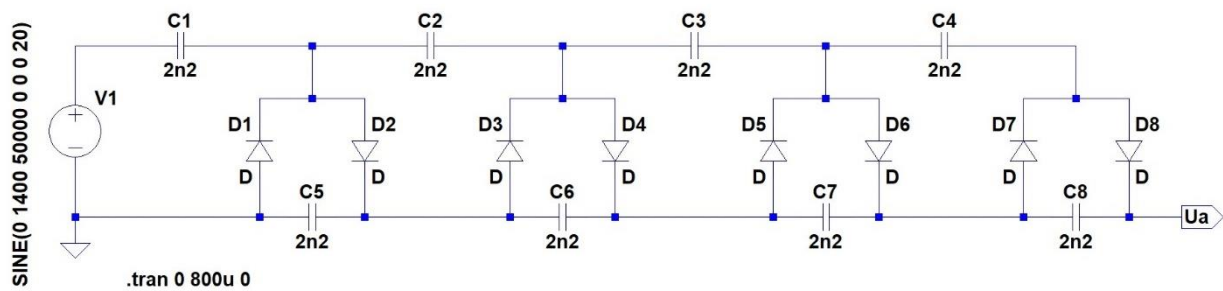


Abbildung 21: Cockcroft-Walton-Generator Schaltung in LTSpice [E]

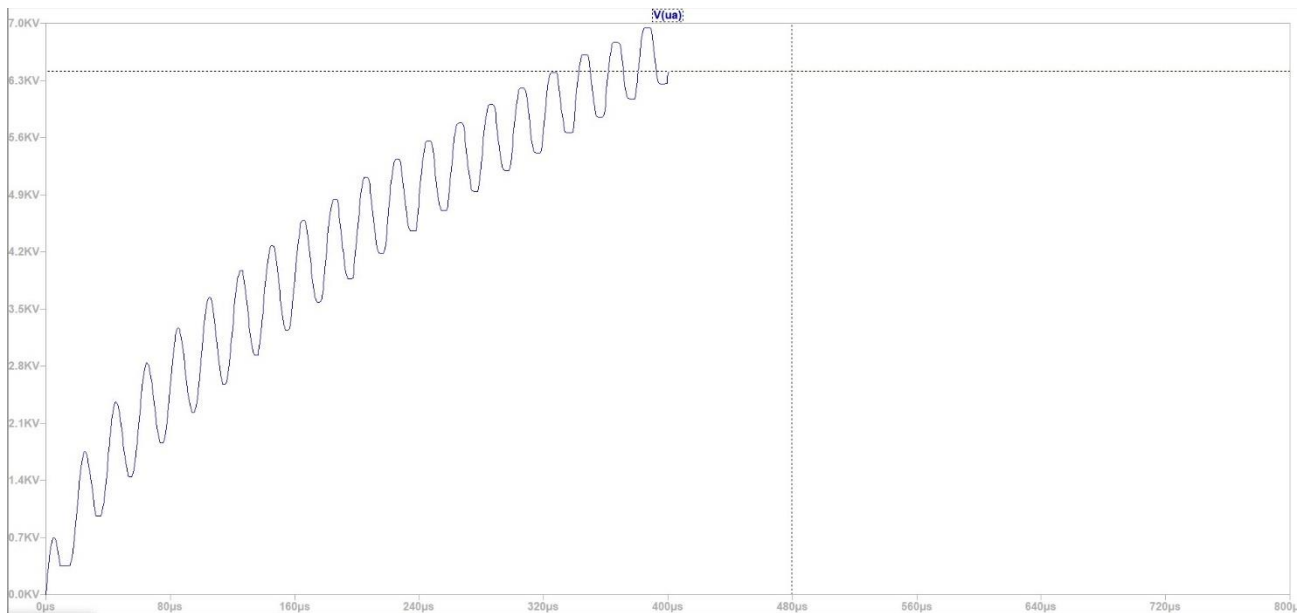


Abbildung 22: Simulation Cockcroft-Walton-Generator mit $U_A \approx 6,4\text{kV}$ [E]

5.2.5. Messergebnisse

Auch hier wurde die Ausgangsspannung und die Frequenz der Hochspannungskaskade mit einem Oszilloskop über einen Hochspannungstastkopf und die Ströme mit einer Stromzange gemessen.

Der Eingangsstrom des Cockroft-Walton-Generators ist in Tabelle 1 als Ausgangsstrom des CCFL-Inverters zu finden. Um die Spannungsfestigkeit zu erhöhen, wurden je zwei Dioden in Serie geschaltet.

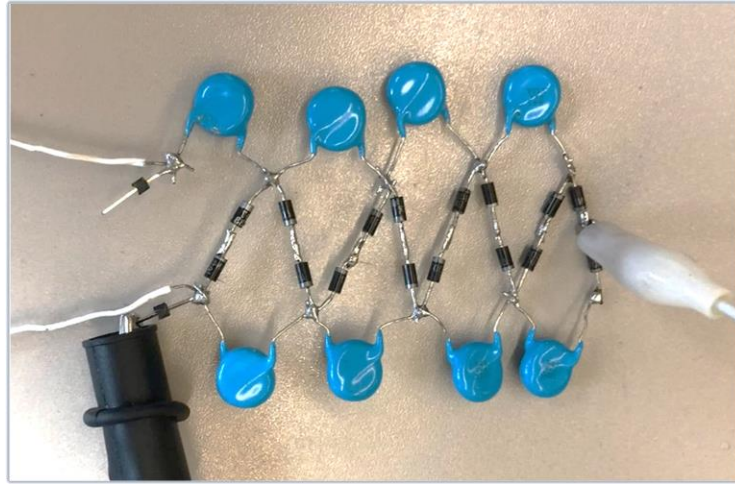


Abbildung 23: Schaltungsaufbau Cockroft-Walton-Generator mit vier Kaskadenstufen [E]
Bauteile: HV-KERKO 2,2n 6,3kV, DIODEN: 1N4007

Ausgangsspannung CCFL $U_{CCFL,ss}$ in [V]	Ausgangsspannung Kaskade $U_{A,eff}$ in [V]	Ausgangsstrom $I_{A,eff}$ in [mA]	Frequenz f in [kHz]
0	0	0	41
6	3	0	41
8	3	0	41
12	4	1	41
900	2227	1	41
1400	3342	1	40
1860	4384	2	40
2120	5179	2	40
2400	5732	2	40
2660	6159	2	39
2760	6251	2	39
2760	6281	2	39
2780	6277	2	38

Tabelle 2: Messwerte Cockroft-Walton-Generator

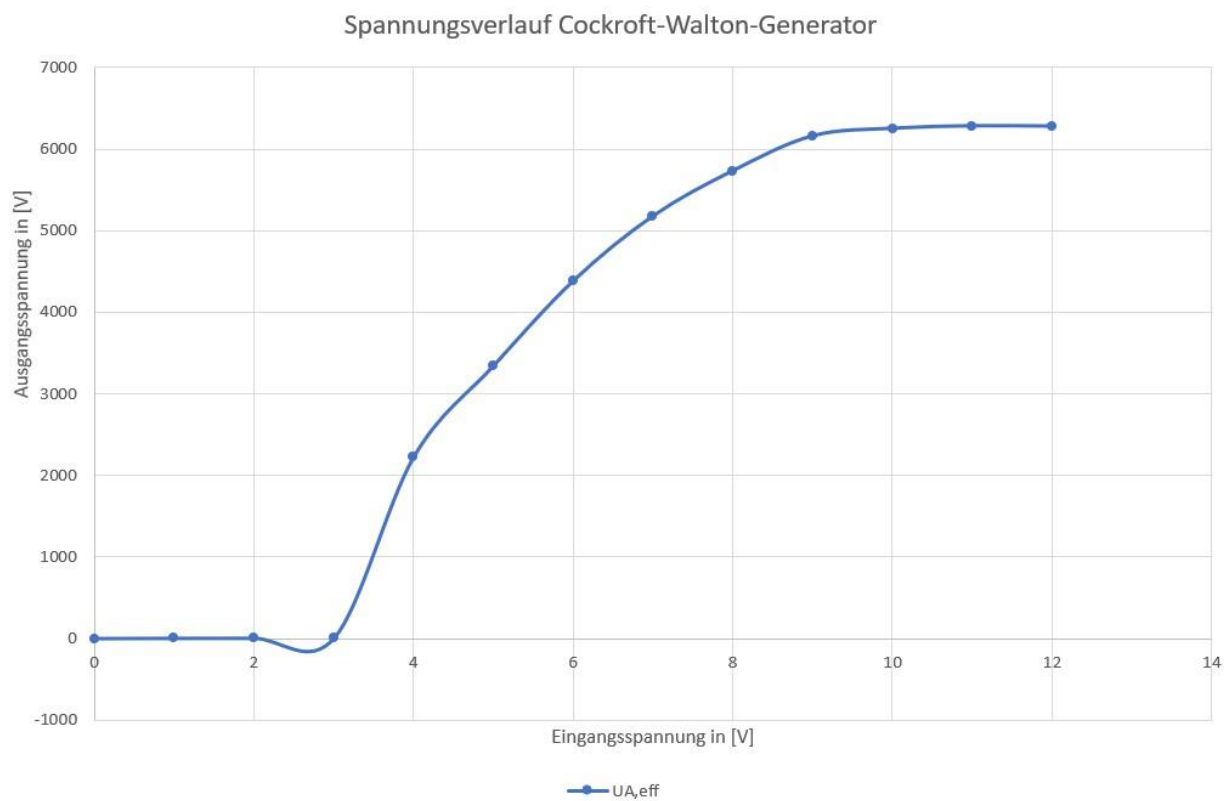


Abbildung 24: Spannungsverlauf Cockcroft-Walton-Generator [E]

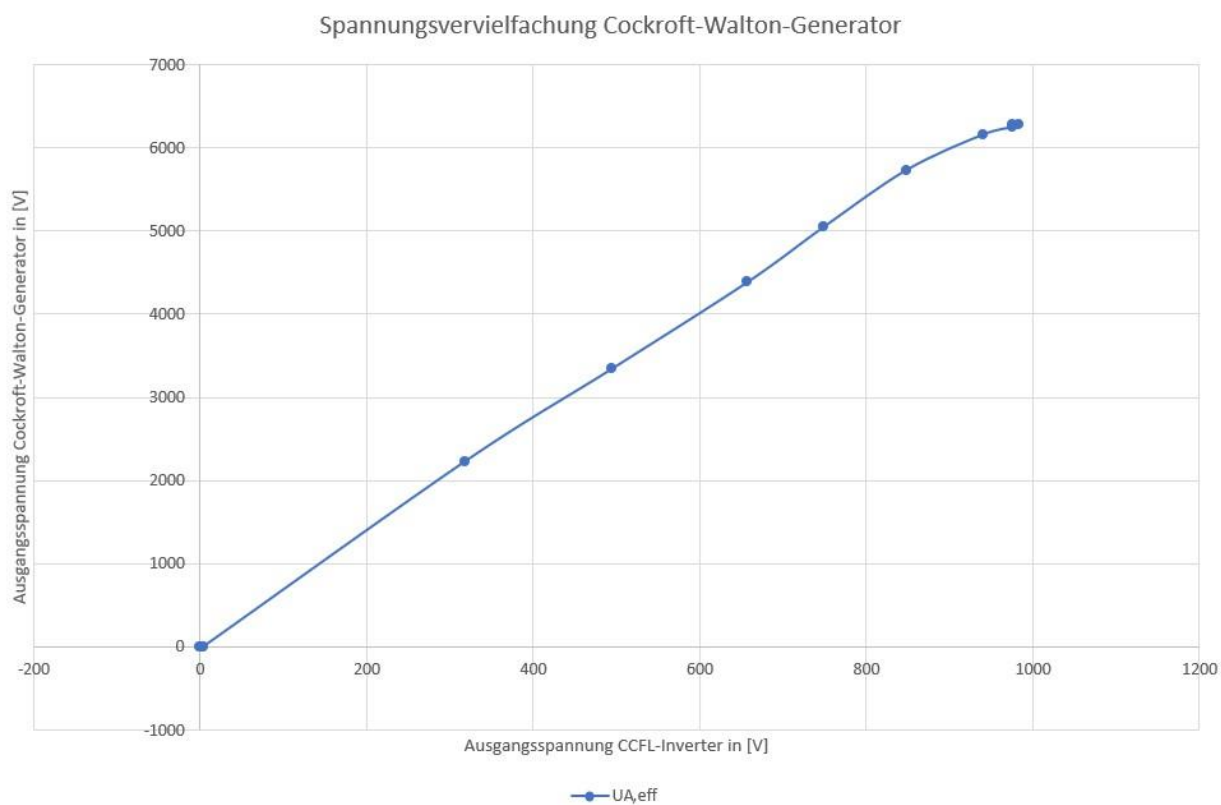


Abbildung 25: Spannungsvervielfachung Cockcroft-Walton-Generator [E]

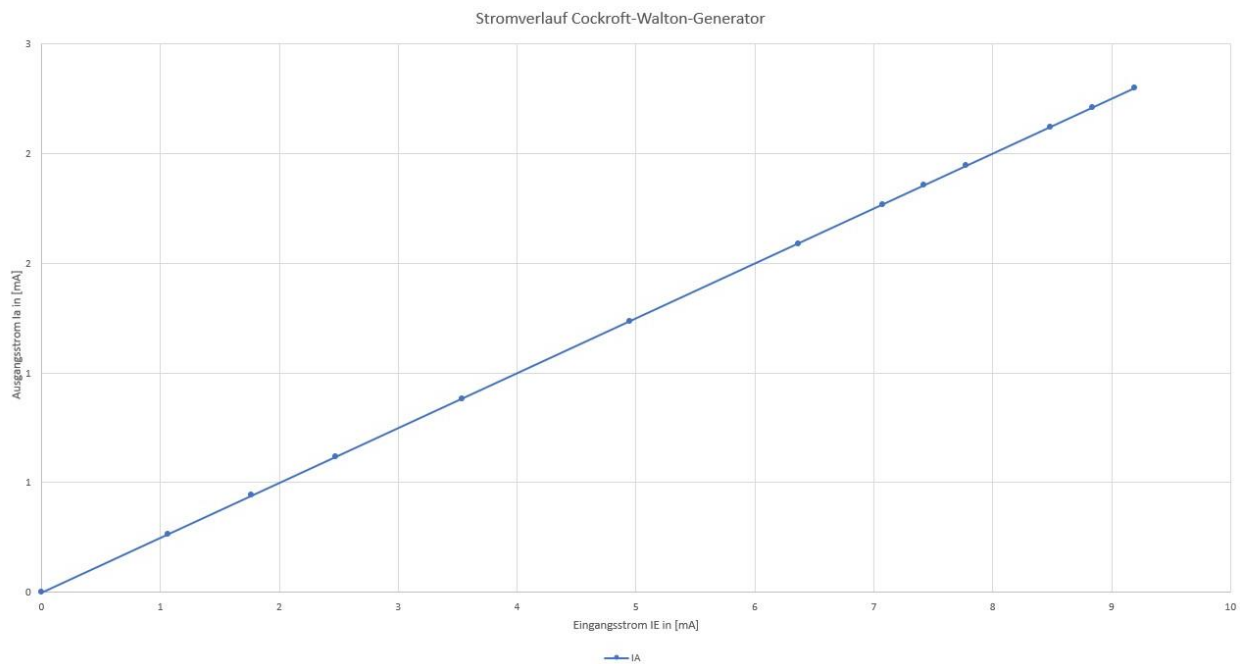


Abbildung 26: Stromverlauf Cockcroft-Walton-Generator [E]

Die Messergebnisse zeigen, dass die Spannungsvervielfachung nahezu linear abläuft. Ebenso verläuft die Stromkurve entsprechend Formel 6 linear. Die Ausgangsspannung der Hochspannungskaskade folgt allerdings nicht der theoretischen Formel:

$$U_A = 2 * N * U_{E,S}$$

Formel 7: Ausgangsspannung des Cockcroft-Walton-Generators

Wobei N die Anzahl der Kaskadenstufen und $U_{E,S} = U_{E,ss} / 2$ die Spitzenspannung des Eingangssignals – in diesem Fall die Ausgangsspannung des CCFL-Inverters – darstellen. Vielmehr entsprechen die Messergebnisse dem in Absatz 5.2.4 simulierten Ergebnis.

In der nachstehenden Abbildung 27 ist die Vorgehensweise der Spannungsvervielfachung und Gleichrichtung mittels Cockroft-Walton-Generator dargestellt.

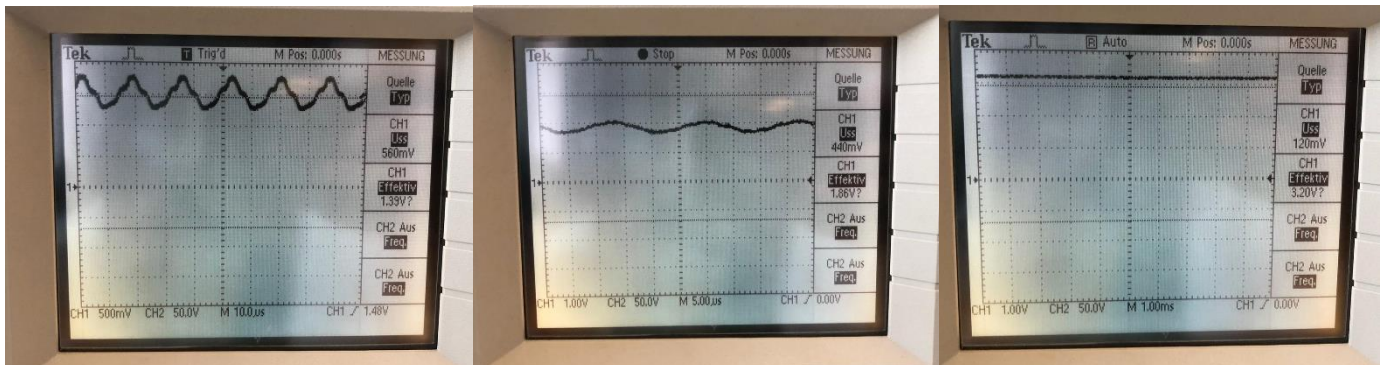


Abbildung 27: Gleichrichtung und Spannungsvervielfachung [E]

So erkennt man ganz links die Spannung nach dem ersten Kondensator der ersten Stufe. Im mittleren Bild ist der Spannungsverlauf zwischen dem ersten Diodenpaar dargestellt. Rechts sieht man die Ausgangsspannung des Cockroft-Walton-Generators am Ende der ersten Kaskadenstufe.

Abbildung 27 dient nur zur Veranschaulichung der Funktionsweise des Cockroft-Walton-Generators, die mitaufgenommenen Werte, welche am Oszilloskop sichtbar sind, sollen dabei nicht den aufgezeichneten Messwerten von Tabelle 2 entsprechen.

6. Xbox Kinect Sensorleiste

6.1. Hardware im Überblick

Die in diesem Projekt verwendete Sensorleiste Xbox-Kinect for Xbox One [3], kurz Xbox Kinect, ist eine von der Firma Microsoft entwickelte Hardware, die eine Vielzahl verschiedener Kameras und Sensoren beinhaltet. Sie wurde der Öffentlichkeit im Mai 2013 [43] von Microsoft vorgestellt und ist der Nachfolger der Xbox Kinect for Xbox 360. Obwohl anfänglich für die Nutzung in Spielen für die Spielekonsole Xbox One vorgesehen, wird die Sensorleiste heutzutage auch in vielen Projekten als günstige Hardware zur dreidimensionalen Erkennung der Umwelt genutzt. Aufgrund der hohen Datenrate beim Übertragen der Videostreams muss die Kamera per USB 3.0 – Schnittstelle mit einem Computer verbunden werden.

Die Sensorleiste beinhaltet mehrere Komponenten zur audiotecnischen und visuellen Erfassung von Lebewesen und Objekten. Neben der eingebauten Mikrofonkomponente, welche eine Lärmreduzierung beinhaltet, enthält die Sensorleiste die für dieses Projekt wichtigen Kameras. Hierzu gehören die HD-Farbkamera mit einer Auflösung von 1080 x 1920 Pixeln [44], eine Weitwinkel-Infrarotkamera mit 512 x 424 Pixeln [44] sowie die zugehörigen, starken Infrarotstrahler, welche notwendig sind, um für das Tracking von Objekten nicht von Umgebungslicht abhängig zu sein.

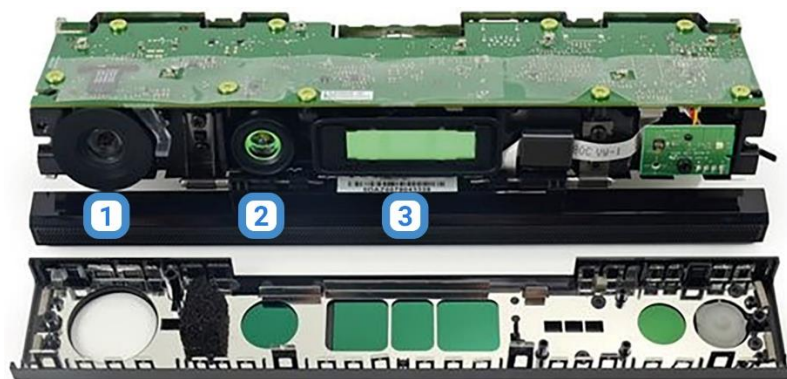


Abbildung 28: Xbox Kinect mit entferntem Gehäuse [49]

In der obigen Abbildung ist eine Xbox Kinect zu sehen, deren Gehäuse entfernt wurde. Hier sind die oben bereits genannten Komponenten gut zu erkennen. Von links nach rechts befinden sich unter der Hauptplatine der Xbox Kinect die RGB-Kamera (1) sowie die Infrarotkamera (2), jeweils mit fix installierter Weitwinkeloptik. In der Mitte der Einheit befindet sich der Infrarot-Emitter (3), mit dessen Hilfe es der Infrarotkamera, wie bereits im obigen Absatz erwähnt, auch in komplett dunklen Räumen möglich ist, die Objekte in Ihrem Sichtfeld zu erfassen.

Am rechten Ende der Sensorleiste befindet sich überdies noch die weiße Beleuchtung des Xbox-Logos. Diese leuchtet, sobald auf jegliche Kamerafunktionen zugegriffen wird und funktioniert nicht als Indikator für die Stromversorgung.

6.2. Time of Flight Technologie

6.2.1. Verwendung und Möglichkeiten

Zur Erfassung und zum 3D-Tracking der Objekte mithilfe der Sensorleiste verwendet Microsoft in der Xbox-Kinect v2 eine proprietäre Abwandlung der sogenannten *Time-of-Flight* [50] Technologie. Durch sie ist es möglich, die Position aller Objekte im Sichtfeld der Kamera beziehungsweise in der Reichweite des Infrarotemitters zentimetergenau zu erfassen. Die Präzision von Time-of-Flight ermöglicht es nicht nur, grobe Daten wie die Anzahl der Personen in einem Raum oder die Position der Extremitäten zu erfassen. Durch die Sensorleiste können auch feine Details wie Gesichtsausdrücke, unterschiedlichste Gesten und sogar Falten im Gewand der Person vor der Kamera erkannt und in der Software verarbeitet und ausgewertet werden.

Im Vergleich zur Bestimmung von Distanzen, beispielsweise mit Ultraschallsensoren, sind optische Time-of-Flight Messmethoden bei der Verwendung eines sehr ähnlichen Prinzips gleichzeitig wesentlich schneller sowie um einiges genauer, wobei der Sensor und der Emitter überdies sehr klein und leicht sein können.

6.2.2. Realisierung

Die Xbox-Kinect vereint auf der Vorderseite gleich mehrere Infrarot-Emitter in einem Bauelement. Mithilfe von Triangulation zwischen den Emitttern und der Infrarot-Kamera wird nicht nur die Distanz zu der Sensorleiste, sondern auch die genaue Position eines Punktes in Relation zu den Sensoren auf drei Achsen bestimmt. Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht das Prinzip der Triangulation zwischen Emitter und Kamera auf der Sensorleiste.



Abbildung 29: Funktionsweise Time of Flight Technologie mit kodierten IR-Lichtstrahlen [51]

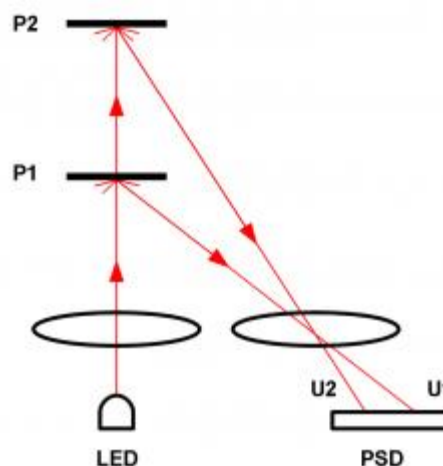


Abbildung 30: Ermitteln der Position eines Objekts mittels des Eintrittswinkels (U1) [52]

Wie in den obigen Abbildungen zu erkennen, senden die Infrarot-Emitter der Xbox-Kinect einen durch Pulsweitenmodulation kodierten Infrarot-Lichtstrahl aus. Gleichzeitig beginnt die Zeitmessung für die Laufzeit des jeweiligen Strahls. Trifft das Infrarot-Licht sein Ziel, wird es von diesem wieder in Richtung der Kamera reflektiert. Der Sensor der Infrarot-Kamera erkennt den reflektierten Strahl sowie die Richtung, aus der er auf den Sensor trifft. Anschließend wird die Kodierung ausgelesen und die Zeitmessung für den jeweiligen Strahl gestoppt. Über die Lichtgeschwindigkeit ist es nun möglich, die Entfernung des Zielobjektes zur Kamera genauestens zu bestimmen.

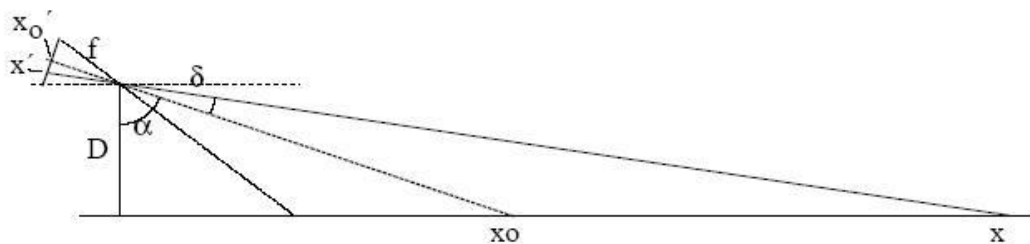


Abbildung 31: Zugehörige Skizze zu Formel 8 [53]

$$\tan \delta = \frac{x' - x'_0}{f} \rightarrow \tan \alpha = \frac{x_0}{D}$$

$$x = D \cdot \tan(\alpha + \delta) = D \cdot \frac{\tan \alpha + \tan \delta}{1 - \tan \alpha \cdot \tan \delta}$$

$$x = D \cdot \frac{\frac{x_0}{D} + \frac{x' - x'_0}{f}}{1 - \frac{x_0}{D} \cdot \frac{x' - x'_0}{f}}$$

Formel 8: Ermitteln der Entfernung eines Punktes zur Kamera mittels Triangulation [53]

Der große Vorteil von Time of Flight besteht darin, dass dieses Verfahren größtenteils unempfindlich gegenüber äußeren Einflüssen ist. Fremde Lichtquellen, dabei ist es nicht relevant ob dies Quellen von Infrarotlicht oder sichtbarem Licht sind, stören das System aufgrund der eingebauten Kodierung nicht. Solange das Zielobjekt das vom Emitter ausgesendete Infrarotlicht nicht verschluckt oder gänzlich in eine andere Richtung reflektiert, ist es mit diesem simplen Prinzip verlässlich möglich, die Entfernung der Objekte zur Kamera in einem Pixelraster aufzuzeichnen.

7. Treibersoftware

7.1. libfreenect2

Zum Auslesen der durch die Xbox Kinect [3] ermittelten Bilddaten sowie zur generellen Kommunikation mit dem Gerät wird die Treibersoftware *libfreenect2* verwendet. Diese Software kommuniziert über einen USB 3.0 – Port mit der Xbox Kinect Hardware und ist Teil des Open-Source Projektes *OpenKinect*. Das Ziel von *OpenKinect* ist es, eine vollständige Unterstützung aller Funktionen der Hardware zu bieten, welche betriebssystemübergreifend über eine Vielzahl von *Wrappern*, also Software-Schnittstellen für unterschiedlichste Programmiersprachen, verwendet werden können.

Die beiden Unterprojekte *libfreenect* und *libfreenect2* sind jeweils zur Verwendung mit Microsofts *Xbox Kinect for Xbox 360* beziehungsweise mit der neueren, zweiten Version *Xbox Kinect for Xbox One* vorgesehen. Aufgrund der enorm flexiblen Verwendungsmöglichkeiten von *libfreenect2* wurde diese Software an Stelle der proprietären, offiziellen, sowie überdies noch veralteten (Letztes Update der SDK: Oktober 2014 [54]) *Kinect for Windows SDK 2.0* von Microsoft für dieses Projekt verwendet.

Der Quellcode des libfreenect2-Treibers inklusive API-Dokumentation ist auf GitHub zu finden [55]. Der Digital Object Identifier lautet [doi:10.5281/zenodo.50641](https://doi.org/10.5281/zenodo.50641).

7.2. Verwendung in Agilis

Im Softwareteil von Agilis ist die Treibersoftware neben dem Auslesen der Daten von der Xbox Kinect außerdem für eine erste Verarbeitung der Daten vorgesehen. Um die weitere Nutzung der aufgenommenen Farb- und Positionsdaten effizienter zu gestalten, werden die übergebenen Daten in *Frames* verpackt. Jedem der mehr als zwei Millionen Pixel des aufgenommenen Farb-Bildes werden zusätzlich zu den ursprünglichen Rot-, Grün- und Blau-Werten überdies noch die entsprechend von der Xbox Kinect ermittelten Positionsdaten zugewiesen. Das Infrarot- sowie das Farbbild werden hiermit also zu einem einzigen Bild vereint.

8. Fingererkennung

8.1. OpenCV-Library

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) [4] ist eine Open-Source Library, deren Ziel es ist, eine gebräuchliche Bibliothek für *Computer Vision*, also maschinelles Sehen, zu schaffen. *OpenCV* beinhaltet mehr als 2500 optimierte Algorithmen zum Verarbeiten von Bild- und Videodaten am Computer und bildet heutzutage die Basis für zahlreiche Projekte.

Sowohl private Nutzer als auch Firmen nutzen diese Bibliothek für simple Effektanwendung auf Bilder bis über Gesicht- und Gestenerkennung oder sogar intelligentes Navigieren von Robotern. Aufgrund der Hardwareanforderungen wurde *OpenCV* in C++ entwickelt und ist für die Ausführung auf einem Computer wie beispielsweise einem Laptop vorgesehen. Von der Nutzung mit schwächeren Computern wie auch *Single Board Computern* wie dem Raspberry Pi wird daher abgeraten.

8.1.1. Vorverarbeitung und Filterung der Daten

Um das Finger-Tracking zu ermöglichen, müssen, für dieses Projekt die von libfreenect2 bereitgestellten Frames und insbesondere die darin enthaltenen Tiefeninformationen von OpenCV verarbeitet werden.

Um die Daten der Xbox Kinect [3] zu verarbeiten, ist es zunächst sinnvoll, die Datenmenge möglichst zu reduzieren und zudem die Möglichkeit von Störungen durch fremde Objekte zu verringern.

Hierzu wird zunächst ein rechteckiger Bereich festgelegt, in dem das Tracking stattfinden soll. Das Rechteck wird dem Nutzer auf dem Bildschirm des Computers angezeigt, um eine visuelle Rückmeldung zu bieten. Hierdurch fällt die richtige Positionierung der Hand vor der Kamera wesentlich leichter.

Schließlich löscht das Programm alle Pixel außerhalb des Tracking-Bereichs, sowie alle unrealistisch weit entfernten oder zu nahen Positionsdaten aus dem zu verarbeitenden Frame. Durch die eben genannten Methoden wird eine wesentlich geringere Datenmenge erreicht, wobei sich

gleichzeitig die Genauigkeit und die Geschwindigkeit des Trackings wesentlich erhöht. Die so vorverarbeiteten Frames werden schlussendlich an die nächste Methode weitergegeben.

8.1.2. Sklasky's Algorithmus

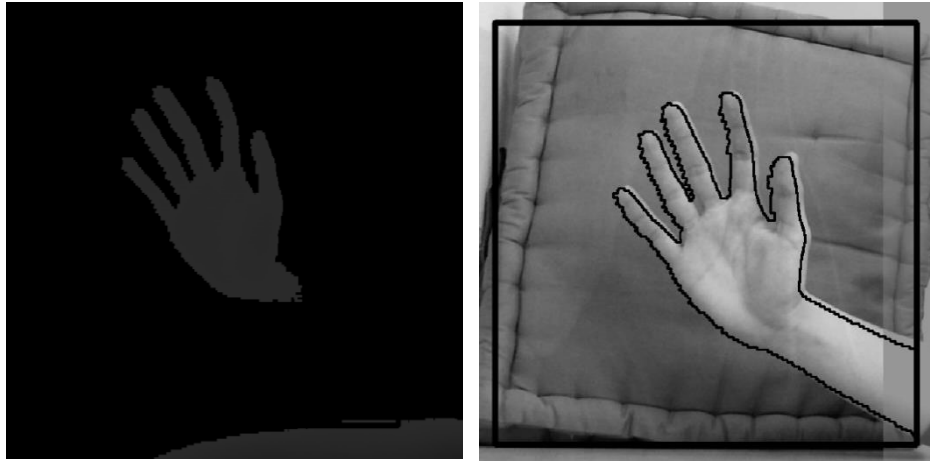


Abbildung 32: Bild einer Hand [E]
Links: Tiefeninformation, rechts: Bild der normalen Farbkamera

Um die Finger des Nutzers erfassen zu können, muss zunächst die Grundform der Hand durch OpenCV ermittelt werden. Um dies zu erreichen, wird durch den Aufruf der Methode convexHull() beziehungsweise findContours() der in OpenCV implementierte *Sklansky's Algorithm* genutzt [56].

Hierbei werden Pixel annähernd gleicher Farbe zu je einem Element zusammengefasst und dessen Kontur bestimmt. Nur die größte in dem Bild gefundene Kontur wird weiterverwendet. Die vorgefilterte Tiefeninformation eines jeden Pixels, von OpenCV als Helligkeit der einzelnen Pixel in einem schwarz-weiß Bild interpretiert, wird zum schnellen und zuverlässigen Finden der Konturen genutzt [57].

Nachdem die Konturen der Hand von OpenCV ermittelt wurden, werden sie mithilfe der durch libfreenect2 erhaltenen Frames auf das Farbbild übertragen und dem Nutzer auf dem Bildschirm angezeigt. Somit wird das erfolgreiche Tracking der Hand auf simple Art visualisiert. Ebenso werden die gefundenen Konturen der Hand nun an den nächsten Teil des Programms übergeben, um die einzelnen Finger und ihre Position zu bestimmen.

In der obigen Abbildung ist ein Beispiel des Tiefenbilds sowie das resultierende RGB-Kamera-Bild zu sehen. Zum besseren Kontrast des aufgenommenen Bildes zu den durch das Programm hinzugefügten Elementen wird das RGB-Bild in schwarz-weiß dargestellt. Zusätzlich wird zur

Vermeidung von Reflexionen und um das bestmögliche Ergebnis zu erzielen ein Hintergrund aus Stoff verwendet.

9. Nutzerinteraktion

9.1. Control Panel

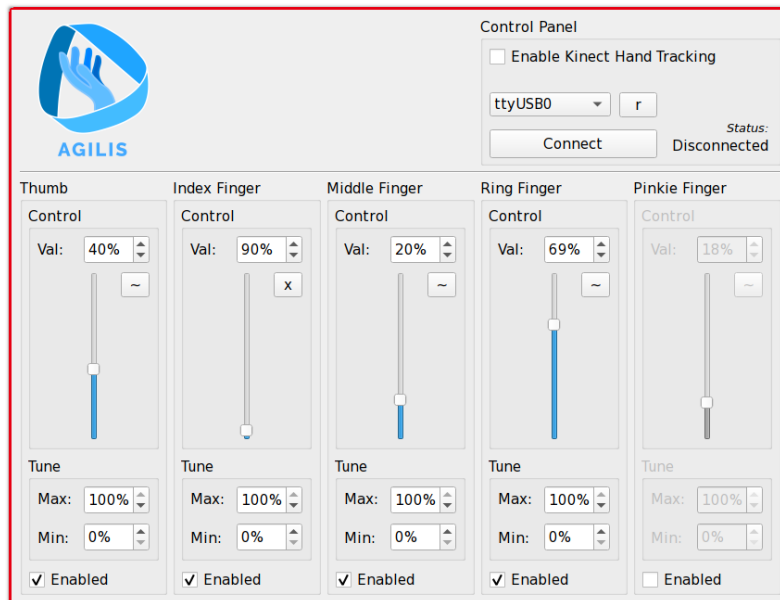


Abbildung 33: Agilis Control Panel [E]

Das Control Panel bildet die grundlegende Steuerungseinheit der Polymeraktoren. Mithilfe des Panels ist es möglich, per gewöhnlicher Tastatureingabe Kommandos via USART-Schnittstelle an den angeschlossenen Mikrocontroller zu senden und damit die Position der einzelnen Aktoren präzise zu kontrollieren. Hiermit wird eine Eingabe zum Testen und feinen Kontrollieren der Hardware ohne Vorhandensein einer Kamera möglich. Ebenso ist das Control Panel in der Lage, einfache Testprogramme wie beispielsweise eine sich stetig wiederholende Erhöhung beziehungsweise Verringerung der Spannungswerte individueller Aktoren ablaufen zu lassen (Sweep).

Als Grundfunktion bietet sich dem Nutzer des Control Panels, wie oben bereits beschrieben, die Möglichkeit, sowohl Maus als auch Tastatur zur Eingabe zu verwenden, um bis zu fünf unterschiedliche Aktoren zu steuern. Die einzugebenden Werte verstehen sich als Prozentangabe, welche beim jeweiligen PWM-Ausgang des Mikrocontrollers die Länge des Duty-Cycles bestimmt. Hierbei verhält sich das System aufgrund der physikalischen Eigenschaften der Polymeraktoren (siehe obige Hardware-Sektion) wie folgt: Ein Wert von 100% versteht sich in dieser Anwendung

als Anlegen der höchsten Spannung durch den angeschlossenen CCFL-Inverter, was eine Entspannung des künstlichen Muskels bewirkt.

Das sich dem Aktor widersetzende Trärgelenk dehnt sich also aus. Bei einem Wert von 0% liegt keine Spannung an den jeweiligen Aktor an. Somit zieht sich der *Muskel* wieder zusammen und das Trärgelenk winkelt sich stärker ab.

Da sich jeder Aktor geringfügig in seinem Verhalten unterscheidet, müssen der Höchst- beziehungsweise Mindestspannungswert des Aktors vom Nutzer kalibriert werden. Hierzu ist einfach nur ein höherer oder tieferer Wert im jeweils beschrifteten Nummernfeld zu wählen. Wichtig ist, dass sich der Schiebebalken entsprechend ebenso auf der Mindest- oder Höchststellung befindet. So ist es beispielsweise zur Kalibrierung des Höchstwertes notwendig, den Slider zunächst auf 100% zu ziehen. Erst danach kann mit der Einstellung der maximalen Länge des Duty Cycles begonnen werden.

In der obigen Abbildung ist das Control Panel zu sehen. In der Mitte finden sich die einzelnen Schiebebalken, an denen je nach Aktor ein anderer Anteil der Höchstspannung anliegt. Durch den Knopf mit dem Wellensymbol kann ein *Spannungs-sweep* Testprogramm auf dem jeweiligen Aktor gestartet werden. Die Statusanzeige oben rechts zeigt dem Nutzer an, ob zu dem zur Steuerung notwendigen Mikrocontroller eine Verbindung besteht, er vom Programm erkannt wurde und ob er einsatzbereit ist. Der Haken bei *Enabled* ermöglicht es, einen Aktor zu (ent-) sperren. Ist er gesperrt, wird er als *nicht angeschlossen* deklariert und an den Mikrocontroller werden bezüglich dieses *Muskels* keine Befehle mehr gesendet. Die Nummernfelder *Max* und *Min* befähigen den Nutzer wie oben beschrieben zur Kalibrierung des jeweiligen Aktors.

Mit dem oberen rechten Haken mit der Bezeichnung *Enable Kinect Hand Tracking* ist es dem Nutzer möglich, die Aktoren durch die *Xbox Kinect* ermittelten Fingerdaten zu steuern. Hierzu wird die Datei *fingers.dat* genutzt, die von der Trackingsoftware im Verzeichnis des Control Panels angelegt wird.

Die Anwendung wurde mithilfe des QT-Frameworks erstellt und in C++ programmiert. Die Kommunikation mit dem angeschlossenen Controller via USART verläuft in regelmäßigen Abständen beim Aufruf der *tick()*-Methode durch einen Timer. Je nachdem, ob der Nutzer die Bedienelemente des Control Panels oder die externe Steuerung durch die Handtracking-Daten aktiviert

hat, gibt das Panel die vom Nutzer eingestellten Werte aus dem Panel beziehungsweise die aus der *fingers.dat*-Datei ausgelesenen Daten im richtigen Format durch die write()-Methode an den Mikrocontroller weiter.

In openSerialPort() wird die USART-Verbindung eingestellt und initialisiert. Mit closeSerialPort() wird die Verbindung zum Controller geschlossen.

```
void MainWindow::tick() {
    if (externalInput) {
        QFile inputFile("fingers.dat");
        if (inputFile.open(QIODevice::ReadOnly)) {
            QTextStream in(&inputFile);
            while (!in.atEnd()) {
                QString line = in.readLine();
                int index = line.at(0).digitValue();
                QString depthVal = line.mid(line.length()-2,2);
                if (index < NUM_VALUES) {
                    val[index] = depthVal.toInt();
                    write("a"+QString::number(index)+QString::number(val[index])
                        .rightJustified('2','0')+"z");
                }
            }
            inputFile.close();
        }
    }
    for (int i=0; i < NUM_VALUES; i++){
        sweepValue(i);
        write("a"+QString::number(i)+QString::number(val[i]).rightJustified('2','0')+"z");
    }

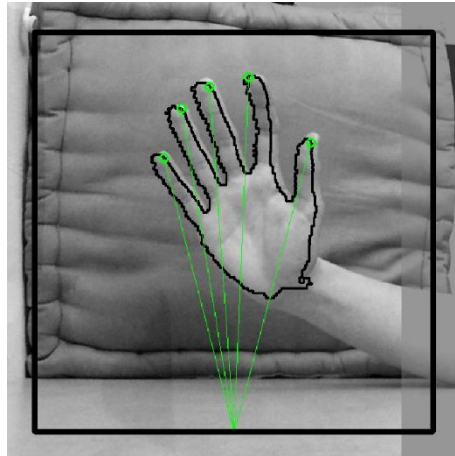
    closeSerialPort();
}

void MainWindow::openSerialPort()
{
    if (serial == nullptr) return;
    if (ui->cob_port->currentIndex() <= 0) return;

    QSerialPortInfo serialPort=portList[ui->cob_port->currentIndex()];
    serial->setPortName(serialPort.portName());
    serial->setBaudRate(9600);
    serial->setDataBits(QSerialPort::Data8);
    serial->setParity(QSerialPort::NoParity);
    serial->setStopBits(QSerialPort::TwoStop);
    serial->setFlowControl(QSerialPort::NoFlowControl);

    ui->lbl_status->setText(serial->open(QIODevice::ReadWrite)?"Connected":"Disconnected");
}
```

9.2. Finger-Tracking

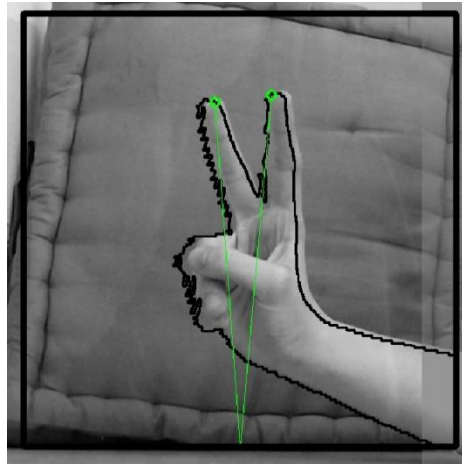


*Abbildung 34: Bild einer Hand [E]
Die durch den Algorithmus ermittelten Positionen der Fingerspitzen
sind hier grün markiert*

Der Algorithmus zum Tracken der einzelnen Finger des Nutzers macht sich die mithilfe von OpenCV [4] ermittelten Konturkoordinaten beziehungsweise die durch die Infrarotkamera der Xbox Kinect erlangten Entfernungsdaten zunutze.

Hierbei werden die *Extremwerte*, also die Hoch- und Tiefpunkte der Kontur, bestimmt. Maxima sind hierbei als Fingerspitzen zu verstehen, in der Visualisierung sind diese Koordinaten grün markiert. Die Tiefeninformation, zu verstehen als die Entfernung der Fingerspitze zur Kamera, wird dem von libfreenect bereitgestellten Frame anhand der ermittelten X- beziehungsweise Y-Koordinate entnommen.

9.2.1. Verhalten bei zu vielen / Zu wenigen Fingern



*Abbildung 35: Bild einer Hand mit nur zwei ausgestreckten Fingern [E]
Der Algorithmus unterscheidet nicht zwischen beispielsweise Daumen und Zeigefinger.
Der linke Finger ist hier 'Finger Nr. 0'*

Streckt der Nutzer nur einen oder mehr als fünf Finger aus, beginnt das Programm, je nach Anzahl der anzusteuernenden Aktoren, Kommandos über die USB-Schnittstelle an den angeschlossenen Mikrocontroller zu versenden. Da der Algorithmus nicht in der Lage ist, zu unterscheiden, exakt welche(r) Finger ausgestreckt sind / ist, ist zu beachten, dass bei beispielsweise zwei angeschlossenen Aktoren ein ausgestreckter Finger nur den ersten Aktor steuert. Hierbei ist es nicht von Belang, ob der ausgestreckte Finger ein Daumen, ein Zeigefinger oder ein kleiner Finger ist und welchen Finger der Aktor im Hardware-Aufbau darstellen soll.

Streckt der Nutzer mehr Finger aus als Aktoren anzusteuern sind, werden die übrigen Positionen einfach ignoriert.

9.2.2. Fingererkennung mithilfe der ermittelten Handkontur

Im nachfolgenden Codeausschnitt ist der wesentliche Teil der Methode track() zu erkennen, welcher die von OpenCV ermittelte und durch vorherigen Code bereits vorverarbeitete Handkontur zur Fingererkennung nutzt. Hierbei werden die einzelnen Punkte der Kontur an ihren jeweiligen Koordinaten untersucht. Befindet sich ein Punkt weit genug vom Vorherigen entfernt, wird evaluiert, ob er sich an einem Hoch- beziehungsweise Tiefpunkt innerhalb einer Kontur befindet. Hierzu werden die Funktionen isInRange() beziehungsweise cmpHeight() verwendet.

Ist der jeweilige Punkt ein Extremum und ist noch kein anderer Punkt dieses Extrems in der Liste an bereits erkannten Fingern enthalten, wird er zu dieser hinzugefügt. Hochpunkte werden hierbei als *Fingerspitzen* erkannt und als *valid* markiert. Tiefpunkte bezeichnen die Koordinaten der Fingerzwischenräume und haben in der weiteren Software derzeit keine Verwendung.

Wurde jeder Punkt auf der Kontur überprüft, werden die erkannten Fingerdaten abschließend zur weiteren Verwendung durch andere Programme in eine Textdatei geschrieben.

Eine wesentlich genauere, zeilenweise Dokumentation sowie die kompletten Software-Quelldateien finden sich auf dem beiliegenden USB-Stick.

```
void track(vector<Point> contour, Mat draw) {  
  
    //...  
  
    for (int i=0; i < contour.size(); i++) {  
        Point point = contour[i];  
        Finger prevFinger = fingers.back();  
  
        Finger f = Finger();  
  
        if (point.y > prevY-rangeY && point.y < prevY + rangeY) {  
            int size = contour.size();  
            int minX = (i-rangeX>=0) ? i-rangeX : size - (rangeX - i);  
            int maxX = (i+rangeX<size) ? i+rangeX : size - (rangeX + i);  
  
            if (cmpHeight(point, contour[minX]) < 0 && cmpHeight(point, contour[maxX]) < 0) {  
                if (!isInRange(point, prevFinger.getPoint())) {  
                    if (!high){  
                        high=true;  
                        f.setValid(true);  
                        f.setPoint(point.x, point.y);  
                        f.setDistance(calcDistance(anker, f.getPoint()));  
                        fingers.push_back(f);  
                    }  
                }  
            }  
            else if (cmpHeight(point, contour[minX]) > 0 && cmpHeight(point, contour[maxX]) > 0) {  
                if (!isInRange(point, prevFinger.getPoint())) {  
                    high = false;  
                    f.setValid(false);  
                    f.setPoint(point.x, point.y);  
                    f.setDistance(calcDistance(anker, f.getPoint()));  
                    fingers.push_back(f);  
                }  
            }  
        }  
        prevY = point.y;  
    }  
    writeToFile(fingers);  
}
```

10. Steuerung der Aktoren durch den ATmega328P

Die Ansteuerung des Arduino Nano [5] beziehungsweise über den integrierten ATmega328P Mikrocontroller [6] erfolgt über eine USB-Verbindung beziehungsweise die USART-Schnittstelle. Wird ein Wert im Format „a107z“ gesendet, so bilden *a* und *z* jeweils den *DELIMITER_START* und *DELIMITER_END*, also die Indikatoren für den Anfang oder das Ende eines Befehls. Die Interrupt-Routine *USART_RX_vect*, welche im nachfolgenden Codeblock abgebildet ist, wird beim Empfangen von Daten über die USART-Schnittstelle aufgerufen. In ihr befindet sich die Logik zum zeichenweisen Empfangen von Befehlen.

```
ISR(USART_RX_vect) {
    unsigned char data = UDR0;

    if (bracket_open) array_addChar(data);

    if (data == DELIMITER_START) {
        bracket_open = 1;
        array_init();
        array_addChar(data);
    }

    if (data == DELIMITER_END) {
        bracket_open = 0;
        if (rx_cnt == COMMAND_LEN) {
            int index=((int)rx[1])-48;
            int value=(10*(((int)rx[2])-48))+(((int)rx[3])-48);

            if (setPwmLimit(index,value)) {
                USART_sendString(2,"OK");
            } else {
                USART_sendString(7,"ERR_VAL");
            }
        } else {
            USART_sendString(7,"ERR_LEN");
        }
    }
}
```

Schließt man den Mikrocontroller über USB an einen PC an, sendet dieser eine „#init“-Nachricht an den Computer. Somit wird signalisiert, dass der Controller initialisiert und bereit zum Empfangen von Daten ist. Überdies antwortet der Controller auf jeden Befehl im Falle einer erfolgreichen Eingabe mit *OK*, ansonsten sendet er *ERR VAL* beziehungsweise *ERR LEN* bei einem falschen Wert oder einer ungültigen Befehlslänge.


```
#init  
OK  
ERR VAL  
ERR LEN
```

Abbildung 36: Rückmeldungen des Mikrocontrollers, ausgelesen über ein Serielles Terminal [E]

Setzt man nun den Wert eines PWM-Scalers, folgt der Befehl einem bestimmten Format. Die höchste Stelle der Dezimalzahl ist als der Index des PWM-Kanals zu verstehen, dessen Frequenz-Scaler verändert werden soll. Die rechten beiden Zahlen mit den Werten 0 bis 99 stellen den Anteil des Duty-Cycles an der Periodendauer prozentual dar. Somit wird bestimmt, welche Pulsbreite das Ausgangssignal des jeweiligen PWM-Channels haben soll. 0 bedeutet ausschließlich Pause, 99 entspricht einer maximalen Ausgangsspannung.

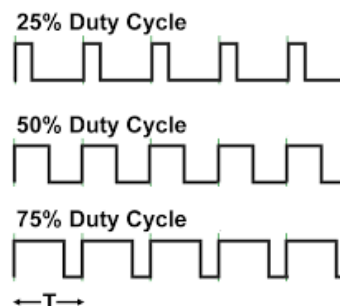


Abbildung 37: Darstellung unterschiedlich langer Duty Cycles in einem PWM-Signal [58]

Im nachfolgenden Codeblock ist die Interrupt-Routine für den Überlauf des Hardware-Timers zu sehen. Hier werden die PWM-Channel je nach ihrem *PWM-Limit*, welches sich aus dem PWM-Scaler berechnet, gesetzt und aktualisiert.

```
ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
    static uint8_t pwm_cnt = 0;
    uint8_t tmp = 0;

    OCR1A += (uint16_t)T_PWM;

    if (pwm_state[0] < pwm_limit[0]) tmp |= (1 << 0);
    if (pwm_state[1] < pwm_limit[1]) tmp |= (1 << 1);
    if (pwm_state[2] < pwm_limit[2]) tmp |= (1 << 2);
    if (pwm_state[3] < pwm_limit[3]) tmp |= (1 << 3);
    if (pwm_state[4] < pwm_limit[4]) tmp |= (1 << 4);

    PWM_PORT = tmp;
    if (pwm_cnt == (uint8_t)(PWM_STEPS-1)) {
        pwm_cnt = 0;
    } else {
        pwm_cnt++;
    }
}
```

11. Gehäuse- und Gelenkkonstruktion

Die Fingergelenke, auf denen die Polymeraktoren aufgespannt werden sollen sowie das Gehäuse, welches den in diesem Projekt genutzten Arduino Nano [5] und die Schaltungen zur Steuerung und Versorgung der Aktoren beinhaltet, wurden im 3D-CAD Programm der Firma Autodesk, *Fusion 360*, entworfen. Sowohl die Gelenke als auch das Gehäuse sind so konzipiert, dass das Drucken der Modelle mit einem 3D-Drucker möglich ist.

11.1. Gehäuse

Das Gehäuse, welches sämtliche Hardwarekomponenten zum Steuern und Versorgen der Polymeraktoren enthalten soll, sollte zum Zwecke einer ausreichenden Bemaßung zur Montage der Einzelteile erst innerhalb der letzten Wochen, also kurz vor Abschluss des Projekts entstehen. Somit entstünde ein Gehäuse, welches den finalen Maßen der Platine sowie denen aller übrigen notwendigen Komponenten entspräche.

Aufgrund der derzeitigen Lage in Österreich und der daraus resultierenden Ausgangssperre ist es dem Projektteam nicht mehr möglich, die Hardwarekomponenten für das Projekt entsprechend zu fertigen beziehungsweise die fertige Konstruktion für die Verwendung innerhalb eines Gehäuses aufzubauen und zu vermessen.

11.2. Design des Greifelements

Zur Veranschaulichung wurde für das Agilis-Projekt ein Greifelement-Prototyp entwickelt, welcher aus 3 einzelnen *Fingern* beziehungsweise *Fingergelenken* besteht. Die Grundplatte wurde hierbei zweckmäßig und simpel gehalten, da sie nur als Halterung für die Fingergelenke gedacht ist. Letztere kann man nach Anforderungen und Belieben anordnen, um unterschiedlichen Ansprüchen gerecht werden zu können.

Für sämtliche 3D-gedruckte Elemente in diesem Projekt wird schwarzes PLA Filament der Firma *DruckerRhino* genutzt. Als 3D-Drucker ist das Modell *Ender 3* des Herstellers *Creality* in Verwendung. Auf dem der Diplomarbeit angefügten USB-Stick finden sich außerdem die Quell sowie fertig berechnete *.step-Dateien* aller 3D-Modelle.

Ebenso ist insbesondere beim Drucken der bis zu 0.1mm dünnen Platten (siehe Abschnitt 7.2.1.) auf einen guten Zustand des Druckers zu achten, um verwendbare Prototypen drucken zu können. Wichtig ist neben der Höheneinstellung der Filamentdüse außerdem die richtige Temperatur, welche je nach Filament stark variieren kann, sowie die Oberfläche des Druckbetts. Verwendet man beispielsweise eine Glasplatte beziehungsweise einen Spiegel anstelle der mitgelieferten, oftmals rauen Unterlage, erleichtert dies nicht nur den Druckvorgang selbst, sondern ermöglicht auch das unbeschadete Ablösen der Kunststoffplatten im ganzen Stück.

Besitzt man keinen 3D-Drucker, bietet sich die Verwendung entsprechend zurechtgeschnittener Kunststoffplatten, welche beispielsweise Fertigsalatverpackungen entnommen werden können, an. Da nicht jeder Kunststoff die gleichen Eigenschaften besitzt, sind entsprechende Funktionstests jedenfalls notwendig.

11.2.1. Funktionsprinzip

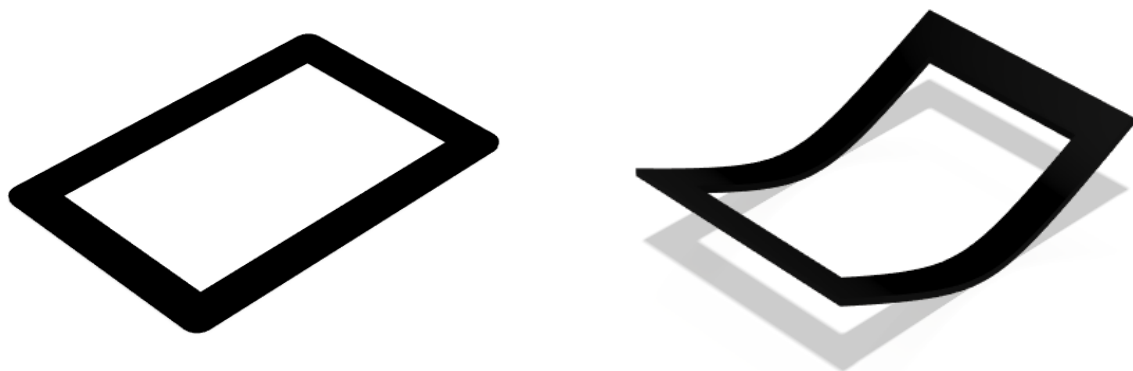


Abbildung 38: 3D-Rendering der Trägerrahmen-Konzepte in Fusion 360 [E]
Der aufzuklebende Polymeraktor wurde hier zur besseren Sichtbarkeit der Funktionalität weggelassen.

Der grundsätzliche Aufbau der Fingergelenke besteht aus einer rechteckigen, dünnen und deswegen elastischen Platte mit einem Ausschnitt in der Mitte. Auf diese Trägerplatte wird das mit einer leitfähigen Paste behandelte Klebeband aufgebracht, welches sich, sobald Spannung anliegt, physisch entspannt beziehungsweise im umgekehrten Fall anspannt. In der obigen Abbildung ist das 3D-Modell des Rahmens zu sehen. Das Rechte Modell stellt eine Trägerplatte dar, die sich unter der Krafteinwirkung des Polymeraktors verbiegt.

Aufgrund des Verhaltens des Polymers ist beim Anbringen des Klebebands an dem Rahmen unbedingt auf eine entsprechende Vorspannung zu achten!

11.2.2. Aufbau der Fingergelenke

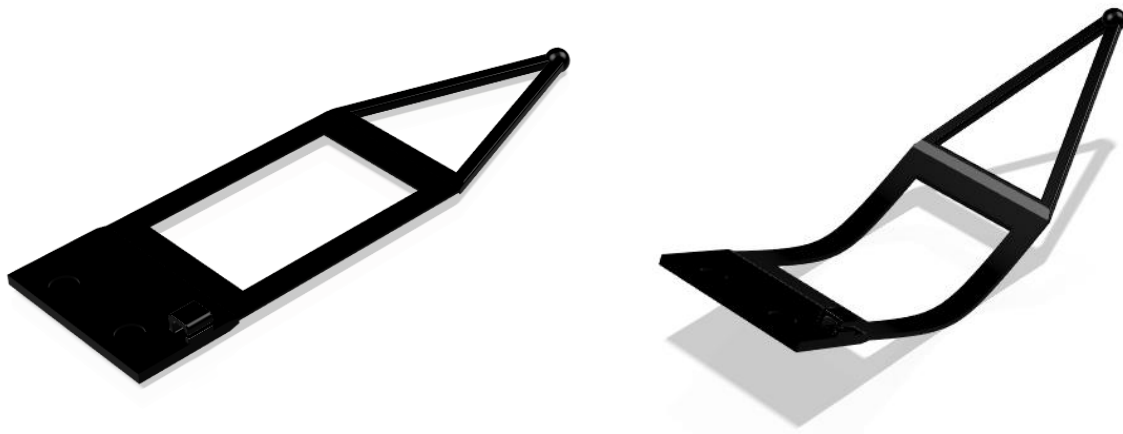


Abbildung 39: 3D-Rendering der Fingergelenk-Konzepte in Fusion 360 [E]

Die *Finger* des Greifelements stellen grundlegend eine Verlängerung des Grundrahmens dar. Wie in der obigen Abbildung ersichtlich, befindet sich auf einer Seite des späteren Aktors eine kurze Platte mit zwei Löchern für Schrauben, um eine feste Montage auf der Grundplatte zu ermöglichen. Auf der anderen Seite ist die *Fingerspitze* zu sehen. Das dreieckige Konstrukt besteht lediglich aus zwei dünnen Streben, welche von der Basis aus nach oben zusammenlaufen und in einer Kugel münden. Die Konstruktion der Fingerspitze weist bewusst wenig Masse auf, damit sie auch von schwächeren Aktoren leicht und präzise bewegt werden kann.

Der gesamte *Finger* wird aus Stabilitätsgründen in einem Stück gedruckt. Würde man an der Oberseite des Rahmens für das Klebeband mehrere Bauteile aneinanderkleben oder sie gar verschrauben, bestünde die Gefahr, dass die gesamte Konstruktion auseinanderfällt, reißt oder schlicht zu schwer ist.

Der im unteren Teil zu sehende Haken ist für das Einklemmen der Versorgungskabel für den Polymeraktor gedacht.

Aufgrund der derzeitigen Lage in Österreich und der daraus resultierenden Ausgangssperre ist es dem Projektteam nicht möglich, ein Exemplar eines Fingers beziehungsweise Fingergelenks anzufertigen oder zu testen.

11.2.3. Aufbau des Greifelements



Abbildung 40: 3D-Rendering des Konzeptes für ein Proof-of-Concept Greifelement [E]

Das Greifelement, welches als Beispiel der Funktionalität von Agilis dienen soll, ist eine Grundplatte auf der drei Finger montiert werden können. Diese sind so angeordnet, dass die zwei Finger auf einer Seite mithilfe des Arduino Nanos [5] beziehungsweise des Control Panels oder des Tracking-Programms als Zeige- und Mittelfinger angesteuert werden können. Der Gegenüberliegende, einzelne Finger stellt den Daumen dar. Mithilfe dieses Modells ist die Bewegung der Finger frei möglich. Die Polymeraktoren können kalibriert und getestet werden. Schließlich soll man aufgrund des vorhandenen Daumens leichte Objekte greifen können.

Auch hier ist es dem Projektteam aufgrund der derzeitigen Lage in Österreich und der daraus resultierenden Ausgangssperre nicht möglich, ein Exemplar eines vollständigen Greifelements anzufertigen oder zu testen.

12. Fazit und Ausblick

Der jetzige Projektstand besteht aus funktionstüchtigen Polymeraktoren, welche über die einwandfrei arbeitende Hochspannungsversorgung beziehungsweise den CCFL-Inverter angesteuert werden können. Auch wurde ein Platinendesign, sowie die Firmware zur PWM-Steuerung mehrerer CCFL-Inverter via Arduino Nano [5] entwickelt. Überdies wurde die Software zum Finger-Tracking mit der Xbox-Kinect [3] zusätzlich zum Control Panel fertig ausprogrammiert.

Aufgrund der begrenzten Projektzeit, besonders wegen der einschränkenden Maßnahmen durch COVID-19 (siehe Vorwort) ist es leider nicht gelungen, das Gehäuse beziehungsweise das Trägergerüst zur vollen Nutzung der Polymeraktoren vollständig fertigzustellen und zu testen. Ebenso fehlte es uns an Zeit, das erwartete Verhalten bei allen selbst hergestellten Polymeraktoren lückenlos zu erreichen. Insgesamt fehlte es also an einer Möglichkeit, das Gesamtprojekt abschließend zur Gänze zu testen.

Im weiteren Verlauf des Projektes besteht die Möglichkeit, sowohl die Präzision des Finger-Tracking-Algorithmus zu erhöhen als auch den Aufbau der Polymeraktoren zu perfektionieren. Außerdem stellt die simultane Ansteuerung mehrerer Aktoren das nächste zu erreichende Ziel dar.

13. Literaturverzeichnis

- [1] M. Stögbuchner und M. Windhager, „Statron,“ 5. April 2019. [Online]. Available: htlsalzburg.sharepoint.com/:f:/r/elektronikbiomed/Diplomarbeiten/2019/5AHBG?csf=1&e=Z9ZTRr. [Zugriff am 30. März 2020].
- [2] Doxygen, „Doxygen: Main Page,“ 27 März 2020. [Online]. Available: <http://www.doxygen.nl/>. [Zugriff am 2 April 2020].
- [3] Wikipedia, „Kinect - Wikipedia,“ 31 März 2020. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Kinect>. [Zugriff am 2 April 2020].
- [4] OpenCV, „OpenCV,“ 2020. [Online]. Available: <https://opencv.org/>. [Zugriff am 2 April 2020].
- [5] Arduino, „Arduino - ArduinoBoardNano,“ [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardNano>. [Zugriff am 2 April 2020].
- [6] Atmel Corporation, „ATmega328P Datasheet,“ Atmel Corporation, San Jose, 2015.
- [7] S. M. Mirvakili, „Niobium Nanowire Yarns and their Application as artificial Muscles“, Columbia: University of British Columbia, 2013, S.4-5.
- [8] P. Motzki, S. Hau, M. Schmidt und S. Seelecke, „Künstliche Muskeln und Nerven in Industrie 4.0 Konzepten,“ 2018. [Online]. Available: www.researchgate.net/publication/326804709_Kunstliche_Muskeln_und_Nerven_in_Industrie_40_Konzepten. [Zugriff am 30. April 2019].
- [9] M. Ashby, N. Fleck und J. Huber, „The selection of Mechanical Actuators Based on Performance Indices,“ 1997, S. 2195.. [Online]. Available: www-mech.eng.cam.ac.uk/profiles/fleck/publ.shtml. [Zugriff am 30. April 2019].
- [10] Y. Bar-Cohen, „Artificial Muscles using Electroactive Polymers (EAP): Capabilities, Challenges and Potential,“ 2005, S.1, S.3, S.10.. [Online]. Available: www.semanticscholar.org/paper/Artificial-muscles-using-electroactive-polymers-and-Bar-Cohen/66e57aa16b45a5368a1e91fd149dcbf38862d091. [Zugriff am 18. April 2019].
- [11] Amt für Veröffentlichungen der EU, „Ionic Polymer-Metal Composite As Sensor And Actuator: Application In Motion Control,“ 17. Juli 2012. [Online]. Available: cordis.europa.eu/article/id/88978-synthetic-muscles-for-robotics-and-biomedicine/de.
- [12] H. Janocha, „Unkonventionelle Aktoren – Eine Einführung“, O. Wissenschaftsverlag, Hrsg., 2013, S. 211f. [Online]. Available: books.google.at/books?id=YlLpBQAAQBAJ
- [13] J. Franke, M. Landgraf und S. Reitelshöfer, „Ein Werkstoff für künstliche Muskeln und weiche Sensoren,“ 2017. [Online]. Available: medizin-und-technik.industrie.de/technik/forschung/dielektrische-elastomere-ein-werkstoff-fuer-kuenstliche-muskeln/. [Zugriff am 18. April 2019].
- [14] E. Käser, „Kondensator,“ [Online]. Available: www.fachlexika.de/technik/mechatronik/kondensator.html. [Zugriff am 27. März 2020].
- [15] B. Hutschenreuther, et al, „Kondensator (Elektrotechnik),“ [Online]. Available: [de.wikipedia.org/wiki/Kondensator_\(Elektrotechnik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Kondensator_(Elektrotechnik)). [Zugriff am 17. März 2020].

- [16] B. Grotz, „Elektrische Felder,“ 2018. [Online]. Available: www.grundwissen.de/physik/elektrizitaet-und-magnetismus/elektrische-felder.html. [Zugriff am 17. März 2020].
- [17] Elektronik-Kompendium.de, „Elektrisches Feld (E-Feld),“ 2020. [Online]. Available: www.elektronik-kompendium.de/sites/grd/0205141.htm. [Zugriff am 17. März 2020].
- [18] Duden Learnattack GmbH, „Elektrisches Feld,“ 2010. [Online]. Available: www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/elektrisches-feld. [Zugriff am 17. März 2020].
- [19] S. Petry, „Einführung in die Theoretische Physik: Elektrostatik I,“ 18. Januar 2013. [Online]. Available: www.si-pe.de/theoretische-physik. [Zugriff am 24. März 2020].
- [20] T. Vardanyan, „Elektrisches Feld,“ 15. November 2016. [Online]. Available: commons.wikimedia.org/wiki/File:Elektrisches-Feld.jpg. [Zugriff am 27. März 2020].
- [21] D. Rudolph, „Elektrische Felder,“ 2017. [Online]. Available: www.frustfrei-lernen.de/elektrotechnik/elektrische-felder.html. [Zugriff am 17. März 2020].
- [22] Joachim Herz Stiftung, „Ladungen & Felder,“ 1. Juli 2013. [Online]. Available: archive.is/ZIENK. [Zugriff am 27. März 2020].
- [23] 3M, „VHB™ Hochleistungs-Verbindungssysteme 4905, 4910, 4915, 4918,“ 11/2004. [Online].
- [24] M.G. Chemicals, „Specialty Greases,“ S.7. [Online]. Available: www.mgchemicals.com/products/greases-and-lubricants/conductive-greases/premium-carbon-conductive-grease-8481. [Zugriff am 24. März 2020].
- [25] M.G. Chemicals, „8481 Technical Data Sheet,“ 2018. [Online]. Available: www.mgchemicals.com/products/greases-and-lubricants/conductive-greases/premium-carbon-conductive-grease-8481. [Zugriff am 17. März 2020].
- [26] J. Rehrmann, „Das InterNetzteil- und Konverter-Handbuch von Dipl.-Ing Jörg Rehrmann; Kapitel 10 und 13,“ [Online]. Available: www.joretronik.de/Web_NT_Buch. [Zugriff am 22. März 2020].
- [27] InfoTip Service GmbH, „Inverter,“ [Online]. Available: kompendium.infotip.de/inverter.html. [Zugriff am 22. März 2020].
- [28] Dan, „CCFL-Inverter,“ [Online]. Available: danyk.cz/ccfl_en.html. [Zugriff am 20. März 2020].
- [29] W. Dvorak, et al., „Resonanzwandler,“ [Online]. Available: de.wikipedia.org/wiki/Resonanzwandler. [Zugriff am 22. März 2020].
- [30] H. Schmidt-Walter, „Resonanzwandler,“ [Online]. Available: schmidt-walter-schaltnetzteile.de/snt/snt_deu/sntd_pdf.html. [Zugriff am 24. März 2020].
- [31] Rowland, et al., „Gegentaktflusswandler,“ [Online]. Available: de.wikipedia.org/wiki/Gegentaktflusswandler. [Zugriff am 24. März 2020].
- [32] C. J. Cowie, „Inverter ckt 01cjc,“ 14. März 2006. [Online]. Available: commons.wikimedia.org/wiki/File:Inverter_ckt_01cjc.png. [Zugriff am 27. März 2020].
- [33] O. Sedlacek, et al., „Royer Oscillator,“ [Online]. Available: en.wikipedia.org/wiki/Royer_oscillator. [Zugriff am 27. März 2020].
- [34] Neotesla, et al., „CCFL-Inverter,“ [Online]. Available: en.wikipedia.org/wiki/CCFL_inverter. [Zugriff am 22. März 2020].

- [35] Neotesla, „CCFL-Inverterschaltung3,“ 8. März 2017. [Online]. Available: commons.wikimedia.org/wiki/File:CCFL-Inverterschaltung3.gif. [Zugriff am 27. März 2020].
- [36] InfoTip Service GmbH, „Resonanzwandler-Netzteile,“ [Online]. Available: kompendium.infotip.de/resonanzwandler-netzteile.html. [Zugriff am 25. März 2020].
- [37] Saure, „Schwingkreis reihen,“ 23. April 2009. [Online]. Available: commons.wikimedia.org/wiki/File:Schwingkreis_reihen.svg. [Zugriff am 27. März 2020].
- [38] Autodesk Inc., „Eagle,“ [Online]. Available: www.autodesk.com/products/eagle/overview. [Zugriff am 1. April 2020].
- [39] UvM, et al., „Cockcroft-Walton-Beschleuniger,“ [Online]. Available: de.wikipedia.org/wiki/Cockcroft-Walton-Beschleuniger. [Zugriff am 26. März 2020].
- [40] GlobalSino, „Cockcroft–Walton Voltage-Multiplier Circuit Generator,“ [Online]. Available: www.globalsino.com/EM/page3257.html. [Zugriff am 26. März 2020].
- [41] T. Rapp, „Cockroft Walton Multiplier,“ [Online]. Available: www.rapp-instruments.de/diverse/multiplier/multiplier.htm. [Zugriff am 26. März 2020].
- [42] D. Mietke, „Gleichrichtung mit Spannungsvervielfachung,“ [Online]. Available: elektroniktutor.de/analogtechnik/vervielf.html. [Zugriff am 26. März 2020].
- [43] C. Hall, et al, „Voltage doubler,“ [Online]. Available: en.wikipedia.org/wiki/Voltage_doubler. [Zugriff am 26. März 2020].
- [44] W. Dvorak, „Villard Schaltung,“ 24. Juni 2010. [Online]. Available: commons.wikimedia.org/wiki/File:Villard_Schaltung.svg. [Zugriff am 27. März 2020].
- [45] W. Dvorak, „Greinacher Schaltung,“ 24. Juni 2010. [Online]. Available: commons.wikimedia.org/wiki/File:Greinacher_Schaltung.svg. [Zugriff am 27. März 2020].
- [46] D. Kloos, „Die ernsthafte Kaskade,“ [Online]. Available: www.serious-technology.de/Ernsthafte%20Kaskade.htm. [Zugriff am 26. März 2020].
- [47] U. Š. Seifert, et al, „Hochspannungskaskade,“ [Online]. Available: de.wikipedia.org/wiki/Hochspannungskaskade. [Zugriff am 26. März 2020].
- [48] Chetvorno, et al., „Cockroft-Walton generator,“ [Online]. Available: en.wikipedia.org/wiki/Cockcroft-Walton_generator. [Zugriff am 26. März 2020].
- [49] iFixit, „Xbox One Kinect Teardown,“ iFixit, 21 November 2013. [Online]. Available: <https://www.ifixit.com/Teardown/Xbox+One+Kinect+Teardown/19725>. [Zugriff am 30 März 2020].
- [50] Wikipedia, „Time of flight camera - Wikipedia,“ 13 March 2020. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Time_of_flight_camera. [Zugriff am 2 April 2020].
- [51] Stemmer Imaging, „3D Time of Flight-Kameras,“ [Online]. Available: <https://www.stemmer-imaging.com/de-at/grundlagen/kameras-3d-time-of-flight-kameras/>. [Zugriff am 30 März 2020].
- [52] Robotclab.eu, 27 Dezember 2018. [Online]. Available: http://home.robotclab.eu/de/examples/sensor/ir_distance. [Zugriff am 30 März 2020].
- [53] Wikipedia, „Elektrooptische Entfernungsmessung,“ 21 März 2020 . [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrooptische_Entfernungsmessung#Lasertriangulation. [Zugriff am 30 März 2020].

- [54] Microsoft, „Download Kinect for Windows SDK 2.0,“ Microsoft, 10 Oktober 2014. [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=44561>. [Zugriff am 30 März 2020].
- [55] libfreenect2, „GitHub - OpenKinect/libfreenect2,“ 1 März 2020. [Online]. Available: <https://github.com/OpenKinect/libfreenect2>. [Zugriff am 30 März 2020].
- [56] OpenCV, „Structural Analysis and Shape Descriptors,“ OpenCV, 31 Dezember 2019. [Online]. Available: https://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/structural_analysis_and_shape_descriptors.html?highlight=convexhull. [Zugriff am 30 März 2020].
- [57] K. R. Shrimali, „Convex Hull using OpenCV in Python and C++,“ 13 August 2018. [Online]. Available: <https://www.learnopencv.com/convex-hull-using-opencv-in-python-and-c/>. [Zugriff am 30 März 2020].
- [58] M. A. A. Mokhtar, A. Elmahalawy und H. M. Harb, „Developing the pulse width modulation tool (PWMT) for two timer mechanism technique in microcontrollers,“ Menoufia University, Al-Azhar University, Dezember 2013. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/271437313_Developing_the_pulse_width_modulation_tool_PWMT_for_two_timer_mechanism_technique_in_microcontrollers. [Zugriff am 30 März 2020].
- [59] Verge Staff, „Microsoft Xbox One: everything you need to know,“ The Verge, 21 Mai 2013. [Online]. Available: <https://www.theverge.com/2013/5/21/4352404/microsoft-xbox-one-everything-you-need-to-know>. [Zugriff am 30 März 2020].
- [60] libfreenect2, „libfreenect2 API Reference,“ 27 April 2016. [Online]. Available: https://openkinect.github.io/libfreenect2/classlibfreenect2_1_1Frame.html. [Zugriff am 30 März 2020].

[E] Eigenes Werk

14. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Blockschaltbild Agilis [E]	11
Abbildung 2: Blockschaltbild Software [E]	12
Abbildung 3: Aufbau eines Plattenkondensators [14]	16
Abbildung 4: Verschiebungspolarisation im Plattenkondensator [E]	18
Abbildung 5: Feldlinien zwischen zwei ungleichen Ladungen [20]	20
Abbildung 6: Homogenes elektrisches Feld [22]	21
Abbildung 7: PLA-Rahmen [E]	22
Abbildung 8: Fertig aufgebauter Polymeraktor-Prototyp [E]	24
Abbildung 9: Blockschaltbild Hochspannungsversorgung [E]	25
Abbildung 10: Prinzipschaltung nach Royer [32]	26
Abbildung 11: Moderne Resonanzwandlerschaltung [35]	27
Abbildung 12: CCFL-Inverter Prinzipschaltung [26]	28
Abbildung 13: Idealer LC-Serienschwingkreis [37]	29
Abbildung 14: Schaltplan Steuerplatine [E]	30
Abbildung 15: Layout Steuerplatine [E]	31
Abbildung 16: Spannungsverlauf CCFL-Inverter [E]	33
Abbildung 17: Stromverlauf CCFL-Inverter [E]	33
Abbildung 18: Villard Schaltung [44]	34
Abbildung 19: Greinacher Schaltung [45]	35
Abbildung 20: Cockroft-Walton-Generator Schaltung [46]	36
Abbildung 21: Cockroft-Walton-Generator Schaltung in LTSpice [E]	38
Abbildung 22: Simulation Cockroft-Walton-Generator mit $U_A \approx 6,4\text{kV}$ [E]	38
Abbildung 23: Schaltungsaufbau Cockroft-Walton-Generator mit vier Kaskadenstufen [E]	39
Abbildung 24: Spannungsverlauf Cockroft-Walton-Generator [E]	40
Abbildung 25: Spannungsvervielfachung Cockroft-Walton-Generator [E]	40
Abbildung 26: Stromverlauf Cockroft-Walton-Generator [E]	41
Abbildung 27: Gleichrichtung und Spannungsvervielfachung [E]	42
Abbildung 28: Xbox Kinect mit entferntem Gehäuse [49]	43
Abbildung 29: Funktionsweise Time of Flight Technologie mit kodierten IR-Lichtstrahlen [51] ..	45
Abbildung 30: Ermitteln der Position eines Objekts mittels des Eintrittswinkels (U_1) [52]	45
Abbildung 31: Zugehörige Skizze zu Formel 8 [53]	46
Abbildung 32: Bild einer Hand [E]	49
Abbildung 33: Agilis Control Panel [E]	50
Abbildung 34: Bild einer Hand [E]	53
Abbildung 35: Bild einer Hand mit nur zwei ausgestreckten Fingern [E]	54
Abbildung 36: Rückmeldungen d. Mikrocontrollers, ausgelesen über ein Serielles Terminal [E] ..	57
Abbildung 37: Darstellung unterschiedlich langer Duty Cycles in einem PWM-Signal [58]	57
Abbildung 38: 3D-Rendering der Trägerrahmen-Konzepte in Fusion 360 [E]	60
Abbildung 39: 3D-Rendering der Fingergelenk-Konzepte in Fusion 360 [E]	61
Abbildung 40: 3D-Rendering des Konzeptes für ein Proof-of-Concept Greifelement [E]	62

15. Formelverzeichnis

Formel 1: Elektrische Feldstärke	18
Formel 2: Kapazität	19
Formel 3: Elektrische Feldstärke (Kraft)	19
Formel 4: Einheitengleichung der elektrischen Feldstärke	20
Formel 5: Herleitung der Resonanzfrequenz im LC-Serienschwingkreis	29
Formel 6: Eingangsstrom des Cockroft-Walton-Generators	37
Formel 7: Ausgangsspannung des Cockroft-Walton-Generators	41
Formel 8: Ermitteln der Entfernung eines Punktes zur Kamera mittels Triangulation [53]	46

16. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Messwerte CCFL-Inverter	32
Tabelle 2: Messwerte Cockroft-Walton-Generator	39

17. Begleitprotokoll gemäß § 9 Abs. 2 PrO-BHS

	HTBLuVA Salzburg Höhere Lehranstalt für Elektronik und Technische Informatik	Reife- und Diplom- prüfung
---	---	---------------------------------------

Themenstellung:	Agilis – Entwicklung einer Steuerung von dielektrischen Elastomer-Aktoren mittels Image-Tracking
Kandidatin / Kandidat:	Simon Gruber Selma Hasanović
Jahrgang:	5AHEL – 2019/20
Betreuer:	Prof. Dipl.-Ing. Harald Salhofer

Monat	Beschreibung	Zeitaufwand
September	Diplomarbeitsantrag erstellen, Ausarbeitung der Projektplanung, Diplomarbeitsantrag einreichen, erstes Auseinandersetzen mit dem Grundprinzip der Polymeraktoren	30h
Oktober	Evaluierung einer entsprechenden Hard- und Softwarebasis für das Finger-Tracking, Meeting JKU-Linz, Kommunikation mit Sponsoren, Materialbeschaffung, Aufbau der ersten Elastomeraktoren-Prototypen	50h
November	Vollständiges Ausprogrammieren der Treiberschnittstelle für die Xbox Kinect, Erstellen und Design der Projektpräsentation, Projekt- und Teamfotos	52h
Dezember	Designen eines Projektlogos und Flyer/Plakat, 3D-Modellierung der ersten Trägerstrukturen, Umbau der bereits vorhandenen Hochspannungskaskade, Erstellen der Prototyp-Software der PWM-Steuerung des CCFL-Inverters per Arduino	55h
Januar	Halten der ersten Präsentation, diverse Vorbereitungen für den Tag der offenen Tür, Fertigstellung des Nutzer-Frontends und des Finger-Trackings, Weiterentwicklung der Elastomeraktoren, erste Messungen	54h
Februar	Diplomarbeit schreiben, Vorbereiten und Hochladen der Fotos/Grafiken und Texte für die HTL-Webpräsenz, Vorbereitung DA-Verteidigung	44h
März	Erstes Konzept der 3D-Modellierung des Greifelementes, softwareseitige Finalisierung, Durchführung finaler Messungen der Hardware, Diplomarbeit schreiben	55h
April	DA-Abgabe	20h

18. Besprechungsprotokoll

	HTBLuVA Salzburg Höhere Lehranstalt für Elektronik und Technische Informatik	Reife- und Diplom- prüfung
---	---	---------------------------------------

Themenstellung:	Agilis – Entwicklung einer Steuerung von dielektrischen Elastomer-Aktoren mittels Image-Tracking
Kandidatin / Kandidat:	Simon Gruber Selma Hasanović
Jahrgang:	5AHEL – 2019/20
Betreuer:	Prof. Dipl.-Ing. Harald Salhofer

Datum	Teilnehmer	Besprechungsthema	Zweck
18.09.2019	Dipl.-Ing. Harald Salhofer Simon Gruber Selma Hasanović	Projektziele wurden besprochen	Auftrag
18.10.2019	Dipl.-Ing. Harald Salhofer Simon Gruber Selma Hasanović	Meeting JKU-Linz Elastomeraktoren-Aufbau Flexible Elektroden	Information Auftrag
27.11.2019	Dipl.-Ing. Harald Salhofer Simon Gruber Selma Hasanović	1. Review: Blockschaltbild Elastomeraktoren / HV-Erzeugung Soft- & Firmware, Frameworks	Information Beschluss
04.12.2019	Dipl.-Ing. Harald Salhofer Simon Gruber Selma Hasanović	Verwendbare Frameworks Kinect Anbindung, Auswertung Firmware zur Ansteuerung der Elastomeraktoren	Information Auftrag
07.01.2019	Dipl.-Ing. Harald Salhofer Simon Gruber Selma Hasanović	1. Präsentation: Titelfolie, Team, Konzept Was soll gemacht werden? Wie kommen wir dort hin? Verbesserungsvorschläge	Information Beschluss
19.02.2020	Dipl.-Ing. Harald Salhofer Simon Gruber Selma Hasanović	Vorbereitung DA-Verteidigung und Abgabe Gestaltung der Präsentationen Erster Vorentwurf der DA	Auftrag
28.03.2020	Dipl.-Ing. Harald Salhofer Simon Gruber Selma Hasanović	Projektstand Erreichte Ziele Offene Punkte / Ausblick Abgabe	Projektabschluss

19. Gantt-Diagramm

