



Technische Hochschule  
Ingolstadt

# Entwicklung und Test einer robotergestützten Anlage zur Bestückung von Leiterplatten mit THT-Kondensatoren

Bachelorarbeit

von  
**Ramón Fürst**

**Technische Hochschule Ingolstadt**  
**Fakultät für Elektro- und Informationstechnik**  
Studiengang Robotik

Erstprüfer:	Prof. Dr. Christian Pfitzner
Zweitprüfer:	Prof. Dr.-Ing. Ali Kanso
Industrielle Betreuung:	Dipl.-Ing. Michael Prax
Ausgabedatum:	20.11.2023
Abgabedatum:	10.01.2024

In Zusammenarbeit mit: Baumüller Nürnberg GmbH  
Ostendstraße 80-90  
90482 Nürnberg



**BAUMÜLLER**

# Abstrakt

Als rohstoffarmes Hochlohnland kann sich Deutschland im internationalen Wettbewerb nur dann behaupten, wenn in Deutschland gefertigte Produkte mit möglichst geringen Kosten hergestellt werden können. Das bedeutet unter anderem, dass manuelle Fertigungsprozesse durch optimierte und automatisierte Verfahren zur Reduktion der Fertigungszeit ersetzt werden müssen. In der Leistungselektronik ist die Through-Hole-Technology das etablierte Bestückungsverfahren, jedoch erfolgt die Bestückung bisher selten automatisch, weil Bauteiltoleranzen dies oftmals nicht zulassen. Um die Fertigungskosten zu reduzieren, sollen häufig genutzte Bauteile, wie beispielsweise Aluminium-Elektrolytkondensatoren künftig mittels eines Roboters bestückt werden. Eine vorangegangene Bachelorarbeit hat hierfür die Umsetzbarkeit der Aufgabe in Betracht auf die Bauteile, den zur Verfügung stehenden Komponenten und der Umgebung bewiesen. An diese Machbarkeitsstudie soll nun mit dieser wissenschaftlichen Arbeit angeknüpft werden.

Dafür soll nach der Analyse der Gegebenheiten und der bereits gewonnenen Erkenntnisse ein Konzept für eine automatische, robotergestützte Anlage entwickelt werden. In dieser kommt ein Roboter zum Einsatz, der die elektronischen Bauteile in Leiterplatten mithilfe von Sensoren fügt. Außerdem wird der mechanische, der elektrische Aufbau sowie das entwickelte Ablaufprogramm erklärt. Anschließend folgen Versuchsaufbauten zur Validierung sowie die Optimierung der Anlage für den Betrieb in der Produktion. Zuletzt wird die Anlage bewertet und daraus folgende Verbesserungsvorschläge für die weitere Automatisierung formuliert.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und technische Erläuterung</b>	<b>1</b>
1.1	Aufgabenstellung . . . . .	1
1.2	Bestückungstechnologien . . . . .	1
1.2.1	Typen von Leiterplatten . . . . .	2
1.2.2	Durchsteckmontage - THT . . . . .	3
1.2.3	Oberflächenmontage - SMT . . . . .	3
1.3	Aufbau und Produktionsschritte der Leiterplatte 3.1613 . . . . .	4
1.3.1	Maschinelle axiale Bestückung . . . . .	6
1.3.2	Materialvorbereitung . . . . .	6
1.3.3	Handbestückungsvorgang . . . . .	7
1.3.4	Lötvorgang . . . . .	9
1.3.5	Qualitätskontrolle . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Rahmenbedingungen und Zielsetzung</b>	<b>10</b>
2.1	Machbarkeitsstudie des Bestückungsvorgangs . . . . .	10
2.1.1	Angefertigte Komponenten . . . . .	10
2.1.2	Durchgeführte Versuche . . . . .	10
2.1.3	Erkenntnisse der Studie . . . . .	11
2.1.4	Bewertung der Studie . . . . .	11
2.2	Konkretisierte Problemstellung und Ziele dieser Arbeit . . . . .	12
2.3	Vorstellung der vorgegebenen Komponenten . . . . .	12
2.3.1	Aufbau der Roboterzelle . . . . .	12
2.3.2	UR Roboter . . . . .	13
2.3.3	SensoPart Visor Kamera . . . . .	14
2.3.4	Robotiq Kraft-Momenten-Sensorik . . . . .	15
2.3.5	Robotiq 2-Finger-Greifer . . . . .	15
2.3.6	Artiminds Software RPS und LAR . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Konzeptphase</b>	<b>17</b>
3.1	Stand der Technik . . . . .	17
3.2	Ablauf der Mensch-Maschine-Interaktion . . . . .	18
3.3	Zufuhr der Kondensatoren . . . . .	19
3.4	Bestückung der Kondensatoren . . . . .	21
3.4.1	Platinenhalterung von Ernst [2] . . . . .	21
3.4.2	Wahl des Greifartkonzepts . . . . .	21
3.4.3	Individuelle Greiferfinger . . . . .	21
3.4.4	Strategien zur Griffkennung . . . . .	24
3.4.5	Strategien zur Bestückung . . . . .	24
3.4.6	Umgang mit Ausschuss . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Entwicklungsphase</b>	<b>25</b>
4.1	ArtiMinds Software Robot Programming Suite . . . . .	25
4.1.1	Einmessen von Material und Werkzeug . . . . .	26
4.1.2	Extraktion von Handling-Punkten aus CAD-Modellen . . . . .	27

4.2	Optische Erkennung . . . . .	27
4.2.1	Kamerakalibrierung . . . . .	27
4.2.2	Wahl der Detektoren zur Erkennung der Ausrichtung . . . . .	29
4.2.3	Wahl der Vorverarbeitungsfilter . . . . .	31
4.3	Entnahme der Kondensatoren . . . . .	32
4.4	Bestückung der Leiterplatte mit Kondensatoren . . . . .	32
4.5	Programmschleifen zur Mehrfachentnahme und -bestückung . . . . .	32
4.6	Schnittstellen zwischen Roboter und Bediener . . . . .	33
4.7	Betrachtung von Sonderfällen . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Testphase und Optimierung</b>	<b>37</b>
5.1	Beschreibung der Versuchsaufbauten . . . . .	37
5.1.1	Erkennung der Kondensatororientierung . . . . .	37
5.1.2	Iteration durch die Entnahmeliste . . . . .	37
5.1.3	Griff aus Tray und Bestückung in Leiterplatte . . . . .	37
5.1.4	Reset der Parameter bei Mehrfachbestückung . . . . .	37
5.1.5	Vollständiger Programmablauf . . . . .	38
5.2	Optimierung für Betrieb in der Produktion . . . . .	38
5.2.1	Zeitanpassungen . . . . .	38
5.2.2	Zuverlässigkeitsanpassungen . . . . .	43
5.2.3	Komfortanpassungen . . . . .	45
5.3	Validierung der Anlage . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Bewertung</b>	<b>48</b>
6.1	Prozessfähigkeit . . . . .	48
6.2	Erweiterbarkeit . . . . .	49
6.3	Bedienbarkeit . . . . .	50
6.4	Variantenwahl . . . . .	50
6.5	Zeitvorgabe . . . . .	50
6.6	Sicherheitskonzept . . . . .	50
6.7	Kostengünstig . . . . .	51
6.8	Vergleich zur konventionellen Fertigung . . . . .	51
6.9	Mögliche Verbesserungen . . . . .	52
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>54</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick</b>	<b>55</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>56</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>57</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>58</b>
	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>59</b>
	<b>Anhang</b>	<b>62</b>
8.1	Analoger Anhang . . . . .	62
8.2	Digitaler Anhang . . . . .	72
	<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>73</b>

# 1 Einleitung und technische Erläuterung

Deutschland verzeichnet einen bemerkenswerten Anstieg im Einsatz von Industrierobotern, eine Reaktion auf steigende Löhne und Fachkräftemangel. Mit einem Rekordwert von 259.636 installierten Robotern, einem Zuwachs von fünf Prozent im Vergleich zum Vorjahr, zeigt sich die deutsche Industrie zunehmend auf Automatisierungskurs.[1]

Diese Entwicklung hält auch Einzug bei der mittelständischen Firma Baumüller Nürnberg GmbH, um konkurrenzfähige Produkte anbieten zu können. Das Unternehmen ist spezialisiert auf die maßgeschneiderte Entwicklung und Herstellung von Antriebs- und Automatisierungssysteme. Baumüller bietet Lösungen für verschiedene Branchen, wie Maschinenbau, Verpackungsindustrie, Robotik und Energieerzeugung an. Ihr Produktsortiment umfasst Servo- und Asynchronmotoren, Servoumrichter, Steuerungen und komplette Automatisierungssysteme.

Im Folgenden wird zunächst die Aufgabenstellung allgemein beschrieben und die bei der Firma Baumüller eingesetzten Technologien und Bauteile vorgestellt.

## 1.1 Aufgabenstellung

Das Hauptziel dieser Arbeit besteht darin, auf Basis der Erkenntnisse der Machbarkeitsstudie von Ernst [2], welche im Kapitel 2.1.3 näher erläutert werden, eine robotergestützte Fertigungsanlage zu konzeptionieren und zu entwickeln, mit welcher THT-Kondensatoren automatisch bestückt werden können. Die Anlage ist anhand von unterschiedlichen Kriterien zu bewerten.

Die Zielsetzung dieser Arbeit wird in Kapitel 2.2 weiter konkretisiert. Da die Automatisierung von Bestückungsverfahren in der Leistungselektronik ein komplexes Vorhaben ist, welches die Kenntnis der zugrundeliegenden Technologien und Prozesse voraussetzt, werden diese als Nächstes für ein besseres Verständnis ausführlich beschrieben.

## 1.2 Bestückungstechnologien

Die Produkte der Baumüller Nürnberg GmbH sind ausschließlich im Elektronik-Sektor angesiedelt und deshalb sind bestückte Leiterplatten mit unterschiedlichen Bestückungstechnologien von hoher Bedeutung für die Firma. Bei den Bestückungstechnologien wird zwischen der Durchsteckmontage, auch bekannt als Through-Hole-Technology (THT) und der Oberflächenmontage, auch Surface-Mount-Technology (SMT) genannt, unterschieden. Eine Übersicht dieser Technologien ist in Abbildung 1.1 zu sehen. Sie werden verwendet, um sowohl passive Bauteile, wie beispielsweise Widerstände, Spulen und Kondensatoren, als auch aktive, wie zum Beispiel Transistoren oder Dioden, zu bestücken.[3]

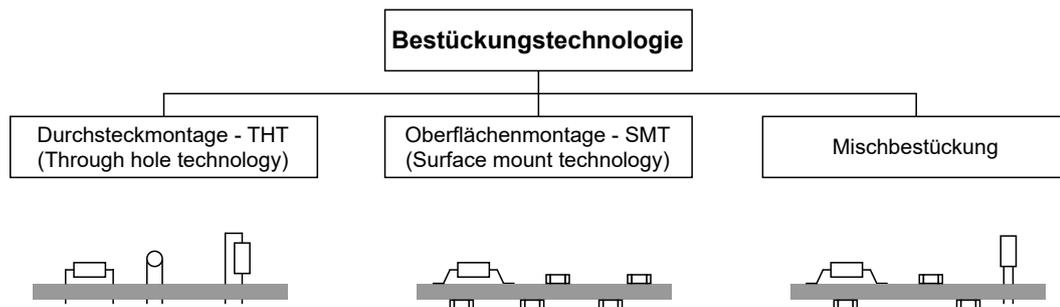


Abbildung 1.1: Übersicht der Bestückungstechnologien. Angelehnt an Quelle [3]

### 1.2.1 Typen von Leiterplatten

Unter einer Leiterplatte (LP) oder Platine ist das Bauteil zu verstehen, welches sowohl die mechanische als auch die elektrische Verbindung der einzelnen Bauelemente darstellt. Bei der klassischen Leiterplatte handelt es sich um flache Platten, welche aus einzelnen Leiterbahnen und dem Isolierstoff bestehen, wie in Abbildung 1.2a dargestellt. Die Leiterplatte wird zudem auch als Wärmeableiter verwendet. Aufgrund der guten elektrischen Eigenschaften wird meist Kupfer für die Leiterbahnen verwendet. Die Leiterbahnen haben je nach Anwendungsbereich unterschiedliche Breiten und Dicken.[3]

Der Isolierwerkstoff wird abhängig von den Anforderungen gewählt, da sich die Trägermaterialien hauptsächlich in mechanischen, elektrischen, thermischen und hochfrequenztechnischen Eigenschaften unterscheiden. Die Trägermaterialien werden in drei Typen unterteilt. Zu unterscheiden sind unverstärkte Materialien, Glasgewebeverstärkte und Sonderwerkstoffe. Ein beispielhaftes, unverstärktes Material ist Polyimid. Als Glasgewebeverstärkter Werkstoff kommt beispielsweise Standard-Epoxy zum Einsatz. Unter Sonderwerkstoffen sind Materialien wie Keramik oder Teflon zu verstehen.[4]

Die Leiterplatte kann aus mehreren Lagen bestehen. Dies ermöglicht mehr Vielfalt, da pro Schicht unterschiedliche Layouts der Leiterbahnen gestaltet werden können. Außerdem können für die mechanische Befestigung der Bauteile Durchgangslöcher vorgesehen werden. Die Verbindung zwischen Bauteil und Leiterplatte entsteht dann über Lötzinn oder Lötpaste, welches sowohl die elektrische Verbindung herstellt, als auch mechanisch fixiert. Neben den klassischen starren Leiterplatten sind inzwischen auch komplexere Formen etabliert, wie in Abbildung 1.2b und c gezeigt. Durch flexible Trägermaterialien lassen sich biegsame Leiterplatten realisieren. Um den Platzansprüchen der Endgeräte gerecht zu werden, können starre Basismaterialien auch dreidimensional geformt werden, wodurch eine bessere Platzausnutzung möglich ist.[5]

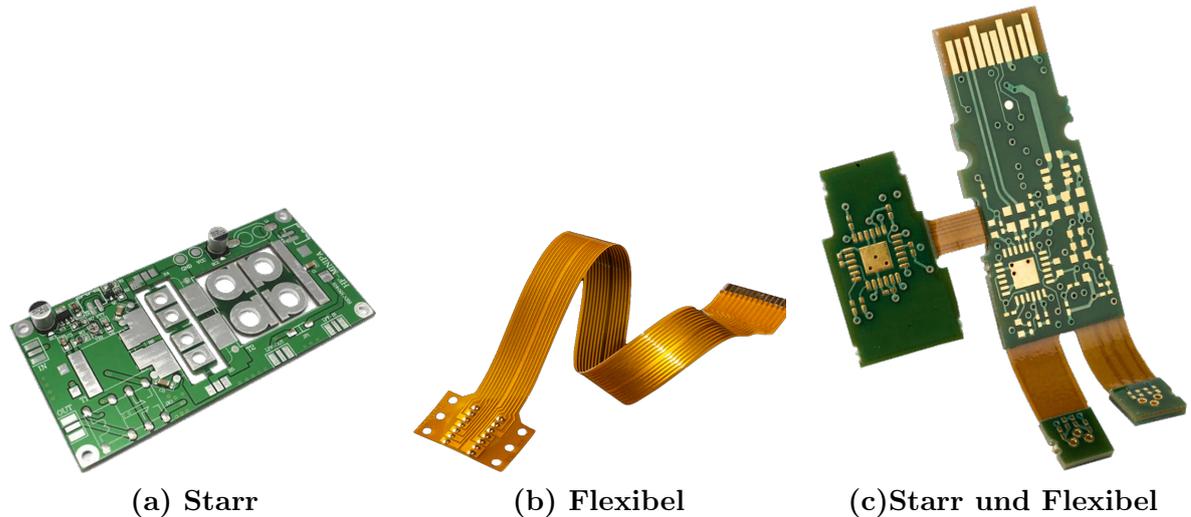


Abbildung 1.2: Beispielhafte Produktbilder für unterschiedliche Platinentypen.

Quellen: (a): [6] (b): [7] (c): [8]

### 1.2.2 Durchsteckmontage - THT

Die Durchsteckmontage ist ein traditioneller Ansatz in der Elektronikfertigung. In diesem Prozess werden elektronische Bauteile, die über Drahtanschlüsse verfügen, in zuvor gebohrte Löcher der Leiterplatte gesteckt. Die Bestückung kann dabei sowohl manuell, per Handbestückung als auch automatisiert über einen Bestückungsautomaten umgesetzt werden. Der Lötprozess wird anschließend über die Verfahren Handlöten, Selektivlöten oder Lötwellen realisiert. Wie der Name bereits erahnen lässt, werden beim Handlötverfahren die Bauteile mit einem LötKolben händisch verlötet. Beim Selektivlöten übernimmt diesen Schritt ein Lötautomat. Diesem werden Positionskordinaten übergeben, welcher die Positionen dann automatisch anfährt und die Bauteile verlötet. Dafür verfügt er über eine kegelförmige Düse, aus welcher das Lot zugeführt wird. Das Wellenlötverfahren wird in einem der folgenden Kapitel näher erläutert.[3]

Ein Nachteil der Durchsteckmethode stellt das Vorbereiten der Bauteile dar, da deren Drahtanschlüsse für die Leiterplattenbestückung zunächst auf Länge gekürzt und abgekantet werden müssen. Ein weiterer Nachteil ist, dass THT-Bauteile mehr Platz benötigen. Diese Technologie wird daher überwiegend für Bauteile verwendet, welche entweder hoher thermischer Belastung ausgesetzt sind oder eine höhere Festigkeit der Verbindung aufweisen müssen. Denn THT-Bauteile zeichnen sich durch ihre erhöhte statische und dynamische Belastbarkeit aus. Deshalb werden sie auch bevorzugt bei Umgebungsbedingungen, bei denen Vibrationen, Stöße und hohe Temperaturen auf die Bauteile wirken.[3, 4]

### 1.2.3 Oberflächenmontage - SMT

Die Oberflächenmontage, auch Surface-Mount-Technology (SMT) genannt, ist eine modernere Technologie in der Elektronikfertigung. Bei dieser Methode werden elektronische Bauteile mit flachen Anschlüssen, auch als Surface-mounted device (SMD) bekannt, direkt auf die Oberfläche der Leiterplatte platziert. Die Methoden unterscheiden sich in die Hand- und Maschinenbestückung, wobei die Maschinenbestückung weiter in simultane und sequentielle Verfahren differenziert werden kann.[3]

Die Handbestückung wird hauptsächlich nur noch für Prototypen oder Reparaturen eingesetzt. Nach der Bestückung werden die Bauelemente mit der Platine verlötet. Dieser Prozess beginnt mit der Vorbereitung der Leiterplatte, auf die kleine Depots an Lötpaste aufgetragen werden. Dabei wird die Paste mittels Sieb-/Schablonendruck oder über Dosieranlagen aufgebracht. Anschließend werden die SMD-Bauteile auf die vorbereitete Leiterplatte gelegt und in der Lötcreme

fixiert. Der abschließende Schritt ist der Reflow-Lötprozess, bei dem die gesamte Leiterplatte erhitzt wird. Dies bewirkt, dass die Lötpaste schmilzt und die Bauteile mit den Leiterbahnen auf der Leiterplatte verschmelzen. Nach dem Abkühlen sind die Bauteile sicher und dauerhaft verlötet.[3, 4]

Ein großer Vorteil der SMT ist die Platzersparnis, da sie keine Löcher in der Leiterplatte erfordert. Dadurch wird die Integration von kleineren und leichteren Bauteilen ermöglicht. Diese Präzisionsfertigungsmethode erlaubt zudem die Massenproduktion durch automatisierte Fertigungslinien. Dafür wurde ein Standard vereinbart, dass die Bauteile in Gurten in unterschiedlichen Größen bereitgestellt werden[4]. Durch die Bestückungsautomaten bringt diese Technologie hohe Investitions- und Rüstkosten mit sich. Es können keine Hochleistungswiderstände mit mehr als ein Watt verwendet werden, da dies zu thermischen Problemen durch die Verlustleistungen führt. Dabei ist auch der Wärmeausdehnungskoeffizient der unterschiedlichen Materialien zu beachten. Die Vorteile bestehen darin, dass SMD-Bauteile üblicherweise kleiner gefertigt werden, wodurch kleinere Leiterplattenformate möglich sind. Außerdem werden die Leiterplatten dadurch leichter. Da in der Platine keine Bohrungen mehr benötigt werden, kann Material eingespart werden. Aufgrund der hohen Präzision und den geringen Toleranzen der Bauteile lässt sich eine höhere Qualität realisieren. Wegen dieser Vorteile und da die Industrie für Neuentwicklungen bevorzugt SMD-Bauteile zur Verfügung stellt, ist das Verfahren inzwischen der vorherrschende Standard.[3, 4]

### 1.3 Aufbau und Produktionsschritte der Leiterplatte 3.1613

Bei der Leiterplatten 3.1613 der Baumüller Nürnberg GmbH, welche in Abbildung 1.3 zu sehen ist, handelt es sich um eine vierlagige, starre Platine, welche mit 48 Widerständen und je nach Variante mit bis zu 46 Elektrolytkondensatoren sowie bis zu zwei Folienkondensatoren bestückt wird. Sie findet nach Produktionsabschluss Anwendung in einem Servoumrichter mit Zwischenkreis. Der Servoumrichter wird für die Steuerung und Regelung von Drehstrommaschinen verwendet, da die E-Maschinen ein variables 3-Phasen-Netz benötigen. Der Servoumrichter beinhaltet einen Frequenzumrichter, mit welchem die Amplitude und die Frequenzen der Spannung eingestellt werden können.[9]

Ein Frequenzumrichter mit Zwischenkreis besteht aus einem eingangsseitigen Gleichrichter, dem Spannungszwischenkreis und ausgangseitigen Schaltern, wodurch er zwei unabhängige 3-Phasen-Netze verbindet. Bei der Leiterplatte 3.1613 handelt es sich um die Zwischenkreisplatine, welche als Energiespeicher dient.[10]

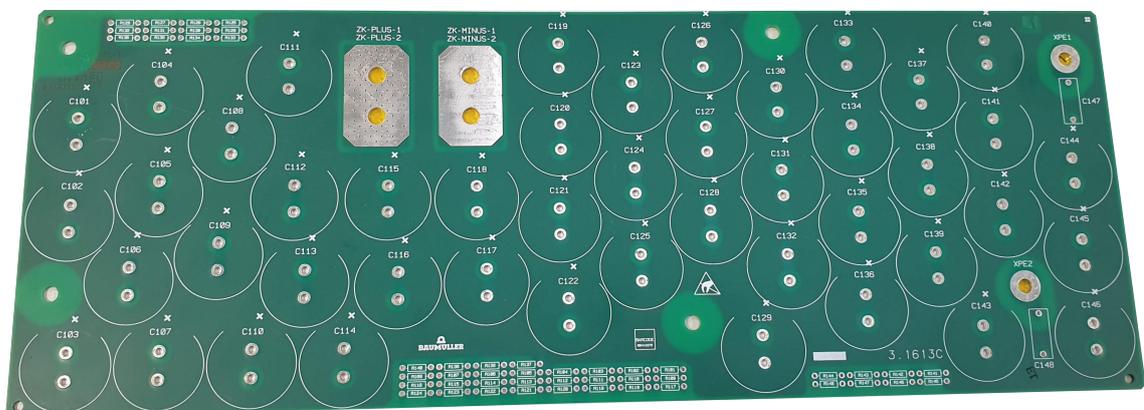


Abbildung 1.3: Rohleiterplatte 3.1613

Die Energie wird hierbei in Kondensatoren gespeichert, weshalb es sich um einen Spannungszwischenkreis handelt[11]. Die Kondensatoren bestehen grundlegend aus zwei leitfähigen Platten, welche durch eine Isolierschicht, dem Dielektrikum, voneinander getrennt sind[12]. Bei dem verwendeten Elektrolytkondensator (Elko), welcher in Abbildung 1.4 gezeigt wird, bestehen die leitfähigen Platten aus einer flüssigen Kathode und einer festen Anode. Für die Speicherung der Ladung wird die Wirkung des elektrischen Feldes zwischen den Flächen verwendet. Über die Verschaltung von mehreren Elkos können hohe Kapazitäten erzielt werden, wodurch die Netz- von der Lastseite entkoppelt werden kann.[10]

Auf der Abbildung ist auf der Oberseite auch eine Sollbruchstelle zu erkennen. Diese dient als Ventil für eine kontrollierte Explosion, sollte die Wärmeentwicklung im Inneren des Kondensators zu hoch werden, beispielsweise aufgrund eines Kurzschlusses.



Abbildung 1.4: Rubycon Elektrolytkondensator

Der Einsatz dieser Kondensatoren bewirkt die Glättung der Zwischenkreisspannungen im Frequenzumrichter. Außerdem kann Energie gespeichert und abgegeben werden, was den Vorteil hat, dass schnelle Beschleunigungen und Verzögerungen der E-Maschine über den Zwischenkreis kompensiert werden können. Dies führt zu einer besseren Energieeffizienz, was sich insbesondere in den reduzierten Energiekosten bemerkbar macht. Die 48 Widerstände dienen dabei zur Lastverteilung über alle Kondensatoren, da Toleranzen im Innenwiderstand zu unterschiedlichen Strömen führen. Diese Widerstände sind aufgrund der Leistung, welche benötigt wird, als THT-Bauteile ausgeführt.[13]

Da die Baumüller Nürnberg GmbH Servoumrichter für diverse Baugrößen von Motoren anbietet, muss die Platine in ihrer Kapazität dimensionierbar sein. Daher kann der Zwischenkreis entsprechend kleiner ausgelegt werden, wodurch die Platine nicht mehr vollständig bestückt wird. Bei dem im Bild 1.5 gezeigten Umrichter handelt es sich um die Zwischenkreisvariante AA00470115. Bei dieser Version werden lediglich 26 Kondensatoren bestückt. Insgesamt gibt es neun Varianten mit den Bestückungsanzahlen von 22, 26, 36 und 46 Kondensatoren, welche sich in ihrer maximalen Stromabgabe unterscheiden. Dabei ist auch die Position der Kondensatoren zu beachten, da sich diese nach der Verschaltung auf der Platine richtet. Des Weiteren variiert, ob zwei Folienkondensatoren bestückt werden, welche zur Entstörung dienen. Ausführliche Informationen zu den Varianten und deren Unterschiede sind im Anhang zu finden.



Abbildung 1.5: Fertigungsmomentaufnahme Servoumrichter Baugröße 6

Um ein tieferes Verständnis für die konventionelle Fertigung aufzubauen, wurde zu Beginn der Bachelorarbeit die Fertigung der Leiterplatte 3.1613 im Detail analysiert, da für diese die automatisierte Bestückung realisiert werden soll. Es folgt die Erklärung der einzelnen Fertigungsschritte.

### 1.3.1 Maschinelle axiale Bestückung

Bei Auftragseingang in der Fertigung werden zunächst die 48 Widerstände automatisiert bestückt. Hierfür wird jeweils eine Rohplatine in den Axialbestücker eingelegt und über Spannpratzen fixiert. Die Maschine besitzt ein Magazin, in welchem bis zu 100 unterschiedliche Bauteile in Gurten gelagert werden können. Der Maschine muss im nächsten Schritt händisch der Lagerort der Widerstände mitgeteilt werden. Diese werden bei Beginn der Bestückung selbstständig zum Bestückungskopf gefördert. Danach schneidet die Maschine die Anschlüsse der Widerstände auf Länge, biegt diese um und bestückt sie in die Platine. Um nun die Widerstände gegen Herausfallen zu sichern, werden deren Enden an der Unterseite der Platine umgebogen.

### 1.3.2 Materialvorbereitung

Nach Abschluss dieser Bestückung wird im Lager das restliche Material vorbereitet. Hierfür werden die zuvor maschinell bestückten Platinen sowie die Kondensatoren in abgezahlter Menge entsprechend dem Auftrag von einem Mitarbeiter der Logistik kommissioniert. Dafür werden sie aus der Herstellerverpackung, welche in Abbildung 1.6 gezeigt wird, entnommen. Anschließend wird das Material in Kleinladungsträger (KLT) zwischengelagert und an den Bestückungsplatz übergeben.



Abbildung 1.6: Anlieferungszustand der Kondensatoren im Tray

### 1.3.3 Handbestückungsvorgang

Im nächsten Schritt werden die Platinen mit dem im Auftrag stehenden Muster und der entsprechenden Anzahl an Kondensatoren bestückt. Dafür wird der Auftrag, welcher dem Material beiliegt, mit dem am Handbestückungsarbeitsplatz befindlichem Computer gescannt. Dadurch ist dem Mitarbeiter ersichtlich, welches Bestückungsmuster sowie welche Anzahl an Kondensatoren für diesen Auftrag benötigt wird. Die Nachfrage bei erfahrenen Mitarbeitern hat ergeben, dass die Zwischenkreiskondensatoren händisch meist erst mit einem Anschluss eingesteckt und anschließend der zweite Anschluss eingefädelt wird, da das die Bestückung durch das enge Platzangebot vereinfacht und Zeit spart.

Bei der Bestückung ist auf die Polung der Kondensatoren zu achten. Die Markierung im Schrumpfschlauch des Kondensators, der Minuspol, muss um 180 Grad verdreht zur Markierung auf der Platine, dem kleinem Kreuz beziehungsweise der Öffnung im Kreis, sein. Abschließend werden je nach Auftrag noch zwei kleine Folienkondensatoren bestückt.

Nach der vollendeten Bestückung wird jeweils eine Platine in einen Lötrahmen befestigt. Dieser ist universell einsetzbar, dank der einfach, an das Leiterplattenformat anpassbaren Befestigung, siehe Abbildung 1.7. Dieser Lötrahmen wird nach Fixierung der Platinen auf das Förderband gelegt, welcher die Platinen zur Lötanlage befördert.

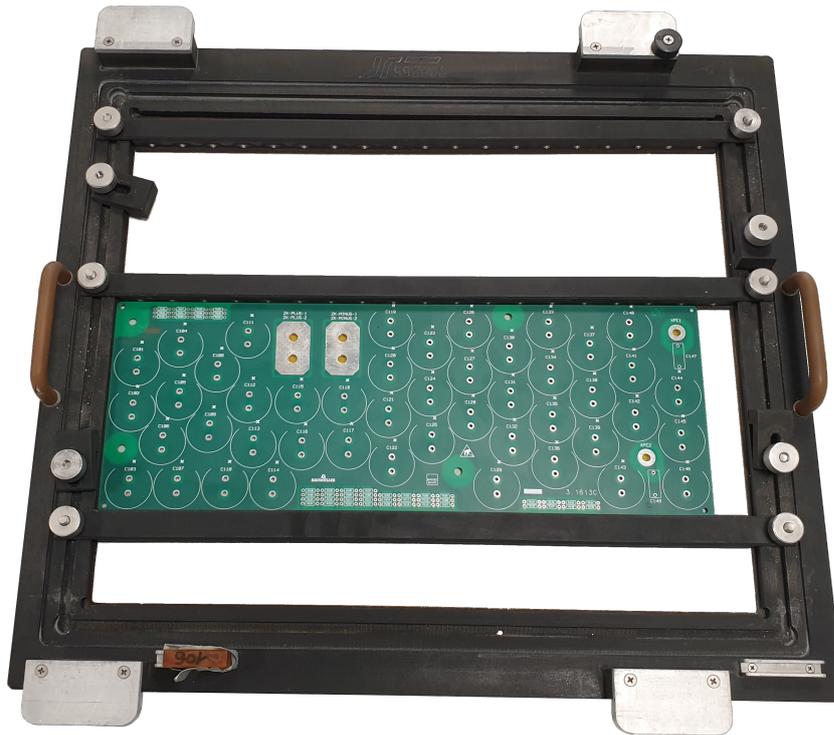


Abbildung 1.7: Lötrahmen zur Fertigung der LP 3.1613

Der Arbeitsplan, wie in Abbildung 1.8 dargestellt, sieht für eine mit 46 Kondensatoren bestückte Platine eine Rüstzeit ( $tr$ ) von zehn Minuten vor. Die Rüstzeit umfasst das Einstellen des Lötrahmens auf die Platine. Die Ausführungszeit ( $te$ ) ist mit 4,9 Minuten angesetzt und beinhaltet die Bestückung der Elkos, die Aufspannung der Platinen im Lötrahmen sowie das Legen auf das Förderband.

```

BK.: 01, GB.: 01, Werk.: 07, WK Electronic, Nürnberg, .....
Arbeitsplan.: 00470113, ..... 33.1613.06.C.00, ZK-ELKO, BM4X6X, .....
Kommission...: ..... 0, Typ.: N, Alt.: 0, Verw.: F, Änd.: .....
Sicht: S2, .....

A=Arbeitsplatz B=Betriebsmittel C=Steuerdaten E=AV-Stamm H=Hinzufüg. 2
L=Löschen S=Stückliste T=Texte U=Unterlage V=verwend. St.-APL Z=Zeitdaten
A AFO Al A APLZ F4 AFO-Kurztext Nachfolger Zeitbasis MEh Segm.vh.
_ 0010 _0 A 2100, HD.BE.BLEIFER 0020, 1,000, STK, TBZC, ..
tr: 10,000, te: 4,900, trB 0,000, teB 0,000, Zeiteh. MIN
HANDBESTÜCKUNG KOMPLETT, Lohngruppe...: ..
Lohnart.....: ..
Gruppenstärke: 1
Lieferant: .., Lohnschein: 0, Bedienstellen: 0
_ 0020 _0 A 2200, SIKO, THT, *LST, 1,000, STK, TB, C, ..
tr: 0,001, te: 2,000, trB 0,000, teB 0,000, Zeiteh. MIN
SIKO + NACHLÖTEN, Lohngruppe...: ..
PRÜFCODIERUNG, STEMPELN, Lohnart.....: ..
Gruppenstärke: 1
Lieferant: .., Lohnschein: 0, Bedienstellen: 1

```

Abbildung 1.8: Arbeitsplan der Handbestückung für LP 3.1613 mit 46 Elkos

### **1.3.4 Lötvorgang**

Die Förderanlage transportiert die Platine anschließend zu einer Wellenlötanlage, in welcher die Kondensatoren sowohl mechanisch als auch elektrisch mit der Platine verbunden werden. Die Anlage besteht aus einem Bereich, in dem die Platine vorgeheizt wird und einem weiteren Abschnitt, in dem die Platine verlötet wird. Hierbei handelt es sich um ein Lotbad, in welchem das Lot eine Temperatur zwischen 240 °C und 260 °C hat. Dieses Lot wird anschließend mittels Düsen zu einer Welle geformt, woher das Verfahren auch seinen Namen trägt. Nach dem Vorheizen fährt die Platine über diese Lötwellen, wodurch die Anschlüsse mit Lot benetzt werden und die Kapillarwirkung dafür sorgt, dass das Lot in die Löcher aufsteigt. Nach dem Lötvorgang folgt ein kontrollierter Abkühlprozess zur Aushärtung des Lötzinns.[3, 14]

### **1.3.5 Qualitätskontrolle**

Im nächsten Schritt fährt die Förderanlage die verlötete Platine zurück zur Einlegeposition. Hier entnimmt der Mitarbeiter den Lötrahmen und begutachtet die Lötstellen der Bauteile. Sollte diese visuelle Prüfung fehlerhafte Lötstellen (zu wenig oder zu viel Lötzinn) aufzeigen, wird diese Platine an den Vorarbeiter weitergereicht. Ansonsten werden alle Platinen an einem gesonderten Platz einer detaillierten Sichtkontrolle unterzogen. Dabei wird auf die Qualität der Lötstellen und die Richtigkeit der Polung der Bauteile geachtet. Eine elektrische Funktionsprüfung der Platine erfolgt aufgrund der hohen Qualität erst im verbauten Zustand.

## 2 Rahmenbedingungen und Zielsetzung

Mit dem Vorwissen aus Kapitel 1 zu den Fertigungstechnologien und den Fertigungsschritten der Leiterplatte 3.1613 wird hierauf die Machbarkeitsstudie konkret beschrieben und die Aufgabenstellung weiter detailliert. Dabei werden auch die Rahmenbedingungen und die zur Verfügung stehende Komponenten zur Lösung der Aufgabe vorgestellt.

### 2.1 Machbarkeitsstudie des Bestückungsvorgangs

In der vorangegangenen Bachelorarbeit beschäftigte sich Ernst [2] mit der Erstellung einer Machbarkeitsstudie für den Prozess der Bestückung von THT-Kondensatoren mit einem Roboter. Letztlich wurde ein Paarvergleich für zwei verschiedene Greiferkonzepte (Robotiq 2F-85 versus Robotiq Epick) durchgeführt und die Toleranzkette in Bezug auf eine Bestückung betrachtet. Es wurden Hilfsmittel für den Prozess der Platzierung angefertigt und ein Roboterprogramm geschrieben, mit welchem vereinfachte Bestückungsversuche durchgeführt wurden.

#### 2.1.1 Angefertigte Komponenten

Ernst [2] fertigte im Rahmen seiner Arbeit drei Bauteile an. Darunter zählte zum einen eine Positionierhilfe, aus welcher der Roboter die Kondensatoren abholte. Die Positionierhilfe hatte den Vorteil, dass der eingesteckte Kondensator immer gleich orientiert war. Nach der Entnahme aus der Positionierhilfe wurde der nächste Kondensator manuell nachgefüllt. Hierbei handelte es sich um eine provisorische Lösung für die Zufuhr der Kondensatoren, welche später durch einen automatischen Prozess ersetzt werden soll. Des Weiteren wurde ein Werkstückträger für die Leiterplatte 3.1613 angefertigt, welche den schnellen Wechsel der Leiterplatte ermöglicht. Dabei handelt es sich um einen Aluminium-Rahmen, welcher an drei Ecken über Stifte verfügt, mit welchen ein leichtes Aufstecken der Platine gewährleistet wird. Diese Vorrichtung bietet zudem den Vorteil, dass die Platine mit geringen Toleranzen immer die gleiche Position in allen Freiheitsgraden hat, also sowohl translatorisch als auch rotatorisch. Vorteilhaft daran ist auch, dass die Platine nur in einer möglichen Position und Ausrichtung gesteckt werden kann, was später eine mögliche Fehlbefüllung der Platine durch den Bediener verhindert. Nach Bestückungsversuchen mit dem mechanischen Greifer von Robotiq ergab sich schnell, dass die mitgelieferten Finger für diese Aufgabe nicht geeignet waren. Deshalb fertigte Ernst [2] eigene Greiferfinger aus Aluminium, die sich durch geringen Platzbedarf auszeichneten. Diese waren notwendig, da der Platz zu benachbarten Kondensatoren stark eingeschränkt ist.

#### 2.1.2 Durchgeführte Versuche

Für die Durchführung der Bestückungsversuche programmierte er über die grafische Benutzeroberfläche Polyscope ein Programm für den Bestückungsablauf. Hierbei wurden die Position zum Abholen sowie für das Bestücken der Kondensatoren händisch eingelernt. Dieses Programm betrachtete außerdem verschiedene Sonderfälle, wie beispielsweise den Fall, wenn kein Kondensator an der Abholposition vorhanden war. Auch eine fehlerhafte Bestückung wurde über eine zu hohe Kraftaufnahme erkannt. Die Versuche wurden in vereinfachter Umgebung durchgeführt, wie in Abbildung 2.1 erkennbar. Dafür wurden die Komponenten sowie der Roboter auf einer Holzplatte befestigt. Nach Abschluss der Versuche wurden die drei getesteten Greifer verglichen. Dabei handelte es sich um einen mechanischen, zwei Backengreifer (Robotiq 2F-85) und zwei Vakuumbreifer

(Robotiq AirPick und Robotiq EPick), wobei der Vakuumbreifer Robotiq AirPick ungeeignet für die Anwendung war und daher schnell aus der weiteren Betrachtung ausschied. Mit den restlichen beiden wurden dann jeweils Bestückungsversuche auf der Platine 3.1613 durchgeführt. Anhand dieser Ergebnisse wurde dann eine Nutzwertanalyse für beide Greiferkonzepte erstellt.

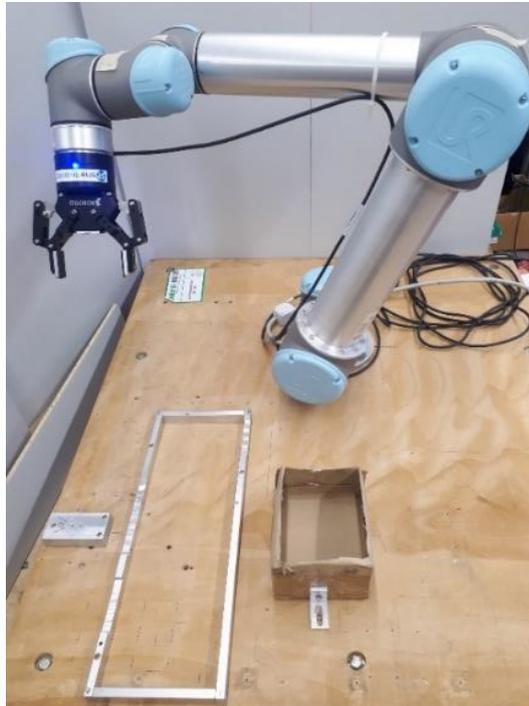


Abbildung 2.1: Aufbau der Anlage zum Stand der Machbarkeitsstudie. Quelle: [2]

### 2.1.3 Erkenntnisse der Studie

Das Resultat der Nutzwertanalyse war, dass beide Greifer für die Aufgabe geeignet sind. Die Empfehlung ging jedoch zum Vakuumbreifer, da dieser keinen Kontakt zu benachbarten Kondensatoren hatte und daher die Gefahr, diese umzustößen, eliminierte. Der Testumfang war aufgrund der Abläufe der Versuche eher gering, weshalb keine Prüfung der Prozessfähigkeit erreicht wurde.

Als nächsten Schritt sieht Ernst [2] die Umsetzung der automatisierten Zuführung sowie Positionierung der Kondensatoren. Dafür formuliert er Ansätze, wie beispielsweise einen Mechanismus, der eine gleichbleibende Orientierung bei der Abholung gewährleistet oder alternativ die Lösung über Kamerasysteme zur Erkennung der Lage und des Zustands. Um die Platine mit Kondensatoren bestücken zu können, ohne Kondensatoren manuell einlegen zu müssen, wird außerdem ein Speicherkonzept für die Elkos benötigt.

### 2.1.4 Bewertung der Studie

Der im Laufe der Studie angefertigte Werkstückträger für die Platine entspricht den zukünftigen Ansprüchen, weshalb dieser weiterverwendet werden kann. Der Empfehlung des Vakuumbreifers kann nicht nachgekommen werden, da dieser die Anlage durch den Bedarf von Unterdruck komplexer macht. Außerdem geht ein solcher Vakuumbreifer mit einem konstanten, hohen Lärmpegel einher, was mit einer Produktionsanlage, in welcher Arbeitsplätze in unmittelbarer Nähe existieren, nicht vereinbar ist. Des Weiteren wurde dieses Greiferkonzept durch empirische Ermittlung als ungeeignet eingeschätzt, weil es zum Ablösen während der Bewegung kommen kann. Der Universal Robot UR5 ist geeignet, wenn dessen Programmierung Positionstoleranzen kompensiert und Sonderfälle betrachtet.

## 2.2 Konkretisierte Problemstellung und Ziele dieser Arbeit

Für die Machbarkeitsstudie wurden diverse Vereinfachungen getroffen, wie beispielsweise, dass keine Ausrichtung der Elkos erkannt werden musste. Außerdem gibt es bisher keine Lösung für die automatische Zufuhr der Kondensatoren. Auch das händische Anlernen von Positionen ist für die Umsetzung der Anlage keine Option.

Das Hauptziel besteht also darin, eine Anlage umzusetzen, mit welcher THT-Kondensatoren automatisch bestückt werden können. Zum Einsatz soll dabei ein für kollaborative Anwendungen konzipierter Roboter kommen, der die Elektrolytkondensatoren lagerichtig in eine Platine bestückt. Des Weiteren musste bei der Lösung der Aufgabe die bereits vorhandenen Komponenten berücksichtigt werden, obwohl jene nicht optimal auf die Applikation abgestimmt waren. Weiter bestehen folgende Anforderungen an den Aufbau:

- **Prozessfähigkeit:** Es gilt zu prüfen, ob ein Aufbau entwickelt werden kann, der mit den Herstellertoleranzen umgehen kann, sodass ein zuverlässiger Betrieb gewährleistet wird. Dafür soll die Bauteilausrichtung sowie die Erkennung der Polung mittels einer Kamera verifiziert und korrigiert werden.
- **Erweiterbarkeit:** Eine hardwareunabhängige Programmierung der Anlage ist zu realisieren, um zukünftig Skalierungen und Adaptionen zu ermöglichen.
- **Bedienbarkeit:** Um die Anlage produktiv im Arbeitsumfeld einsetzen zu können, soll ein Konzept verwirklicht werden, welches den Ansprüchen der Produktion gerecht wird.
- **Variantenwahl:** Die Bestückung der unterschiedlichen Varianten der Platinen soll durch wenige Änderungsschritte möglich sein.
- **Zeitvorgabe:** Aus Erkenntnissen von früheren Automatisierungsprojekten mit einem Roboter innerhalb der Firma ging hervor, dass die Taktzeit durch die Umsetzung mit einem Roboter im Vergleich zum Menschen um ein Vielfaches steigen kann. Als groben Richtwert wurde daher eine Zeit von zehn Minuten für die Bestückung einer Platine mit 46 Kondensatoren angesetzt.
- **Sicherheitskonzept:** Die Anlage soll Anforderungen an die Arbeitssicherheit einhalten und somit einen sicheren Betrieb ermöglichen.
- **Kostengünstig:** Es ist wünschenswert, die Umsetzung der Anlage kostengünstig zu realisieren, um somit eine frühe Amortisierung zu erzielen.

Abschließend soll ein Vergleich der Mensch-Roboter-Bestückung gegen die konventionelle erstellt werden.

## 2.3 Vorstellung der vorgegebenen Komponenten

Aus Erkenntnissen der Machbarkeitsstudie von Ernst [2] wurden seitens Baumüller neben den bereits bestehenden Komponenten (Roboter und Greifer) noch weitere Komponenten (Kamera, Kraft-Momenten-Sensorik, Roboterzelle und ein Softwarepaket) zur Realisierung der Anlage beschafft und für diese Bachelorarbeit zur Verfügung gestellt.

### 2.3.1 Aufbau der Roboterzelle

Bezüglich der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter fiel die Entscheidung auf eine Roboterzelle, um Risiken für den Bediener zu minimieren. Dadurch ergibt sich auch der Vorteil eines kleineren Zertifizierungsumfangs. Zudem ermöglicht sie höhere Geschwindigkeiten des Roboterarmes.

Abbildung 2.2 zeigt ein Rendering der Roboterzelle, welche für den UR5 konstruiert wurde. Die Konstruktion besteht aus Itemprofilen, was die Abstimmung auf den Arbeitsbereich des Roboters vereinfacht. Die Außenmaße betragen 152 cm in der Breite, 108 cm in der Tiefe und 210 cm in der Höhe. Für das Einlegen und die Entnahme von Bauteilen sind an der Vorderseite zwei Türen vorgesehen. Die Zelle ist allseitig im Arbeitsbereich des Roboters mit Acrylglas verschlossen. Die Grundplatte, auf welcher die Basis des Roboters verschraubt ist, befindet sich auf einer Höhe von 80 cm, was eine angenehme Arbeitsposition, beim Entnehmen und Befüllen der Anlage ergibt. Für die Halterung des Teach Pendant (TP) befindet sich an der rechten Seite eine Aufnahme. Zudem ist an der Decke eine Beleuchtung sowie Sicherheitstechnik montiert, um zu erkennen, ob die Türen geöffnet oder geschlossen sind.



Abbildung 2.2: Konstruierte Roboterzelle für die Bestückung

### 2.3.2 UR Roboter

In der Anlage kommt ein Universal Robot UR5 mit einer CB3.1 Steuerung zum Einsatz. Diese Reihe von UR wird seit 2015 von einem in 2005 von drei Ingenieuren in Dänemark gegründeten Unternehmen, vertrieben. Sie haben sich das Ziel gesetzt, Roboter zu entwickeln, die sicher mit Menschen zusammenarbeiten können, um die Automatisierung in verschiedenen Branchen zu erleichtern. Universal Robots ist ein führender Hersteller von kollaborativen Robotern, auch als Cobots bekannt.[15]

Beim UR5 CB3.1 handelt es sich um einen inzwischen überholten Roboter mit dem Produktionsjahr 2017, der noch keine interne Kraft-Momenten-Sensorik besitzt[16]. Er hat ein Eigengewicht von 18,4 kg und eine Traglast von 5 kg. Durch seine sechs Drehgelenke erzielt er eine Reichweite im Radius von 850 mm. Für den Anschluss von externen Komponenten verfügt der UR über digitale sowie analoge Ein- und Ausgänge. Er verfügt auch über einen Ethernetport, um mit Komponenten über Profinet oder Ethernet kommunizieren zu können. Für die Programmierung besitzt der Roboter ein Teach Pendant mit der grafischen Benutzeroberfläche Polyscope. Der Roboter, dessen Steuerung und das Teach Pendant ist in Abbildung 2.3 zu sehen.[17, 18]

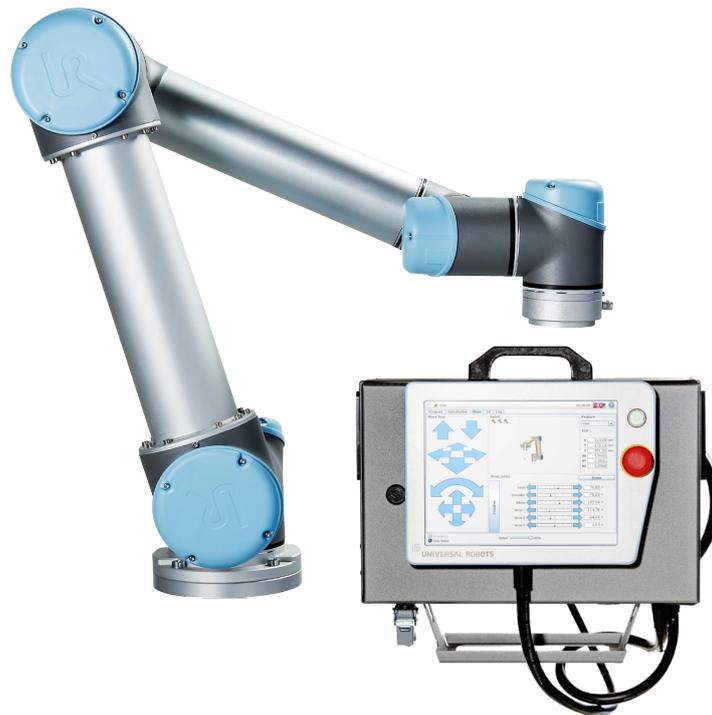


Abbildung 2.3: Universal Robot UR5 mit Controlbox und Teach Pendant. Quellen: [18, 19]

### 2.3.3 SensoPart Visor Kamera

Für die Erkennung der Ausrichtung der Kondensatoren wurde eine 2D Kamera von SensoPart beschafft. Dabei handelt es sich um einen industriellen Vision-Sensor, welcher sich für Objekterkennung, Anwesenheits- und Vollständigkeitsprüfung sowie Mess- und Positionieraufgaben eignet. Die Kamera hat eine Auflösung von 1440 auf 1080 Pixel und verfügt über eine integrierte Beleuchtung[20]. Der Aufbau dieser wird in Abbildung 2.4 dargestellt. Zusätzlich ist an der Kamera ein Polarisationsfilter mit 100 Prozent Abdeckung montiert. Dieser bietet den Vorteil, dass störende Reflexionen in der Aufnahme reduziert werden können[21]. Die Kamera wird anschließend über Ethernet mit der Robotersteuerung verbunden, wodurch die Kommunikation hergestellt wird. Über die Konfigurationssoftware lassen sich verschiedene Jobs und Detektoren anlegen, mit welchen anschließend unterschiedliche Objekte erkannt werden können.



Abbildung 2.4: SensoPart Visor V20. Quelle: [22]

### 2.3.4 Robotiq Kraft-Momenten-Sensorik

Neben der Kamera wurde außerdem ein Kraft-Momenten-Sensor beschafft, welcher an den Flansch des Roboters montiert wird. Wie in Abbildung 2.5 zu sehen, können an diesen Sensor dann weitere Werkzeuge, über den angebrachten Flansch, montiert werden. Gefertigt wird er von der Firma Robotiq und hat ein Eigengewicht von 440 g. Die messbare Kraft in alle drei Achsen liegt bei  $\pm 300$  N. Momente kann der Sensor bis  $\pm 30$  Nm messen. Er ist außerdem überlastfähig sowohl in der Kraft als auch im Moment um 500 %. Der Sensor wird mit einem RS485 Umformer verkabelt. Dieser wiederum wird per USB an den Controller angeschlossen. Durch die Installation der entsprechenden URcap, welche die Schnittstelle zwischen Sensor und Robotersteuerung darstellt, lässt sich der Sensor vom Teach Pendant aus ansteuern. Er ermöglicht einen Freedrive-Modus mit Gravitationskompensation, welcher bisher erst ab der UR e-Serie verfügbar war. Der Sensor ist in dieser Anwendung erforderlich, um die Bauteile kraftgesteuert platzieren zu können.[23]



Abbildung 2.5: Kraft-Momenten-Sensor der Firma Robotiq. Angefertigtes Rendering nach CAD-Datei verfügbar bei [24]

### 2.3.5 Robotiq 2-Finger-Greifer

Der Robotiq Greifer wird aus der Machbarkeitsstudie übernommen. Dabei handelt es sich, wie in Abbildung 2.6 sichtbar, um einen zwei Finger Greifer mit radialer Schließbewegung. Das bedeutet, dass sich der TCP, welcher sich zwischen den Backen befindet, während des Schließens in z-Richtung bewegt. Er besitzt einen maximalen Öffnungsweg von 85 mm, ein Eigengewicht von 925 g und eine Greifkraft von bis zu 235 N. Auch der Greifer wird wie der Kraft-Momenten-Sensor an einen RS485 Umformer angeschlossen, welcher anschließend per USB mit der Steuerung verbunden wird. Über die Installation der URcap für den Greifer lassen sich am Teach Pendant Öffnungsgrad, Schließkraft und -geschwindigkeit einstellen.[25]



Abbildung 2.6: 2-Finger-Greifer der Firma Robotiq. Angelehnt an Quelle [26]

### 2.3.6 Artiminds Software RPS und LAR

Speziell für diese Anwendung wurde die Software Robot Programming Suite (RPS) der ArtiMinds Robotics GmbH beschafft. Sie dient der Programmierung des UR-Roboters. Die Software zielt darauf ab, die Programmierung und Steuerung von Robotern zu erleichtern, durch eine benutzerfreundliche, visuelle Schnittstelle. Dieser Ansatz erleichtert die Programmierung und macht sie zugänglicher für Personen ohne umfangreiche Programmierkenntnisse. Allerdings lassen sich damit auch komplexere Roboterablaufprogramme gestalten, welche bei Cobots über die Programmierung am Teach Pendant schnell unübersichtlich werden. Des Weiteren ist diese Software unabhängig vom Robotertyp, da sie lediglich als Codegenerator fungiert. So kann beispielsweise dasselbe Programm für einen Kuka KR16 aber auch einen Universal Robot UR 3e verwendet werden. Sie ermöglicht dem Benutzer, Roboterarbeiten und -bewegungen durch eine visuelle Programmierung zu erstellen. Der Umfang der Einbindung von unabhängigen Komponenten lässt sich außerdem um Sensorkomponenten erweitern, wodurch ein Spektrum an kompatiblen Kraft-Momenten-Sensoren und Kameras für die Integration zur Verfügung steht. Die Software ermöglicht auch die Echtzeit-Simulation von Roboterbewegungen, bevor sie auf physische Roboter übertragen werden, was die Fehlerbehebung und Validierung von Roboterarbeiten erleichtert. Durch den visuellen Aspekt lässt sich auch eine Offline Programmierung realisieren.[27, 28]

Eine weitere Erweiterung ist die Learning & Analytics for Robots (LAR) Software. Mit ihr lassen sich Live-Sensordaten vom Roboter, von Kraftsensoren und Bildverarbeitungssystemen erfassen und in einer Datenbank speichern. Somit können Fertigungsprozesse überwacht werden und auch im Nachhinein noch analysiert und geprüft werden. Auch lassen sich Positionen durch Auswertung der Daten optimieren, wodurch es ein hilfreiches Analysewerkzeug ist.[29]

## 3 Konzeptphase

Um eine optimale Lösung für die im Kapitel 2.2 beschriebene Aufgabe zu entwickeln, wurde der Stand der Technik gesichtet. Die Recherche ergab, dass bereits Anlagen für die THT-Bauteil-Bestückung umgesetzt wurden, jedoch werden diese meist als Komplettlösung verkauft und erfordern dadurch einen großen Integrationsaufwand in bereits bestehende Abläufe.

### 3.1 Stand der Technik

Im Zuge der Industrie 4.0 entstehen bereits seit einigen Jahren Konzepte und Anlagen von unterschiedlichen Firmen aus dem Elektroniksektor für eine Automatisierung in der Elektronikfertigung im Bereich der THT-Bauteile. Dies liegt daran, weil diese Bauteile entweder nicht mit herkömmlichen Bestückungsautomaten bestückt werden können oder einen hohen Rüstaufwand erfordern[30]. Daher werden flexiblere Anlagen entwickelt, welche höhere Kapazitäten in der Produktion durch Übernahme von monotonen oder repetitiven Tätigkeiten versprechen. Das entlastet die Mitarbeiter und führt durch das produktiver eingesetzte Personal zu Kosteneinsparungen.[31]

Die Ersä GmbH präsentierte 2014 das entwickelte Automatisierungssystem für die Bestückung von Leiterplatten namens Ersä Roboplace. Dieses System ermöglicht die automatische Bestückung von Platinen mit elektronischen Bauteilen. Die Hauptkomponenten für die Bestückung umfassen einen Roboter und Magazinmodule für die Bauteilzufuhr. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Versorgung des Roboters. Da es sich um einen kollaborativen Roboter handelt, ist keine Schutzeinrichtung notwendig. Der Aufbau der Anlage ist in Abbildung 3.1a gezeigt. Erkennbar ist dabei die Verwendung des ABB YuMi, welcher besonders für seine Flexibilität bekannt ist. Dieser verfügt über zwei individuell programmierbare Arme, mit denen er eine Platine bestückt. Für die Aufnahme der Bauteile können zwei unterschiedliche Greiferwerkzeuge montiert werden. Eine Kollision der beiden Arme sowie mit einem Mitarbeiter ist dabei ausgeschlossen. Durch Verfahren, wie Teachin ist eine intuitive Programmierung gegeben, wodurch neue Positionen schnell angelernt werden können. Die Anlage ist ortsunabhängig einsetzbar und kann die Leiterplatten nach der Bestückung an eine Lötanlage übergeben. Dabei ist der Ersä Roboplace kompatibel mit Selektiv- und Lötwellenanlagen.[31]

Ebenso wie Ersä, hat die Glaub Automation & Engineering GmbH eine Anlage für die automatisierte Bestückung von THT-Bauteilen auf Platinen entwickelt. Die GL-THTeasy ging 2020 an den Start und verwendet ebenso den ABB YuMi, da sich dieser aufgrund der zwei Arme besonders gut eignet, um zwei Platinen parallel zu bestücken. Die Bauteile werden in den vom Hersteller gelieferten Blistern auf ein Förderband gelegt und anschließend zum Roboter befördert. Das eingelegte Bauteil wird dabei über den Barcode, welcher sich auf dem Blister befindet, an die Anlage kommuniziert. Die Anordnung der Zu- und Abfuhr des Materials ist dabei in der Grafik 3.1b zu sehen. Hier ist ersichtlich, dass Sauggreifer verwendet werden. Diese sind speziell auf die zu greifenden Bauteile angepasst. Aufgrund der vielen Varianzen in Hinsicht auf die Lage der Platine, die Position des Blisters sowie die Winkellage der Kondensatoren im Blister verwendet Glaub in ihrer Anlage unterschiedliche Kamerasysteme zur Lageerkennung. Beim Einlegen des Materials wird zunächst der Barcode des Materials gescannt, anschließend wird die Lage der Platine vermessen. Um die Kondensatoren greifen zu können, wird nun die Lage des Trays kontrolliert und ein Kondensator gegriffen. Dieser wird daraufhin in einen Bereich gehalten, um die Anschlüsse des Kondensators auf ihre Winkellage zu prüfen. Daraufhin wird die Position für

die Bestückung des Kondensators ermittelt und der Kondensator bestückt. [30, 32]  
 Das Unternehmen pi4\_robotics GmbH bietet seit 2016 ebenso eine Lösung zur automatisierten Bestückung von THT-Bauteilen. Sie verfolgen mit ihrer Anlage einen etwas anderen Ansatz, da sie ungleich den zuvor vorgestellten Anlagen auf einen klassischen Industrieroboter setzen, wie in Abbildung 3.1c erkennbar. Die Bauteile können hier entweder aus fixen Positionen wie beispielsweise einem Magazin oder als Schüttgut zugeführt werden. Das Schüttgut wird dabei mittels eines Leuchttisches und einem Kamerasystem auf ihre Ausrichtung geprüft. Anschließend wird das gegriffene Bauteil vor ein weiteres Kamerasystem befördert, um die Lage und Ausrichtung der Anschlüsse zu prüfen. Dabei wird auch eine Qualitätsprüfung auf verbogene Anschlüsse durchgeführt. Fällt diese Prüfung negativ aus, wird das Bauteil aussortiert. Im Anschluss können die korrekt erkannten Bauteile bestückt werden. Dank der Verwendung eines Industrieroboters kann dabei mit höheren Geschwindigkeiten verfahren werden.[33]

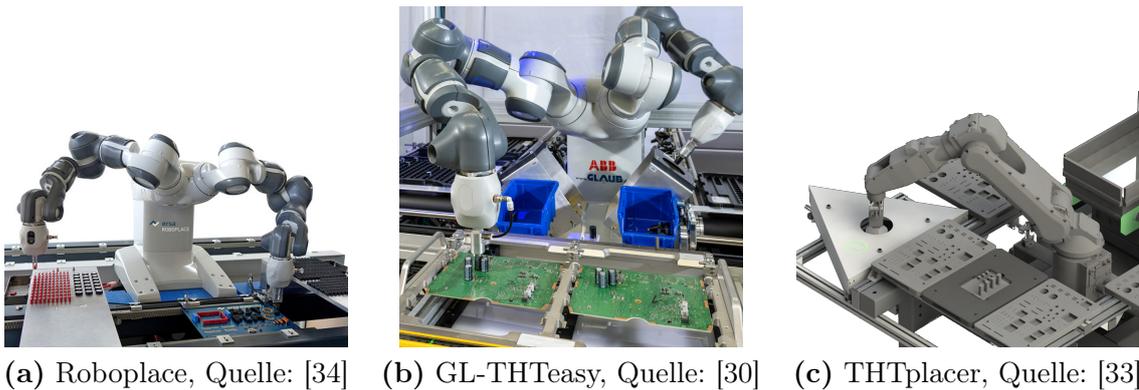


Abbildung 3.1: Automatische Bestückungsanlagen in der Elektronikfertigung. Dabei werden Roboter und Sensorik, wie beispielsweise Kameras, verwendet, um die Ausrichtung der Bauteile zu prüfen und sie anschließend zu bestücken.

## 3.2 Ablauf der Mensch-Maschine-Interaktion

Eine der recherchierten Fertiglösungen ist für die Firma Baumüller keine Option, da zum einen bereits Komponenten für die Anlage vorhanden sind und zum anderen, weil der Aufbau von Kompetenzen innerhalb der Firma erwünscht ist. Daher galt es zunächst die Prämissen zu klären, welche Aufgaben der Bediener der Anlage hat und wie viel Zeit dafür angesetzt ist. Der Mitarbeiter, welcher für die Roboteranlage zuständig ist, soll parallel zur Roboterbestückung weitere Tätigkeiten erledigen können. Daher soll die Bedienung der Anlage nur einen kleinen Anteil der Arbeitszeit des Mitarbeiters ausmachen. Für die Anlage wurde deshalb ein Konzept erarbeitet, welches diese Randbedingungen berücksichtigt. Unterschiedliche Ideen und Prototypen wurden in diesem Zuge entwickelt und getestet. Zur Veranschaulichung wurde ein Programmablaufplan (PAP) für den Bediener, welcher in Abbildung 3.2 sichtbar ist, entworfen. Aus diesem geht hervor, dass der Bediener die Anlage zunächst starten muss. Falls nun eine Platine voll bestückt wurde, muss er diese entnehmen und durch eine unbestückte ersetzen. Außerdem zählt die Befüllung der Anlage mit Kondensatoren zu seinen Aufgaben. In der freien Zeit, in der der Roboter keine externe Hilfe benötigt, kann der Mitarbeiter seiner Nebentätigkeit nachgehen.

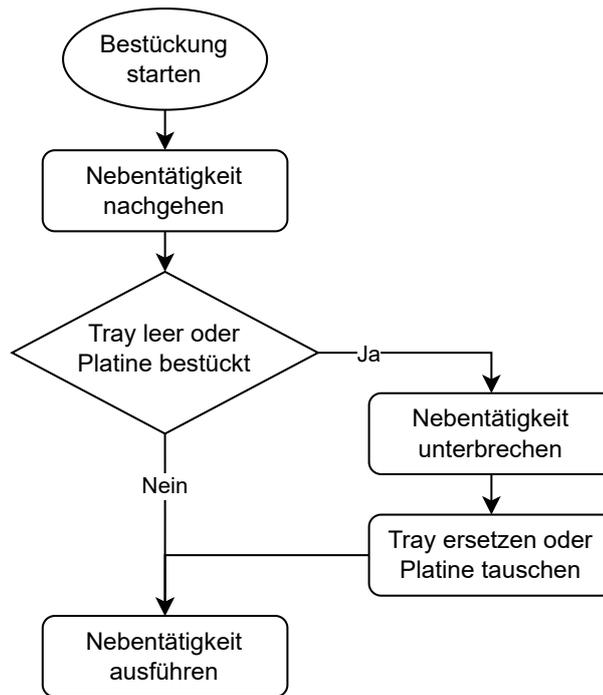


Abbildung 3.2: Programmablaufplan des Bedieners der Anlage

### 3.3 Zufuhr der Kondensatoren

Der Ablauf der konventionellen Anlieferung des Materials wurde bereits in einem vorherigen Kapitel ausführlich beschrieben. Da die zu entwickelnde Anlage nicht mehr spezifisch nach Aufträgen fertigt, wird ein Abzählen der Kondensatoren nicht mehr benötigt. Daher musste sich eine Lösung überlegt werden, wie die Kondensatoren der Anlage zugeführt werden. Um Taktzeit zu sparen, muss das Konzept dabei außerdem als Speicher für Kondensatoren dienen. Eine sinnvolle Speichergröße liegt dabei bei mindestens 46 Kondensatoren, um mit einer Befüllung mindestens eine Platine bestücken zu können.

Eine denkbare Lösung wäre das Bin picking, worunter man das Greifen in einen Behälter versteht, in welchem keine einheitliche Anordnung der Bauteile besteht. Dabei muss die Ausrichtung des zu greifenden Bauelements zunächst über einen optischen Sensor erkannt werden. Dadurch ist das System flexibel und die Befüllung simpel. Diese Lösung erfordert allerdings eine höher dimensionale Kamera, um übereinanderliegende Kondensatoren zu erkennen. Außerdem wird für jeden Kondensator weitere Prozesszeit für die Erkennung der Lage des Kondensators benötigt, was in Betracht auf die angesetzte gesamte Bestückungszeit einen großen Anteil ausmacht. Deshalb wird dieses Konzept verworfen.[35]

Ein weiterer Ansatz wäre ein Magazin mit Vibrationswendelförderer, über welchen die Kondensatoren in eine vorgegebene Orientierung gebracht werden. Dabei werden meist elektromagnetische Schwingantriebe verwendet, welche Vibrationen auslösen. Dadurch werden die Bauteile in Bewegung versetzt. Durch den Einsatz von Sortierelementen können dann Ausrichtungen vorgegeben werden. Darin liegt auch der Vorteil, dass diese Anlagen eine fixe Ausrichtung der zugelieferten Kondensatoren bieten. Außerdem kann der Speicher über die Größe des Sortiertopfes skaliert werden. Aufgrund der Komplexität haben diese Anlagen hohe Anschaffungskosten. Da die Bewegung über Vibrationen realisiert wird, sind erhöhte Lautstärkepegel zu erwarten. Daher ist dieses Konzept nicht unmittelbar in der Nähe von Mitarbeitern einsetzbar, weshalb auch jenes ausscheidet.[36]

Weitere Überlegungen führten zu dem Gedanken, sich die Anordnung der Kondensatoren in den

Anlieferungstrays zunutze zu machen. Denn so behalten die Kondensatoren mit einer gewissen Toleranz ihre Position bei und weisen eine konsequente Ausrichtung der Anschlüsse vor. Dadurch ist eine Zeitersparnis im Prozess des Greifens möglich. Außerdem erzielt man damit eine Speicherung von 100 Kondensatoren bei Verwendung eines Folienblisters. Die Speicherung der Kondensatoren lässt sich durch die Verwendung von mehreren Trays skalieren, wodurch ein Speicher von 200 Kondensatoren oder mehr erreicht werden kann. Diese können innerhalb der Zelle angeordnet werden. Dabei ist die Reichweite des Roboters zu beachten, da dieser die Kondensatoren noch greifen können muss.

Im Tray welches vom Hersteller geliefert wird, zeigen die Kondensatoranschlüsse nach oben. Für die spätere Kondensatorbestückung müssen die Anschlüsse allerdings nach unten zeigen. Daher musste sich überlegt werden, wie die Kondensatoren die richtige Orientierung einnehmen. Da es zu viel Zeit kostet, bis der Bediener jeden Kondensator einzeln umgedreht hat, war dafür eine Lösung notwendig. Nachdem aus den originalen Trays alle Kondensatoren entnommen wurden, hat es keinen weiteren Zweck mehr und wird daher entsorgt. So lag nahe, diese zu modifizieren und zu verwenden. Hierfür wurden Löcher in das Tray gebohrt, um die Kondensatoren durch ihre Anschlüsse auch in 180 Grad gedrehter Orientierung halten zu können. Dabei bemerkte ich schnell, dass die dünnen tiefgezogenen Blister nicht für den dauerhaften Einsatz geeignet sind. Deshalb wurde ein Gegentray konstruiert, welches über das originale Tray gestülpt wird. Dadurch wird die geordnete Anordnung der Kondensator im Anlieferungszustand weiterhin genutzt. Um Ungenauigkeiten im Modell durch händisches Nachmessen des Folienblisters zu verhindern, wurde die CAD-Datei vom Hersteller angefordert. Anhand dessen wurde anschließend das Gegentray konstruiert. Dafür wurde die Software Autodesk Fusion 360 verwendet. Wichtig war dabei, dass das 3D-Druck gefertigte Gegentray in allen Abmessungen (Bohrungsdurchmesser, Bohrungsabstände und Außenmaße) identisch mit denen des original Trays sind, damit die Kondensatoren eine definierte Position auf dem Gegentray einnehmen. Das Modell wurde im Anschluss auf dem 3D-Drucker, einem Ultimaker 2+ Extended, gefertigt. Da der 3D-Drucker einen begrenzten Bauraum hat, wurde das Gegentray geviertelt, sodass es druckbar war. Um die vier Gleichteile anschließend verbinden zu können, wurden die Viertelstücke mit Schwalbenschwanzverbindungen versehen und zusammengesteckt. Die ersten 3D-Drucke beschränkten sich dabei auf den Test der Schwalbenschwanzverbindung und der Genauigkeit des Sitzes der Kondensatoren. Anschließend konnte das gesamte Gegentray gedruckt werden. Der Ablauf der schrittweisen Vorbereitung des Materials ist in Abbildung 3.3 ersichtlich. Das Gegentray wird dabei zunächst auf das originale Tray gestülpt. Im Anschluss wird die gesamte Einheit um 180 Grad gedreht. Somit sitzen die Kondensatoren nun im Gegentray, die Anschlüsse zeigen nach unten und das originale Tray kann entfernt werden. Abschließend kann das gedruckte Gegentray in die Anlage eingelegt werden. Es wurde dabei an einen Anschlag angelegt und mit Spannpratzen gegen ein Verrutschen gesichert.

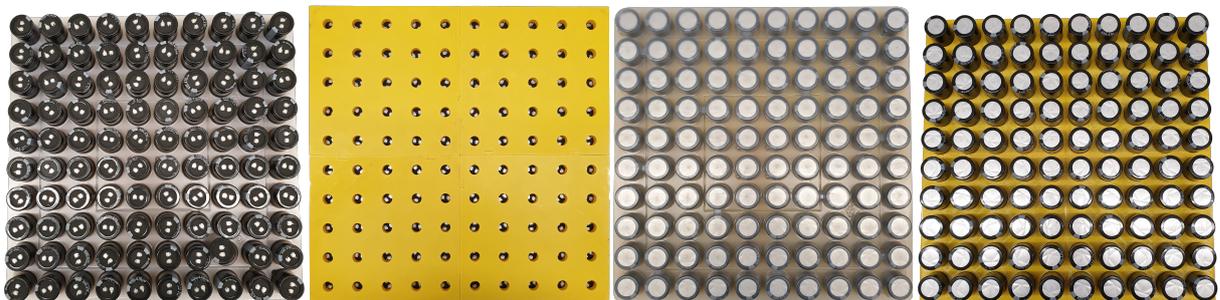


Abbildung 3.3: Schrittweise Anwendung des Gegentrays zur Kondensatorvorbereitung

## 3.4 Bestückung der Kondensatoren

Für die Bestückung der Kondensatoren soll ein Programm geschrieben werden, welches die Kondensatoren bestücken kann. Dazu gehört das Greifen, die Korrektur der Ausrichtung sowie die Bestückung des Kondensators. Die unterschiedlichen Varianten der Leiterplatte sollen dabei über weitere Programme abgedeckt sein.

### 3.4.1 Platinenhalterung von Ernst [2]

Die Platine muss nach der Bestückung vom Bediener entnommen werden und durch eine unbestückte Leiterplatte ersetzt werden. Da der in der Machbarkeitsstudie angefertigte Werkstückträger den Anforderungen weiterhin gerecht wird, kann jener weiterhin genutzt.

### 3.4.2 Wahl des Greifartkonzepts

Die Bestückung der Kondensatoren erfolgt auf engem Platz, daher war die Wahl des richtigen Greifartkonzeptes essenziell. Deshalb eignet sich eine Griffart, welche den Kondensator nicht umschließt, am ehesten. Vakuumbreifer kamen aus bereits genannten Gründen nicht zum Einsatz. Des Weiteren haben die Kondensatoren, wie bereits genannt, an der Oberseite eine Sollbruchstelle in Form von Einkerbungen, durch welche sich der Unterdruck abbaut.

Ein weiterer Ansatz war ein magnetischer Greifer. Dieser konnte allerdings auch schnell ausgeschlossen werden, da es sich bei den Materialien des Kondensators um nicht ferromagnetische Werkstoffe handelt.

Es musste also eine Lösung über Formschluss gefunden werden. Um Kosten zu sparen, wurde daher der bereits vorliegende Robotiq Greifer verwendet.

### 3.4.3 Individuelle Greiferfinger

Die Greiferfinger, welche bei dem Robotiq Greifer mitgeliefert werden, sind für allgemeine Anwendungen ausgelegt. So ist die Greifbarkeit von vielen Objekten abgedeckt, allerdings ist das Design nicht für jedes Objekt ideal. Da sie lediglich über zwei M4 Schrauben befestigt sind, können diese schnell ausgetauscht werden. Der Platz zwischen den Kondensatoren auf der Leiterplatte ist eng, wie in Abbildung 3.4 gezeigt wird. Der direkte Abstand von einem Kondensator zum nächsten liegt teilweise bei wenigen Millimetern. Da die originalen Greiferfinger massiv ausgeführt sind, können diese daher nicht verwendet werden.

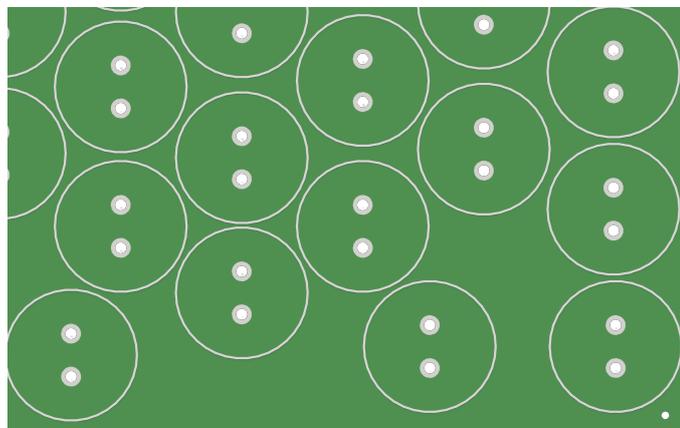


Abbildung 3.4: Ausschnitt der Platine mit Anordnung der Elkos

Grundsätzlich muss der Greifer für diese Applikation nur einen Kondensatortyp, handhaben. Da es sich bei dem Robotiq Greifer um einen zwei Finger Greifer handelt, war der Kondensator beim Griff nicht in allen Freiheitsgraden eingeschränkt. Wie Grafik 3.5 veranschaulicht, konnte der Kondensator weiterhin um die y-Achse rotieren. Dies war auch bei den angefertigten Fingern von Ernst [2] der Fall. Insbesondere durch die Verwendung von kleineren Greiferfingern bestätigte sich dies, da die Auflagefläche des Kondensators an den Fingern kleiner wird.

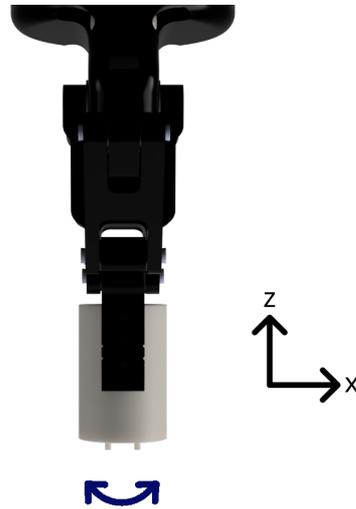


Abbildung 3.5: Freiheitsgrade des Kondensators im zwei Fingergreifer. Angefertigter Render nach CAD-Datei verfügbar bei [24]

Die Lösung ist daher der Entwurf eines Greiferfingerdesigns, welches den Kondensator formschlüssig greift, sodass der Kondensator sicher transportiert werden kann. Deshalb wurde der Kondensator zunächst vermessen und der Finger anschließend für diesen Kondensatortyp modelliert. Durch das halbrunde Design, wie in Grafik 3.6 gezeigt wird, wird der Kondensator selbstständig im Greifer zentriert. Somit waren die Abweichungen in x- und y-Richtung stark begrenzt. Um nun die Abweichungen in die z-Richtung auch noch einzugrenzen, wurde hierfür ein Anschlag in den Finger modelliert. Dieses Design wurde iterativ ermittelt und mit dem 3D-Drucker umgesetzt. Dadurch konnten die Prototypen kostengünstig und schnell gefertigt werden. Kurzfristige Änderungen am Modell konnten so schnell realisiert und getestet werden.



Abbildung 3.6: Konstruiertes und gedrucktes Greiferfingerdesign Version 4

Die Analyse der ersten Tests mit den Greiferfingern ergab, dass der Greifer bei erhöhter Greifkraft nicht mehr parallel greift. Dadurch hatte der Kondensator zu den Anschlüssen hin Spiel, was zu einer unzuverlässigen Positionierung führte. Grund dafür sind Fertigungstoleranzen im Greifer, weshalb die Finger des Greifers im belasteten Zustand nach unten hin einen größeren Abstand vorweisen, wie in Abbildung 3.7a dargestellt. Daher wurde die Fläche in den gedruckten Greiferfingern, welche den Formschluss mit dem Kondensator bildeten, ebenso angeschrägt, wie in Grafik 3.7b dargestellt. Somit wird der Kondensator weiterhin formschlüssig beziehungsweise mit einer möglichst großen Auflagefläche gegriffen. Hierfür wurden zunächst unterschiedliche Versionen mit einem Grad und drei Grad schiefer Ebene gedruckt. Diese Anpassungen lösten das Problem. Zur Validierung wurde die schiefe Ebene durch Messen der Abstände am Greifer im belasteten Zustand ermittelt und daraus der Winkel der schiefen Ebene berechnet. Die Abstände wurden mittels einer Schieblehre gemessen und durch mehrmaliges Messen validiert. Anschließend wurden diese Maße in eine CAD-Skizze übertragen, welche einen Winkel von 0,8 Grad pro Finger ergab. Aufgrund der weiterhin bestehenden Funktion bei der drei Grad Version wurde diese vorläufig weiterhin verwendet.

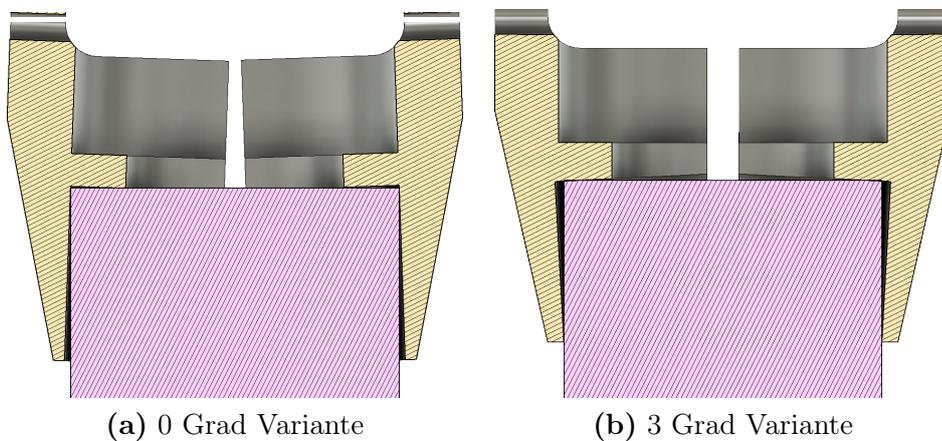


Abbildung 3.7: Schnittanalyse der Abweichung des parallelen Griffs bei Kräfteinfluss

### 3.4.4 Strategien zur Griffserkennung

In der Machbarkeitsstudie war es nicht nötig, die Winkellage des gegriffenen Objekts zu erkennen, da die Orientierung immer gleich war. Nun befinden sich die Kondensatoren aber in beliebigen Ausrichtungen im Gegentray. Außerdem wird nicht immer aus derselben Position gegriffen, sondern das Gegentray wird nach und nach geleert. Daher müssen sowohl unterschiedliche Positionen angefahren als auch die Ausrichtung der Kondensatoren geprüft werden. Für die Ausrichtung muss dafür sowohl die Polung des Kondensators als auch die Anschlussdrähte erkannt werden, um den Kondensator entsprechend vor der Bestückung ausrichten zu können. Hierfür kommt das Kamerasystem zum Einsatz, welches die Ausrichtung zuverlässig bestimmen soll. Da die Anschlüsse zunächst im Gegentray verdeckt sind, wird die Kamera hierfür an die Zelle montiert, um nach dem Greifen die Ausrichtung zu kontrollieren. Nach der Montage der Kamera muss diese zunächst kalibriert werden.

### 3.4.5 Strategien zur Bestückung

Nach der erfolgreichen Erkennung eines Kondensators kann dieser platziert werden. Hierbei muss die Bestückungsposition beachtet werden, da jede Position nur einmal bestückt werden darf. Aufgrund von Toleranzen in der Positioniergenauigkeit des Roboters, den Toleranzen im gedruckten Greiferfinger sowie in der Erkennung durch die Kamera ist davon auszugehen, dass die Kondensatorbestückung nicht reibungslos vonstattengeht. Da der Platz zwischen den Kondensatoren, wie bereits angesprochen, eingeschränkt ist, war eine Überlegung eine intelligente Reihenfolge der Bestückung umzusetzen, bei welcher immer ausreichend Platz zum benachbarten Kondensator vorliegt. Aufgrund der Anzahl und der Anordnung der Bauteile ist dies allerdings nicht umsetzbar.

Ein weiterer Ansatz ist, den Greifer immer entsprechend so auszurichten, dass die Greiferfinger in die Richtungen öffnen, in denen am meisten Platz ist. Dies würde eine komplexe Programmierung, ein Zwischenlagern sowie Neuausrichten des Kondensators im Greifer fordern, was zu Einbußen in der Taktzeit führt. Daher wurde auch diese Idee verworfen.

Einen guten Kompromiss bietet der Gedanke, naheliegende Kondensatoren beim Bestücken leicht aus der Position zu kippen. Nach vollendeter Bestückung fährt der Greifer wieder weg und die Kondensatoren kippen wieder zurück in ihre Ursprungsposition.

Des Weiteren kommt der Kraft-Momenten-Sensor von Robotiq und leistungsfähige Suchalgorithmen zum Einsatz, um Positionstoleranzen von Roboter, Kondensator und Platine ausgleichen zu können.

### 3.4.6 Umgang mit Ausschuss

Bei den angelieferten Kondensatoren kann es vorkommen, dass Anschlüsse der Kondensatoren verbogen oder beschädigt sind. Gründe dafür können sowohl beim Hersteller als auch an der Handhabung des Bedieners, welcher die Anlage befüllt, liegen. Da der Roboter Schwierigkeiten hat diese Kondensatoren zu bestücken, sollen diese aussortiert werden. Die Ausschusskondensatoren sollen selbstständig erkannt und separat zwischengelagert werden. Dieses Zwischenlager muss regelmäßig vom Bediener entleert werden. Die Kondensatoren können gegebenenfalls nach einer kurzen Sichtprüfung für eine Handbestückung verwendet werden.

## 4 Entwicklungsphase

Nach der Konzeptphase konnte mit der Umsetzung begonnen werden. Dafür wurde das Ablaufprogramm für den Roboter entwickelt und die Detektoren auf die zu erkennenden Merkmale der Kondensatoren angelernt.

### 4.1 ArtiMinds Software Robot Programming Suite

Wie bereits in Kapitel 2.3.6 beschrieben, bietet die Software eine benutzerfreundliche, hardwareunabhängige Programmierung. Dafür müssen Flowcharts mit vorkonfigurierten Templates erstellt werden. ArtiMinds bietet die unterschiedlichsten Bausteine. Von einfachen Bewegungen, wie `Move Linear` bis hin zu komplexen Bausteinen, bei welchen der Roboter sensorgesteuert verfährt, wie beispielsweise `Push Depth Moment`. Es existieren auch einfache Builderbausteine, wie `Or`- und `Not`-Gatter. Diese Ablaufprogramme werden anschließend in den Robotercode übersetzt. In Abbildung 4.1 ist der grundlegende Aufbau der Benutzeroberfläche zu sehen. Auf der linken Hälfte befindet sich der Bereich für die Flowchart-Programmierung, wobei auf der unteren Seite die Auswahl an Bausteinen zu finden ist. Auf der rechten Seite ist der Bereich für die Visualisierung und Simulation der Trajektorie. Oben befinden sich unterschiedliche Werkzeuge zum Kompilieren und Visualisieren.[37]

Für die Konfiguration der verwendeten Komponenten bietet die RPS einen Wizard. Über diesen können neben den Komponenten, wie dem Roboter, dem Kraftsensor und der Kamera auch das Koordinatensystem für die Basis und die Montage sowie die Verdrehung der Komponenten am Flansch definiert werden. Neben den Komponenten kann in dem Robot Konfigurator Wizard auch der TCP definiert werden. Dieser wird für diese Anwendung zwischen die Anschlussdrähte in Flucht mit der Rotationsachse des letzten Gelenks des URs gesetzt, da dies später die Bestückung vereinfacht.

Die Visualisierung des Roboters kann für eine zuverlässigere Bahnplanung um seine Umgebung erweitert werden. So können Aufbauten wie Umzäunungen oder Roboterzellen, in welchen der Roboter montiert ist, eingefügt werden. Diese werden an das Basiskoordinatensystem geknüpft. Da der Robotiq Greifer nicht mehr mit den werksseitigen, sondern mit individuellen Greiferfingern verwendet wird, wurden diese ebenso in die Visualisierung hinzugefügt. Für die Lage der Finger wird dabei eine Abhängigkeit mit dem Greifer hinzugefügt, damit diese in der Visualisierung mit variablen Öffnungswinkel des Greifers korrekt dargestellt werden. Dafür müssen Ausnahmen zwischen den Beziehungen des Greifers und der Greiferfinger hinzugefügt werden, da es sonst zu Fehlermeldungen aufgrund von Kollisionen kommt. Diese visuellen Abhängigkeiten werden anschließend in einer Scene-Datei abgespeichert. So kann für ein neues Projekt die gleiche Umgebung geladen werden.

Durch das Konfigurieren dieses digitalen Zwillings samt der Umgebung bietet das die Möglichkeit der Offline-Programmierung. Somit können Anpassungen oder neue Programme für eine Anlage vorgenommen werden, ohne den Betrieb aufhalten zu müssen.

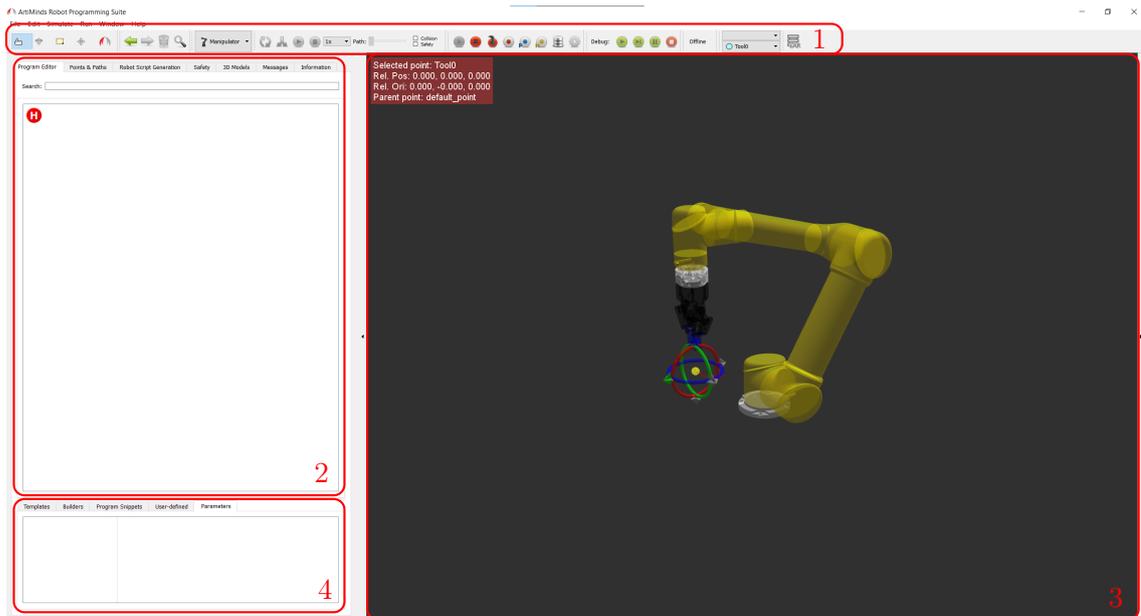


Abbildung 4.1: Aufbau der Benutzeroberfläche der Robot Programming Suite; **1**: Werkzeugleiste, **2**: Flowchart-Programmierung, **3**: Visualisierung und Simulation, **4**: Templates und Parametrierung

Für die Einarbeitung in die Software wurden erste Testprogramme erstellt, in welchen die Templates zunächst geprüft wurden. Dabei wurden einfache Abfolgen, wie das Abholen und Bestücken eines Kondensators, an einer festen Position umgesetzt.

#### 4.1.1 Einmessen von Material und Werkzeug

Um die Trajektorie kollisionsfrei planen zu können, müssen neben der Umgebung des Roboters alle beweglichen Objekte wie der Werkstückträger mit der Platine sowie das Gegentray importiert werden. Hierfür wurden die CAD-Dateien für die Platine und den Werkstückträger beschafft. Die Daten für das selbstkonstruierte Gegentray lagen bereits vor. Bei dem Modell der Platine lag die Schwierigkeit darin, dass die Leiterplatten in einem anderen Format abgespeichert werden, welches die Leiterbahnen und weitere wichtige elektrische Informationen enthält. Dieses Format musste zunächst in eine 2D Skizze, das heißt in eine \*.dxf-Datei überführt werden, um daraus anschließend ein dreidimensionales Modell erstellen zu können, welches kompatibel mit der RPS ist.

Um die einzelnen Komponenten in der Software einmessen zu können, musste zunächst der Tool center point für den Greifer bestimmt werden. Für die Vermessung des TCPs bietet der UR eine Funktion im Teach Pendant an, bei welchem ein beliebiger Punkt mit dem TCP aus unterschiedlichen Richtungen angefahren werden muss. Dafür eignet sich der FreeDrive, wodurch der Roboter frei im Raum bewegt werden kann. Da der Kondensator zwischen den Anschlussdrähten keinen mechanischen Anschlag besitzt, ist das Einmessen eines definierten Punktes nicht möglich. Deshalb wurde eine TCP-Spitze für den Greifer mittels 3D-Druck hergestellt (siehe Abbildung 4.2). Diese Spitze wird dann in den Greifer gespannt. Daraufhin kann mit dieser ein definierter Punkt im Raum angefahren werden.

Für den ortsfesten Punkt im Raum gibt es diverse Lösungen zum Kauf, die eine kegelförmige Spitze aufweisen. Um Kosten zu sparen wurde an dieser Stelle ein spitzer Kegelsenker verwendet, da dieser die gleiche Funktion erfüllt.

Anschließend werden mindestens drei verschiedene Punkte mit unterschiedlicher Richtung abgespeichert. Dabei zeigt die gedruckte Spitze genau auf die des Kegelsenkers. Daraus berechnet der UR dann einen TCP, welcher für die Übereinstimmung ebenso in die RPS übernommen wird.

Daraufhin können mit derselben gedruckten Spitze die weiteren Komponenten in der RPS vermessen werden. Hierfür bietet die RPS die Funktion, Objekte in der Simulation mit der Realität abzugleichen[37]. Dafür werden in der Simulation drei Punkte am Objekt festgelegt. Diese festgelegten Punkte werden in der Realität angefahren und abgespeichert. Aus der Differenz der Raumkoordinaten der Punkte aus Simulation und Realität wird dann ein Vektor gebildet und das Objekt in der Simulation entsprechend verschoben. Dieses Prozedere wird sowohl für die Platine als auch für das Gegentray durchgeführt.

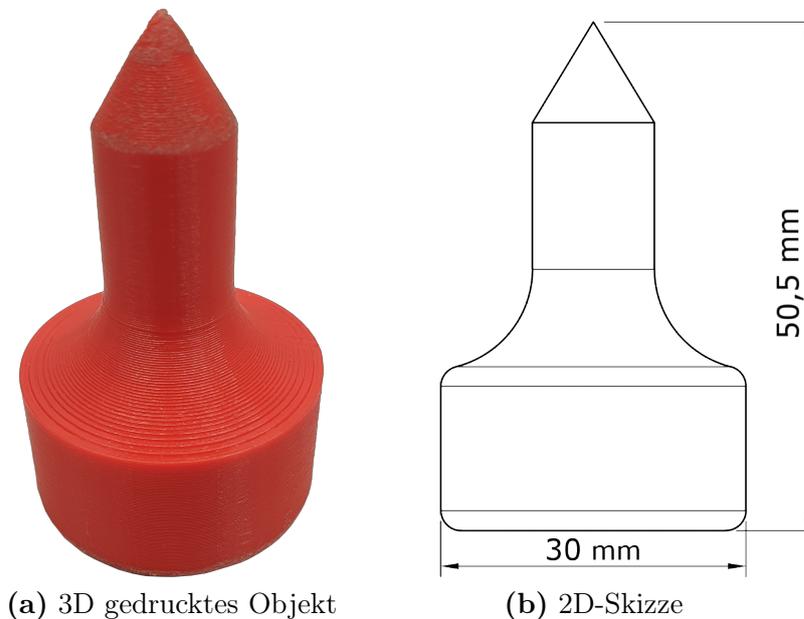


Abbildung 4.2: 3D-gedruckte Spitze zur Vermessung der Komponenten

#### 4.1.2 Extraktion von Handling-Punkten aus CAD-Modellen

Für die Leiterplatte werden 46 Bestückungspositionen und für das Tray mindestens 100 Entnahmepositionen benötigt. Da die Anordnung der Platine und des Gegentrays innerhalb der Szene variabel bleiben soll, ist es keine Option alle Position manuell und absolut einzulernen. Dafür bietet die RPS die Funktion CAD-Dateien zu importieren und aus diesen Punkte und Konturen zu extrahieren. Dieses Werkzeug nennt sich `CAD-2-Path` und bietet den Vorteil, dass die Punkte verknüpft sind mit dem Koordinatensystem der CAD-Datei. Bei einem erneuten Einmessen des Modells erfahren alle Punkte dieselbe Verschiebung wie das Koordinatensystem, auf welches sie sich beziehen.

## 4.2 Optische Erkennung

Für die Erkennung der Polung sowie den Anschlüssen des Kondensators ist eine Kamera essenziell. Um dies zuverlässig zu tun, benötigt die Kamera eine feste Montage. Hierfür wurde ein Adapter konstruiert, mit welchem die Kameraaufnahme mittels Nutensteinen an einem Item-Profil befestigt werden kann. Somit ist eine gleichbleibende Position sichergestellt.

### 4.2.1 Kamerakalibrierung

Zunächst musste der Arbeitsabstand der Kamera zum Objekt bestimmt werden. Hierfür bietet SensoPart sowohl eine Software als auch eine Webvariante an. In dieser muss das genaue Kameramodell und die Größe des Bereichs in welchem sich die zu erkennenden Merkmale befinden,

angegeben werden. Anschließend ergibt sich der Abstand, den das Objekt von der Kamera haben sollte, um optimale Erkennungsleistung zu erzielen. Abbildung 4.3 zeigt das Ergebnis der Ermittlung des Arbeitsabstands. Auch ein Schärfebereich wird angegeben, in welchem die Erkennung der Merkmale gewährleistet wird. Anschließend muss noch die Belichtung und somit die Verschlusszeit der Blende gewählt werden. Hierfür bietet SensoPart eine Konfigurationssoftware mit einer Auto-Funktion an, welche den Bereich, in welchem sich die optimale Verschlusszeit befindet, eingrenzt. Für optimale Ergebnisse mussten nur noch minimale, Feinjustagen der Parametrierung der Verschlusszeit vorgenommen werden.

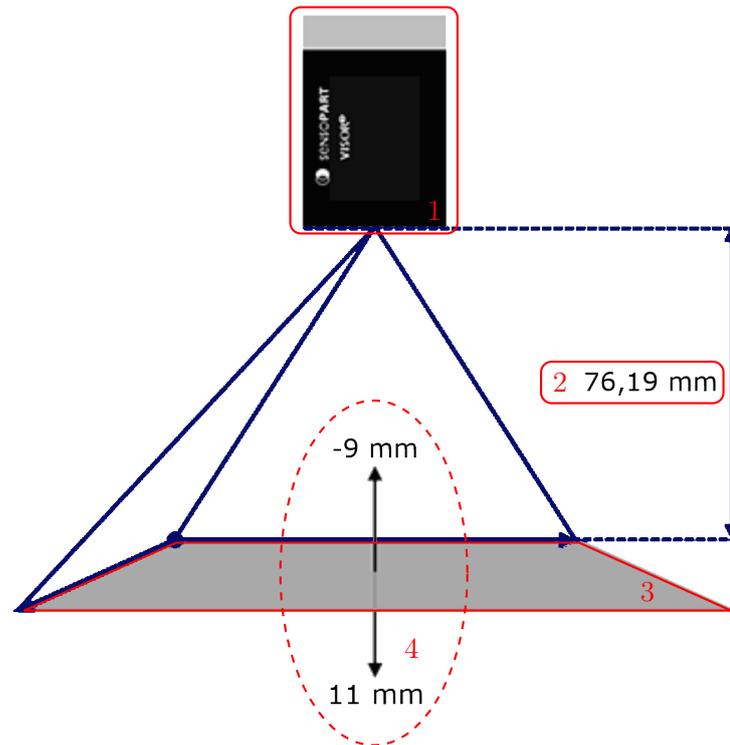


Abbildung 4.3: Ergebnis der Arbeitsabstandermittlung mit der SensoCalc Software. **1:** Kamera, **2:** Arbeitsabstand, **3:** Bildebene, **4:** Schärfebereich

Da die Kamera frei in der Zelle montiert wurde und somit die Ausrichtung nicht bekannt war, musste im Anschluss eine Kamerakalibrierung durchgeführt werden. Dabei handelt es sich um eine Base-Eye-Kalibrierung, welche den Zusammenhang der Position zwischen der Kamera und der Roboterbasis darstellt. Dadurch werden die translatorischen und rotatorischen Koordinaten des Kamerakoordinatensystems in Bezug auf die Roboterbasis ermittelt.

Es handelt sich hierbei um ein photogrammetrisches Verfahren zur Kalibrierung der Kamera. Dabei werden Bilder eines Kalibrierkörpers mit bekannten Weltkoordinaten aufgenommen, um somit die elf unabhängigen Abbildungsparameter der Projektionsmatrix der Kamera zu bestimmen. Die elf Parameter der Projektionsmatrix lassen sich in sechs externe und fünf interne Parameter unterteilen. Für die Bestimmung der Parameter sind mindestens sechs Bilder notwendig.[38]

Da der Arbeitsabstand und somit das Objektiv nach der Kalibrierung nicht mehr verändert werden darf, muss das Kalibriermuster auf derselben Bildebene wie die später zu erkennenden Merkmale am Kondensator liegen. Hierfür wurde, wie in Abbildung 4.4 zu sehen, ein Kalibrierplattenhalter konstruiert und mittels 3D-Druck hergestellt. Dieser wird in den Greifer gespannt und hat dabei dieselbe Höhe wie die Kondensatoranschlüsse. Das Design wurde dabei so gewählt, dass die Kalibrierplatte austauschbar ist.

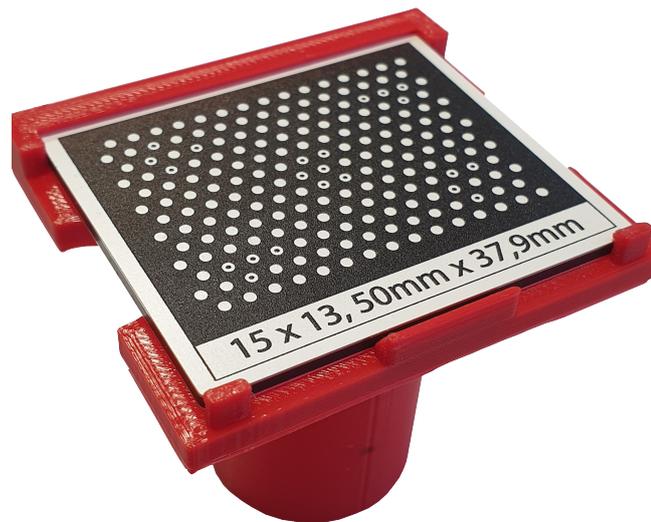


Abbildung 4.4: Konstruierter und gedruckter Kalibrierplattenhalter

Im Zuge dieser Kalibrierung mussten jedoch aufgrund der Vorgabe der Konfigurationssoftware von SensoPart mindestens zehn Bilder des Kalibrierkörpers aus möglichst unterschiedlichen Richtungen aufgenommen werden. Dadurch ist eine genauere Bestimmung der Parameter möglich. Für jedes Bild wurden alle Koordinaten und Winkel des TCPs relativ zur Roboterbasis händisch in der Software hinterlegt. Die Software zeigt dabei an, ob es sich um ein valides Bild handelt und alle Merkmale der Kalibrierplatte erkannt wurden oder nicht. Nach erfolgreicher Kalibrierung liefert die Software dann die internen und externen Parameter. Die internen enthalten dabei die Parameter der Kamera wie die Pixelgröße und den Hauptpunkt. Die externen Parameter die Koordinaten der Kamera im Bezug zur Roboterbasis. Jene wurden anschließend validiert über grobes Nachmessen der Position mittels eines Metermaßes. Die Position und die Ausrichtung der Kamera wird dafür benötigt, um den Kondensator vor der Kamera orthogonal zur Bildebene ausrichten zu können.

#### 4.2.2 Wahl der Detektoren zur Erkennung der Ausrichtung

Für die Erkennung der Merkmale bietet SensoPart unterschiedliche Detektoren. Beispielsweise werden Kontur- oder Mustervergleich-Detektoren angeboten. Die grundlegende Schwierigkeit der Erkennung der Kondensatoren liegt in der Abweichung der Kondensatoren untereinander. Der Kondensator besitzt um seine Aluminiumhülle einen Schrumpfschlauch, welcher die Polung kennzeichnet. Dieser variiert stark in seiner Form und hat keine konstante Lage im Verhältnis zu den Anschlüssen. Auch die Anschlüsse sind teilweise matt, teilweise spiegeln sie und resultieren dadurch in einem unterschiedlichen Grauwert in der Aufnahme.

Für das Anlernen eines Detektors wird ein Kondensator verwendet. Dabei bietet es sich an, einen repräsentativen Kondensator zu wählen, der im besten Fall einen Mittelwert der Menge darstellt, denn dann können mit den damit angelernten Detektoren möglichst viele Kondensatoren erkannt werden.

Zunächst wurde die Verdrehung der Anschlüsse des Kondensators, über einen Kontur-Detektor bestimmt. Dafür wurde ein Bild des zu erkennenden Objekts aufgenommen. Anschließend mussten zwei Bereiche definiert werden. Der erste grenzt den Bereich ein, in welchem das Merkmal später im Bild gesucht wird. Der zweite grenzt den Bereich ein, welcher für das Einlernen des Detektors verwendet wird. Im ersten Schritt wurde dafür der Bereich auf die Anschlussdrähte

begrenzt und die Konturen der Beinchen, wie in Abbildung 4.5a zu sehen, markiert. Somit wird die Kontur, welche der Detektor finden soll, eingelernt.

Das alleinige Einlernen der Beinchen als Erkennungsmerkmal führte jedoch dazu, dass der Fall, dass die Pins auch um 180 Grad verdreht erkannt werden können, nicht abgedeckt ist. Daher konnte keine zuverlässige Erkennung erzielt werden und es konnte vorkommen, dass Kondensatoren verpolt bestückt werden. Deshalb war notwendig, die Polung zusätzlich zu prüfen. Hierfür bietet sich die Markierung auf dem Schrumpfschlauch, wie in Abbildung 4.5b zu sehen ist, an. Auch hier wurde ein Kontur-Detektor verwendet.

Um nun das Problem ausschließen zu können, dass die Anschlüsse wieder um 180 Grad verdreht erkannt werden, bietet die Software für die Erkennung der Merkmale weitere Einschränkungen an. So kann beispielsweise die Schaltschwelle für den Übereinstimmungswert oder der Winkelbereich, in dem Merkmale erkannt werden sollen, eingegrenzt werden. Für die Verwendung der Winkelbereichseingrenzung wird die Markierung auf dem Schrumpfschlauch später vom Roboter vor der Kamera auf zwölf Uhr gedreht. Von dort aus wurde der Winkelbereich dann auf  $\pm 20$  Grad beschränkt, um somit nur noch Merkmale, die diesem beschränkten Winkelbereich entsprechen, zu erkennen. Somit ist die verdrehte Erkennung der Anschlüsse um 180 Grad nicht mehr möglich.

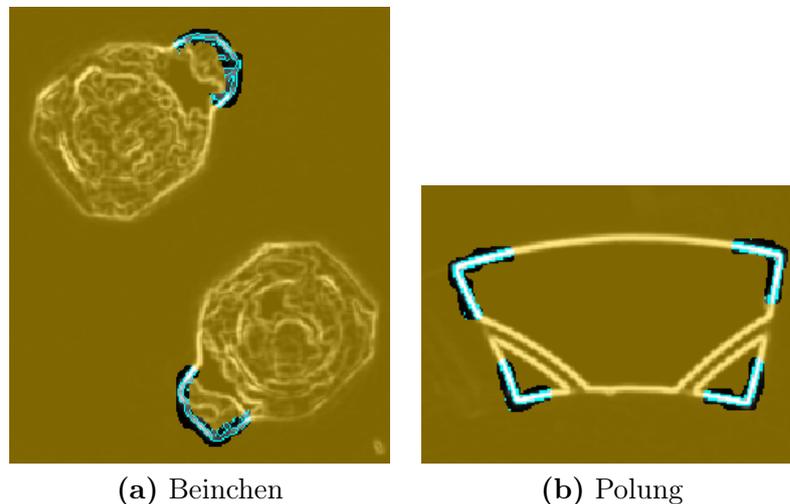


Abbildung 4.5: Einlernen der Kontur eines Detektors

Die Kombination dieser beiden Detektoren führt zum in Abbildung 4.6 gezeigten Ergebnis. In rot umrandet sind die Bereiche des eingelernten repräsentativen Kondensators dargestellt. Die grün umrahmten Bereiche zeigen die erkannten Merkmale für einen beliebigen Kondensator. Jeder Detektor liefert bei erfolgreicher Erkennung einige Informationen zurück. Wichtig ist davon der Score-Wert sowie die Verdrehung der Merkmale um die z-Achse. Der Score-Wert steht dabei für die Übereinstimmung des aktuellen erkannten Merkmals, zum eingelernten Merkmal.

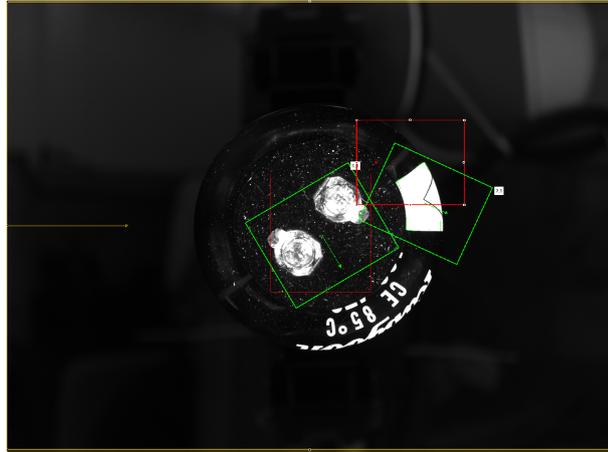


Abbildung 4.6: Detektorergebnis eines erkannten Kondensators

### 4.2.3 Wahl der Vorverarbeitungsfilter

Nachdem die Detektoren erstellt waren, wurden weitere Kondensatoren getestet. Dabei zeigte sich, dass es insbesondere durch unterschiedliche Belichtungsverhältnisse zu einer unzuverlässigen Erkennung kommen kann, da dann keine klaren Kanten mehr erkannt werden. Daher war der Gedanke, die Bilder vorzuverarbeiten, um somit bessere Ergebnisse zu erzielen. Hierfür bietet SensoPart unterschiedliche Filter, wie beispielsweise Mittelwert-, Gauß- oder Dilatationsfilter an. Diese Verarbeitung kostet Prozesszeit, allerdings lässt sich damit das Ergebnis speziell auf eine Anwendung anpassen und die Erkennungsleistung verbessern.

Besonders Verunreinigungen und Staub führten im Bild ohne Vorverarbeitung zu Rauschen, wie in Abbildung 4.7a ersichtlich. Das Bild enthält dabei viele kleine, weiße Pixel. Diese ließen sich, wie in Abbildung 4.7b erkennbar, durch einen Erosionsfilter eliminieren, da dieser glättet und kleinere helle Flächen beseitigt[21]. Mit einer fünf auf fünf großen Fläche wird hier ein guter Kompromiss aus Beseitigung und Erhalt der wichtigen Informationen erzielt.

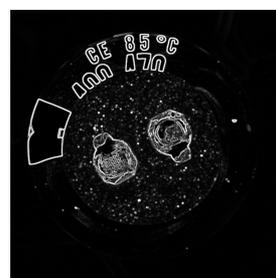
Da für das Einlernen des Konturdetektors eine Kontur benötigt wird, wurde nun noch ein Kantenfilter gewählt. Dafür wurde der Sobelfilter verwendet, welcher Grauwertunterschiede im Bild erkennt und somit Kanten bildet[39]. In Abbildung 4.7c ist das alleinige Ergebnis des Kantenfilters erkennbar. Für diesen Filter wurden ebenso gute Ergebnisse mit einem fünf auf fünf Feld erzielt. Die beiden Filter in Kombination ergaben das in Abbildung 4.7d gezeigte Ergebnis. Diese Wahl an Vorverarbeitungsfiltern führten zu einer zuverlässigen Repräsentation der Erkennungsmerkmale, weshalb sie so mit diesen Parametereinstellungen zur weiteren Anwendung kommen können.



(a) Ausgangsbild



(b) Erosion



(c) Sobel



(d) Kombiniert

Abbildung 4.7: Vorverarbeitungsfilter für die Kondensatorerkennung.

### 4.3 Entnahme der Kondensatoren

Da die Erkennung der Kondensatoren nun zuverlässig funktionierte, wurde im nächsten Schritt ein einheitlicher Entnahmeprozess aus dem Tray umgesetzt. Dabei war zu beachten, dass der Greifer im ersten Schritt beim Griff nicht mit einem benachbarten Kondensator kollidiert. Die Greiferöffnung musste daher auf ein Maß eingestellt werden, dass einerseits der zu greifende Kondensator sicher gegriffen wird und andererseits noch genug Abstand zu den benachbarten Kondensatoren besteht. Des Weiteren saßen die Kondensatoren im Gegentray nicht immer gleich hoch aufgrund der Variation in der Oberfläche des 3D-Drucks. Daher musste hierfür ein geregelter Prozess entwickelt werden, welcher bewirkt, dass die Kondensatoren immer gleich in den Greiferfingern sitzen. Es wurden die besten Ergebnisse erzielt, indem der Greifer über dem Kondensator öffnet, sich anschließend relativ in z dem Kondensator annähert und dann den Greifer schließt.

Da jedoch mit diesem Verfahren nicht sichergestellt werden kann, dass die Kondensatoren alle gleich gegriffen werden und in Kontakt mit dem Anschlag im Greiferfinger stehen, wurde der Kondensator anschließend noch mit geschlossenem Greifer in Richtung des Trays bewegt. Dabei bewegt sich der Greifer mit dem Kondensator, bis eine Kraft von 30 N erreicht wird. Somit ist sichergestellt, dass der gegriffene Kondensator am Anschlag im Greiferfinger anliegt.

### 4.4 Bestückung der Leiterplatte mit Kondensatoren

Nach der erfolgreichen Entnahme wird der Kondensator vor der Kamera positioniert. Diese prüft anschließend mittels dem `Template Move Linear Detection Relative` die Orientierung des Kondensators. Es liefert nach der Aufnahme die Winkeldifferenz der Polmarkierung im Schrumpfschlauch bis zwölf Uhr. Um diese Winkeldifferenz rotiert anschließend der Roboter. Hierbei sind Werte im Bereich von  $\pm 180$  Grad möglich. Nach der ersten Rotation nimmt ein weiteres `Move Linear Detection Relative`-Template ein Bild auf, um die Verbindungslinie der Anschlüsse auf die y-Achse der Kamera auszurichten. Dabei wird der Winkel der Verdrehung der Anschlüsse zum Schrumpfschlauch ermittelt und um diesen gedreht. Dieser Winkel liegt meist im Bereich von unter zwei Grad. Da das `Template Move to Point` Punkte nur absolut anfährt und somit die vorherige Rotation verloren geht, werden zwei `Point Transform` Templates benötigt, um die Rotation um die z-Achse beizubehalten. Diese addieren den zuvor ermittelten Winkel zur absoluten Position. Dabei ist darauf zu achten, dass die ermittelten Winkel in unterschiedliche Variablen abgespeichert werden. Anschließend kann die Bestückungsposition auf der Platine angefahren werden. Der Roboter verfährt nach Erreichen dieser relativ in z-Richtung der Platine und trifft mit den Anschlussdrähten der Elkos die Bohrungen der Platine. Danach wird der Greifer geöffnet und relativ in z von der Platine weg gefahren. Dabei ist wichtig, dass der Greifer nur geringfügig öffnet, sodass kein Kontakt mehr zum Kondensator besteht, benachbarte Kondensatoren aber auch nicht übermäßig gekippt werden. Die Öffnung des Greifers darf auch nicht zu schnell sein, da dies zu einem ungewollten Impuls bei umliegenden Kondensatoren führen kann.

### 4.5 Programmschleifen zur Mehrfachentnahme und -bestückung

Um eine kontinuierliche Bestückung durchführen zu können, wird eine Endlosschleife benötigt. Dabei handelt es sich um das `Template Loop`, welches eine `For`-Schleife eingebettet hat, mit einer Kondition, die nie erreicht wird. So durchläuft das Programm unendlich Iterationen, sofern es zu keinem Zwischenfall kommt. Um nun dauerhaft aus dem Tray entnehmen und die Platine bestücken zu können, müssen unterschiedliche Positionen für die Entnahme und die Bestückung definiert werden. Hier kommt das bereits beschriebene Werkzeug `CAD-2-Path` zum Einsatz. Für die extrahierten Punkte bietet die RPS zwei Templates, `Grid` und `List`, um die Punkte zu speichern. Mit dem `Grid` können rechteckige Punktmuster über vier Eckpunkte und die Anzahl

der Punkte zwischen zwei Eckpunkten in x- und y-Richtung definiert werden. Da es sich bei der Platine um kein rechteckiges Muster handelt, wurden die Punkte in eine Liste gespeichert. Für das Tray hätte das `Grid` verwendet werden können, allerdings gibt dieser Baustein eine Reihenfolge vor, wie durch den Punktspeicher iteriert wird. Um die Freiheit der Reihenfolge der Entnahme zu behalten, wurde auch hierfür der Baustein `List` verwendet. Außerdem kann über diese Anpassung der Liste die unterschiedlichen Bestückungspositionen den Varianten angepasst werden. Im Anschluss wird durch diese iteriert, um bei jedem Durchlauf eine neue Position für die Entnahme sowie die Bestückung anzufahren. Infolge der begrenzten Größe der Liste, muss der Fall, dass ein Index größer ist als die Liste, abgefangen werden. Hierfür gibt es eine If-Abfrage, welche prüft, ob die zu bestückende Kondensatoranzahl gleich dem Iteratorindex für die Platinenliste entspricht. Äquivalent dazu gibt es für den Trayiterator eine Prüfung, der die Variablen `TrayKondAnzahl` mit dem Iteratorindex für die Trayliste vergleicht. Die Variablen hierfür werden zu Beginn des Programms definiert. Im false-Fall für beide Abfragen läuft die Bestückung einfach weiter. Liefert eine der beiden Abfragen einen true-Zustand so wird ein Bedieneringriff benötigt.

Beim Dauerschleifenbetrieb ist insbesondere der Übergang vom Endpunkt zum Startpunkt der Schleife interessant. Um den Durchlauf des Programms zuverlässig zu gestalten, waren daher Stützpunkte, die den Weg zurück zum Tray definierten, notwendig.

Für die Bestückung der unterschiedlichen Varianten der Leiterplatte wurde für jede Variante ein separates Programm mit individueller Bestückungsliste angelegt. Dieses kann am Teach Pendant zu Beginn der Bestückung entsprechend ausgewählt werden. Für die Erstellung der Programme wurde eine Übersicht der unterschiedlichen Positionen erstellt, welche im Anhang zu finden ist.

## 4.6 Schnittstellen zwischen Roboter und Bediener

Bei der Anlage ist die Interaktion eines Mitarbeiters erforderlich. Die Anlage muss vom Bediener befüllt und geleert werden. Daher werden Schnittstellen zwischen der Anlage und dem Bediener benötigt, welche diesem signalisieren, dass er am Zuge ist. Dies geschieht über Dialogfelder, welche am Teach Pendant angezeigt werden. Dabei unterbricht der Roboter seine Arbeit und wartet auf die Bestätigung durch Eingabe in das Dialogfeld. Dies wird benötigt bei den Fällen, wenn alle Kondensatoren aus dem Gegentray entnommen wurden oder wenn eine Platine vollständig bestückt ist. Dabei gibt das Dialogfeld Auskunft, ob das Tray leer ist, „Tray tauschen“ oder die Platine vollständig bestückt wurde „Platine tauschen“. Über die Bestätigung des Dialogfeldes bestätigt der Bediener, dass das Tray durch ein volles oder die Platine durch eine unbestückte ersetzt wurde.

## 4.7 Betrachtung von Sonderfällen

Da aufgrund von Varianzen im Material (Platine und Kondensatoren) sowie in den Komponenten (Werkstückträger und Gegentray) nicht immer alles reibungslos abläuft, sind ein paar Sonderfälle zu betrachten. Diese Sonderfälle werden dabei über das `Template Error Handler` berücksichtigt. Dabei handelt es sich um eine If-Abfrage, die den Error-state des vorherigen Templates auswertet. Dieser kann die Zustände false und true einnehmen. Liegt kein Fehler im Durchlauf des Templates vor, so ist von einem Error-state gleich false auszugehen.

- **Keine Erkennung des Kondensators**

Der Fall, dass die Kamera die zuvor angelernten Merkmale wie die Polung oder die Anschlüsse nicht erkennt, führt dazu, dass der Kondensator als Ausschuss gewertet wird. Dabei werden die Error-states über ein `Or-Gatter` und einen `Error Handler` geprüft. Tritt der Fall ein, so wird die Ausschussposition angefahren und der Kondensator ausgeschleust. Der Trayindex wird hierbei um eins erhöht, der der Platine hingegen nicht.

- **Fehlender Kondensator im Tray bei Entnahme**

Fehlt ein Kondensator im Tray, wird dieser Fall ebenso über die fehlgeschlagene Erkennung des Kondensators abgedeckt.

Diese beiden Fallbetrachtungen resultiert zu dem in Abbildung 4.8 zu sehenden Programmablaufplan.

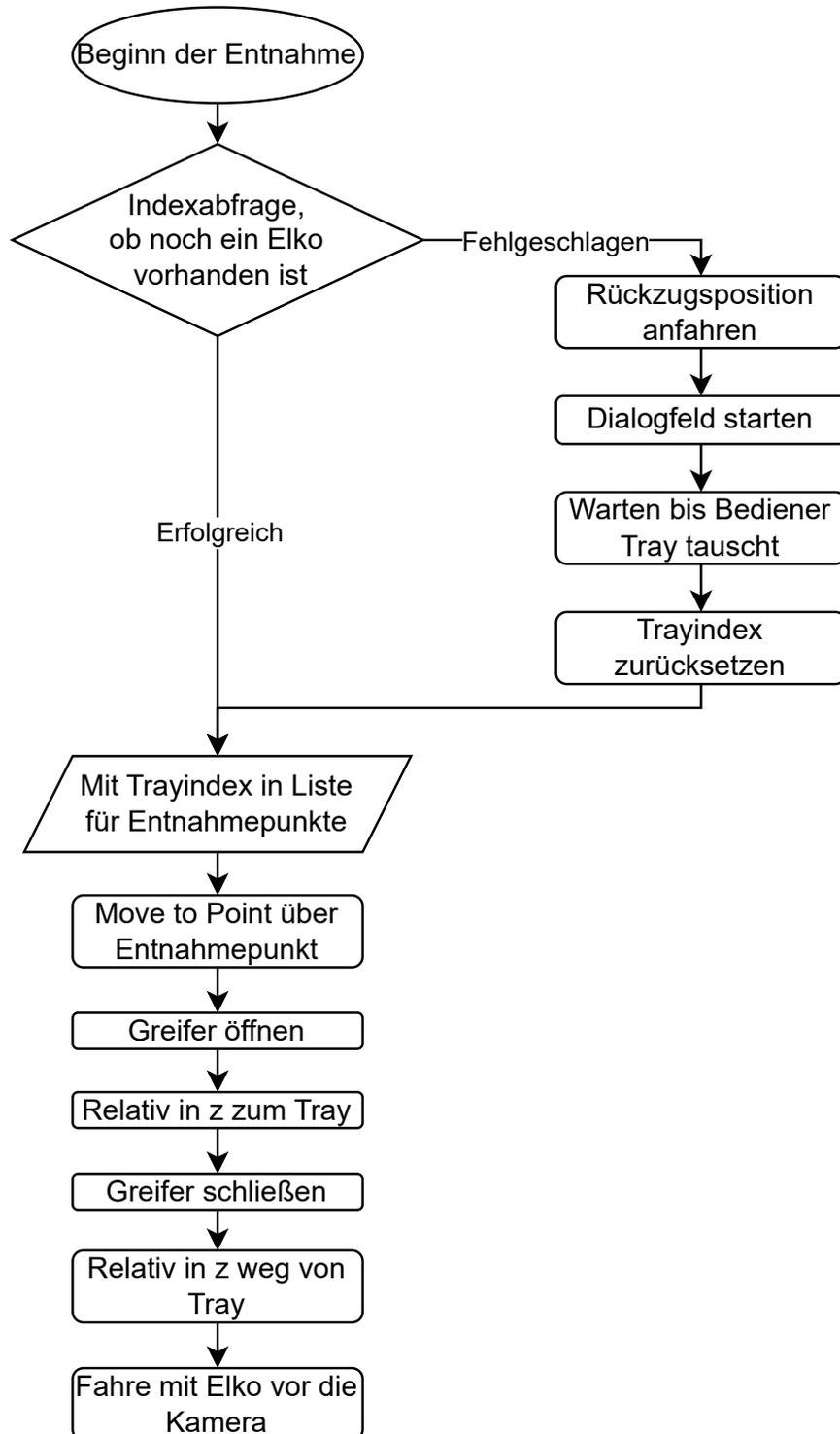


Abbildung 4.8: Programmablaufplan der Kondensatorentnahme

- **Genauigkeit bei der Bestückung**

Aufgrund von Ungenauigkeiten in der Kette von Kondensatoranschlüssen bis hin zum Flansch des Roboters sowie die Position der Platine kann es vorkommen, dass der Kondensator mit seinen Drähten nicht mit den Bohrungen in dem Leitungsträger fluchtet. Dieser Fall wird über einen weiteren **Error Handler** abgefangen, welcher an die vorherige kraftgesteuerte Fahrt in z gebunden ist. Dabei ist zu unterscheiden, ob die Anschlüsse auf die Platine treffen, was zu einem Erreichen der Kraftgrenze führt oder ob diese Kraftschwelle nach einem gewissen verfahrenen Weg in z nicht erreicht wird. Im Idealfall wird diese Kraftgrenze nicht erreicht, da sich dann die Anschlüsse bereits in den Bohrungen befinden. Nun wird also nur noch über das **Template Insert Contact** fertig gefügt. Dabei wird in z verfahren und Momente in x und y ausgeglichen, falls sich die Anschlüsse nicht exakt mittig zur Bohrung befinden. Das Ausgleichen der Momente in x und y ist in der Abbildung 4.9 dargestellt, welche einen Ausschnitt der Kraftaufzeichnung zeigt. Diese Bewegung führt der Roboter aus bis diesmal eine Kraft von 15 N erreicht wird. Dann gilt der Kondensator als bestückt.

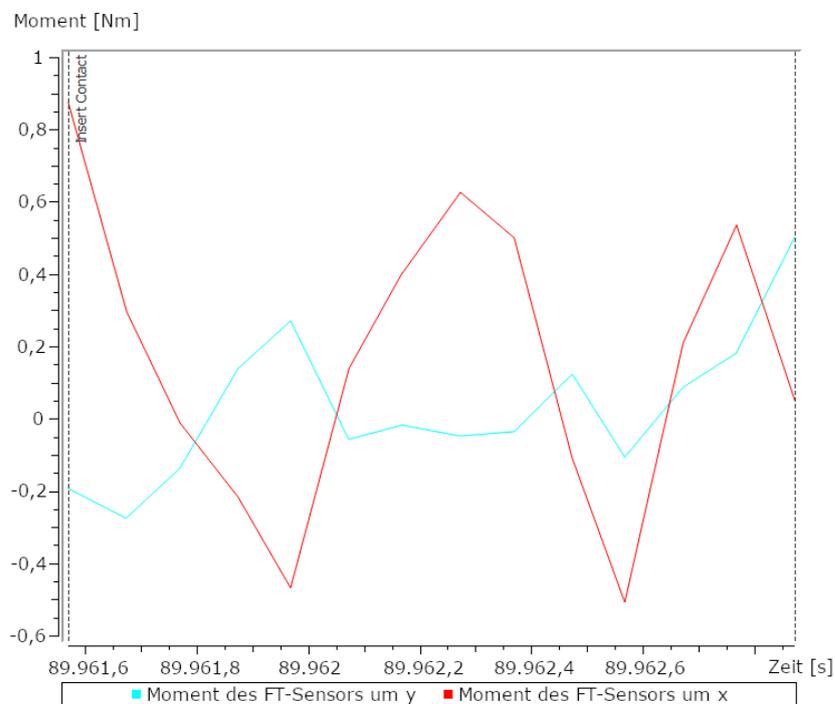


Abbildung 4.9: Ausschnitt der Momentenaufzeichnung während der Bestückung. Speziell für das Template: **Insert Contact**

Wird eine Kraft von 1 N beim Zufahren auf die Platine erreicht, bedeutet das, dass der Anschluss auf der Leiterplatte aufsteht. In diesem Fall wird mit einem Suchalgorithmus, der **Spiralsearch** begonnen, um die Bohrung zu finden. Hierbei übt der Roboter eine konstante Kraft in die z-Richtung aus und fährt spiralförmig um den Auftreffpunkt, bis eine gewisse Einfalltiefe erreicht wurde. Anschließend wird auch hier über ein **Insert Contact** gefügt und der Elektrolytkondensator gilt als bestückt. Dies führt zu dem in Abbildung 4.10 zu sehenden Programmablaufplan

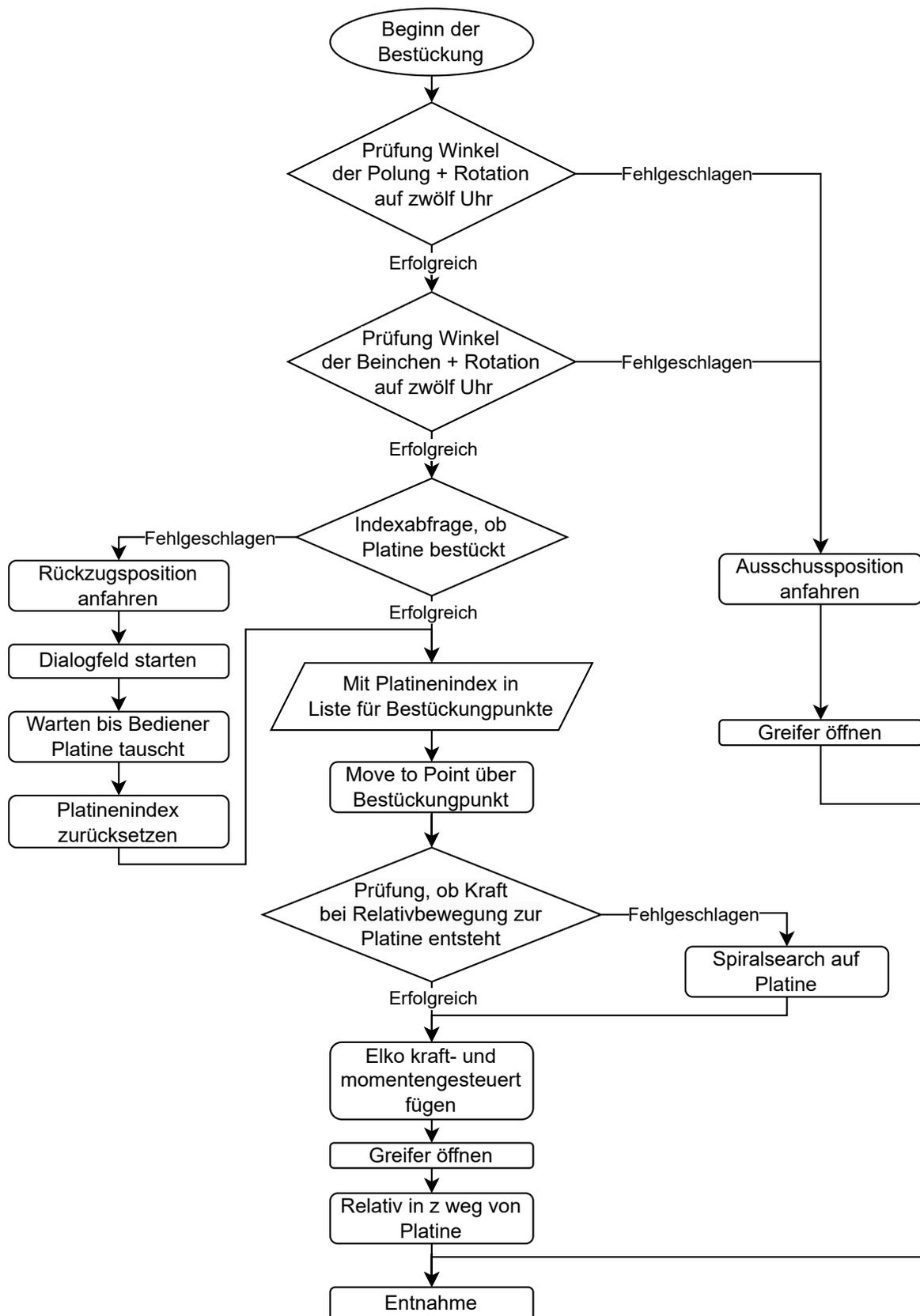


Abbildung 4.10: Programmablaufplan der Kondensatorbestückung

## 5 Testphase und Optimierung

Nach der Programmierung wurden erste Testläufe durchgeführt und stetige Anpassungen am Programm vorgenommen. Der Umfang an Testmaterial waren dabei drei Leiterplatten sowie 100 Kondensatoren im Anlieferungszustand.

### 5.1 Beschreibung der Versuchsaufbauten

Um die auftretenden Probleme eingrenzen zu können und Zeit zu sparen, wurden die Versuchsaufbauten zunächst einfach gehalten und nach Erfolg schrittweise erweitert.

#### 5.1.1 Erkennung der Kondensatororientierung

Nach der Einrichtung der Kamera wurde nun mit ersten Tests für die Kondensatorerkennung begonnen. Diese verliefen im Gegensatz zu den vorherigen Einrichtarbeiten unter den späteren angestrebten Bedingungen der Anlage. Dafür wurde dem Roboter ein Kondensator in den Greifer gelegt. Nach erfolgter Erkennung der Winkel fuhr er anschließend eine Bestückungsposition über der Platine an. Somit konnte überprüft werden, ob die Anschlüsse mit den Bohrungen fluchteten und der Winkel somit korrekt erkannt wurde. Der Kondensator wurde dabei noch nicht bestückt. Auch fehlerhafte Kondensatoren wurden getestet. Ziel war es, sicherzustellen, dass diese als Ausschuss gewertet werden.

#### 5.1.2 Iteration durch die Entnahmeliste

Im Anschluss wurde die Entnahmeschleife aus dem Gegentray getestet. Hierbei galt es zu prüfen, ob der Index für die Trayliste für alle Fälle korrekt um eins addiert wird. Hierfür wurden in die Trayliste zunächst beliebige Positionen aus dem Tray eingefügt, ohne Rücksicht auf eine bestimmte Reihenfolge. Es wurde beispielsweise getestet, ob alle Eckpunkte des Gegentrays erreichbar sind. Der Roboter fuhr nach erfolgter Entnahme über die Platine, bestückte den Kondensator allerdings nicht. Stattdessen ließ er den Kondensator fallen, um wieder einen leeren Greifer für den nächsten Kondensator bereitstellen zu können.

#### 5.1.3 Griff aus Tray und Bestückung in Leiterplatte

Als Nächstes wurde der Versuchsaufbau um eine vollwertige Bestückung erweitert. Dabei war insbesondere auf die Sonderfallbetrachtung zu achten, das heißt, dass der Kondensator bei direktem Treffer in die Bohrungen korrekt eingeführt wird und ob die Bestückung über die Spiralsuche funktioniert. Des Weiteren war die gesamte Trajektorie inklusive des Rückweges zum Startpunkt der Dauerschleife von Bedeutung, da es hier schnell zu Problemen in Form von Singularitäten oder Achsbeschränkungen kommen kann.

#### 5.1.4 Reset der Parameter bei Mehrfachbestückung

Um nicht warten zu müssen, bis eine Platine mit 46 Kondensatoren bestückt ist oder das mit 100 Kondensatoren befüllte Gegentray entnommen wird, wurde die Platinen- sowie Trayliste auf jeweils vier willkürlich gewählte Positionen beschränkt. Somit konnte auch der Übergang der Trajektorie zwischen End- und Startposition der Dauerschleife geprüft werden. Außerdem konnte die Schnittstellen über das Teach Pendant mittels des Dialogfeldes getestet werden. Dabei war

wichtig, ob der Roboter nach Bestätigung des Dialogfelds wieder mit der ersten Position in der Liste beginnt und der Indexreset somit funktioniert. Außerdem wurde getestet, ob ein erneutes Einlegen des gedruckten Gegentrays hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Positionen gelingen würde.

### 5.1.5 Vollständiger Programmablauf

In Folge dieser erfolgreichen Tests wurde sowohl die Trayliste als auch die Platinenliste um alle möglichen Punkte erweitert, um somit einen ersten vollständigen Bestückungstestaufbau zu testen. Dabei erzielte die Anlage eine Bestückungszeit von 29 Minuten für eine Platine.

## 5.2 Optimierung für Betrieb in der Produktion

Nach der ersten vollständigen Bestückung eines Schaltungsträgers wurde das Programm in Hinblick auf die Taktzeit und den Komfort optimiert. Die eingeleiteten Verbesserungen werden im folgenden dabei in Anpassungen zur Optimierung der Bestückungszeit, der Zuverlässigkeit und der Bedienbarkeit unterteilt.

### 5.2.1 Zeitanpassungen

Um die Zeit für eine Bestückung zu verkürzen, lag es zunächst nahe, die Geschwindigkeit der Trajektorien zu erhöhen. Die allgemeine Geschwindigkeit des Ablaufs wurde dafür im TP auf 100 Prozent gesetzt. Ebenso die Geschwindigkeiten der einzelnen Trajektorien wurden erhöht. Dabei war die LAR ein hilfreiches Werkzeug, da sie die Ablaufzeit für jede einzelne Trajektorie anzeigt. So konnten Trajektorien mit hohen Dauern schnell herausgefiltert werden. Diese wurden anschließend im Dynamic Property Wizard der RPS angepasst, welcher in Abbildung 5.1 gezeigt wird. Kartesische Bewegung werden dabei in mm pro s angegeben, während Gelenkbewegungen in % angegeben werden. Des Weiteren waren im Programm noch `Sleep` Templates eingebaut, welche einer Pause gleichen. Dabei handelt es sich um Rückstände im Programm von früheren Testabläufen, welche nun entfernt werden konnten. Der Testlauf nach diesen Anpassungen ergab eine Laufzeit von 22 Minuten.

Da dies weiterhin weit entfernt von den angesetzten zehn Minuten war, wurden weitere Optimierungen vorgenommen. So wurden die Templates, welche eine relative z Bewegung ausführen so angepasst, dass die Reserve in der Höhe auf ein Minimum reduziert wurde. Zusätzlich dazu wurden die Bewegungen überschleift, was zu einer konstanteren Bahn und damit höheren Geschwindigkeit führt und in einer geringeren Dauer resultiert. Dafür bietet die RPS zwei Varianten. Punkte können über `Circular (Distance)` und `Circular Constant Velocity` überschleift werden. Der Unterschied liegt darin, dass bei letzterer Option versucht wird, die Geschwindigkeit im Verlauf der Bahn konstant zu halten[40]. Da ein Überschleifen des letzten Punktes einer Trajektorie im Normalfall nicht benötigt wird, ist dies in der RPS nur über einen Workaround umsetzbar. Hierfür wird nach der Dauerschleife ein Template eingefügt, welches nie erreicht wird, da das Programm nicht aus der Schleife laufen kann. Im Anschluss kann für den letzten Schleifenpunkt eine Überschleifoption eingestellt werden. Um weitere Zeiteinsparungen zu erzielen, wurden auch Zwischenpunkte der Bahn neu angelernt, sodass sich eine kürzere Trajektorie ergab.

Dynamic Properties

Template	Group	Velocity	Acceleration	Controller	Code Injection
MTS: State Meldung	7	29.93 %	7.50 %	ControllerPosition	
▼ Dauerschleife					
▼ Entnahme					
▼ Schleife					
▼ If Tray leer?: If-branch					
MTS: Rückzug	7	80.00 %	3.02 %	ControllerPosition	
MtP: Entnahme	7	60.00 %	7.50 %	ControllerPosition	
Greifer öffnen	↶	100.00 %		ControllerPosition	
Fahren zum Kondensator	7	80.0 mm/s	1200.0 mm/s <sup>2</sup>	ControllerPositionCartesian	
Greifer schließen	↶	100.00 %		ControllerPosition	
Festigen des Griffs	7	5.0 mm/s	50.0 mm/s <sup>2</sup>	ControllerPositionCartesian	
▼ Error Handler: If-branch					
Fahren weg von Entnahme	7	250.0 mm/s	1200.0 mm/s <sup>2</sup>	ControllerPositionCartesian	
Fahren weg von Entnahme	7	250.0 mm/s	1200.0 mm/s <sup>2</sup>	ControllerPositionCartesian	
Vor die Kamera	7	250.0 mm/s	1200.0 mm/s <sup>2</sup>	ControllerPositionCartesian	

Selected Controllers: 0

Abbildung 5.1: Überblick über den Dynamic Property Wizard

Trotz der Geschwindigkeitsanpassungen wurde die gewünschte Zeit für die Bestückung einer Platine noch nicht erreicht. Daher lag es nahe, die komplizierte Trajektorie, welche der Roboter bisher fuhr, zu vereinfachen. Hierfür musste die Anordnung der Kamera in der Zelle angepasst werden. Bislang war sie wie auf Bild 5.2 erkennbar im hinteren rechten Eck der Zelle montiert, was zu einer inhomogenen Trajektorie führte. Bei Betrachtung der Zeiten der Einzelbahnen fiel schnell auf, dass die Bahnen in gewissen Bereichen einen Großteil der Gesamtbestückungszeit ausmachen. Dafür wurde das in Abbildung 5.3 sichtbare Diagramm erstellt, welche die fünf Bahnen mit der höchsten Dauer aufführt. Die Dauer der Einzeltemplates wurde dabei in folgende Bahnen zusammengefasst: Festigen des Griffs, Tray zur Kamera, Rotation vor Kamera, Kamera zur Platine, Platine zum Tray. Anschließend wurde für diese Teiltrajektorien der Mittelwert über 45 vergleichbare Iterationen gebildet. Bereits die Dauer der Trajektorie von der Kamera zur Platine und von der Platine zum Tray, betragen im Durchschnitt zusammen etwa 16,7 Sekunden. Hochgerechnet auf 46 Kondensatoren ohne Ausschuss ergibt dies bereits eine Zeit von 12,8 Minuten, wodurch allein dadurch der gewünschte Richtwert nicht erreichbar wäre.

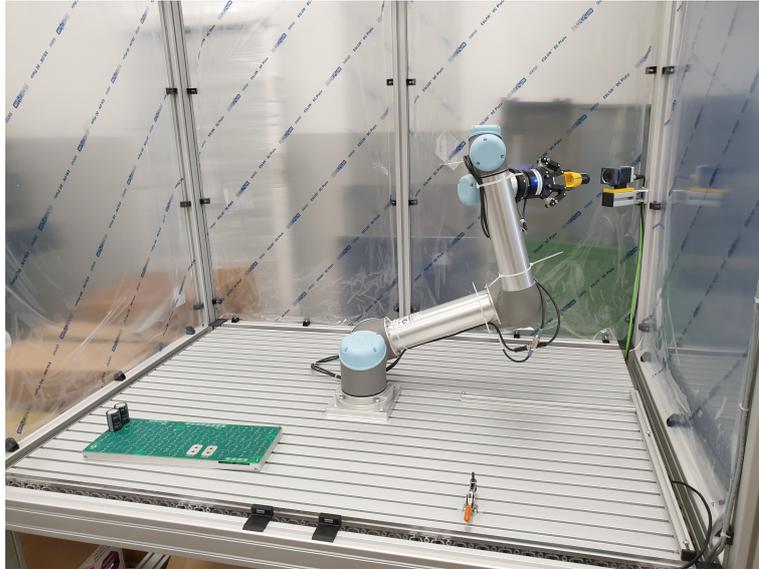


Abbildung 5.2: Zwischenstand der Anordnung der Komponenten in der Anlage

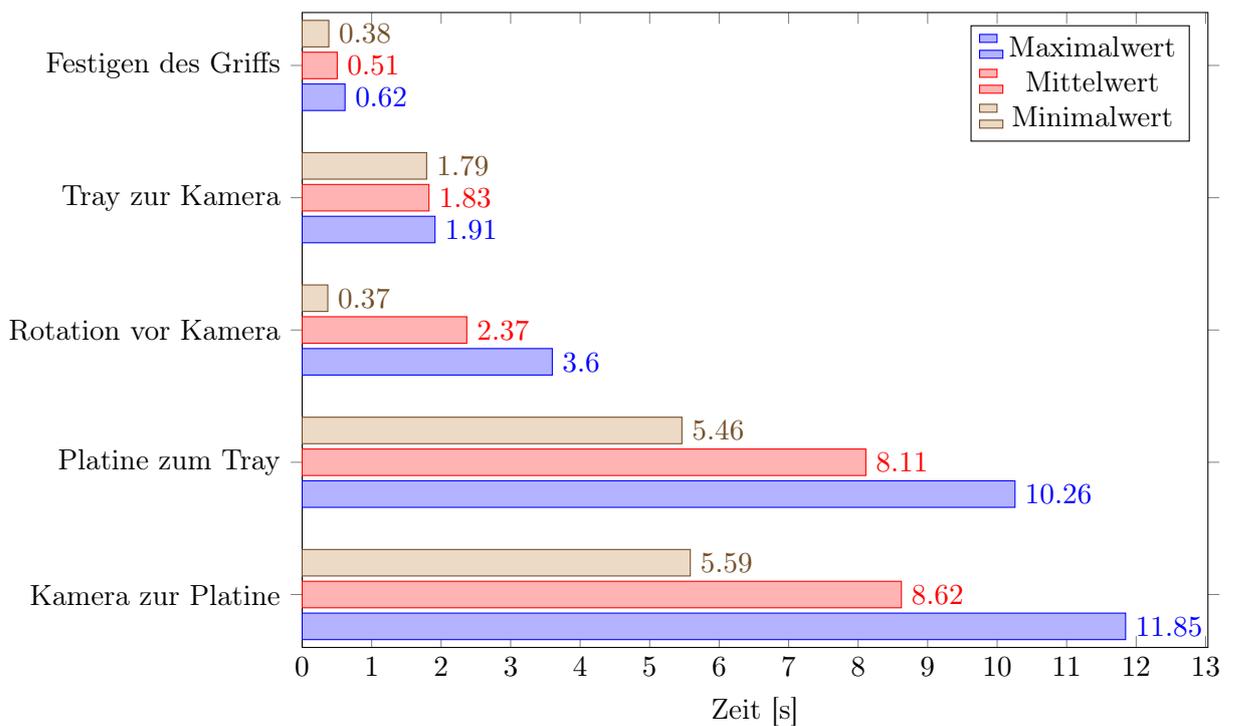


Abbildung 5.3: Zeiterfassung der Teiltrajektorien mit den höchsten Ablaufdauern

Deshalb mussten die Wege zwischen den Hauptkomponenten wie dem Gegentray und der Platine kurz gehalten werden. Hierfür sollte ein Ort für die Kamera gewählt werden, welcher sich idealerweise auf direkter Verbindungslinie zwischen Tray und Leiterplatte befindet. Daher wurde die Kamera mittig vor dem Roboter platziert. So kann die Orientierung des Kondensators auf direktem Wege vom Tray zur Platine kontrolliert und korrigiert werden. Außerdem wurde dabei ein anderer Blickwinkel der Kamera gewählt, da so ein Schwenken des Handgelenks vermieden wird. Diese Ausrichtung hat den Vorteil, dass die Bahn deutlich homogener ist. Das Verstauben der Kamera, da das Objektiv nun nach oben zeigt, stellt einen Nachteil dar. Dieser kann durch entsprechende Arbeitsanweisung, dass die Kamera regelmäßig gereinigt werden muss, allerdings

akzeptiert werden. Da sich die Kamera nun deutlich näher an den Komponenten befindet, wurde diese ebenso in die Szene eingefügt, um diese bei der Bahnplanung mit einzubeziehen. Aufgrund der neuen Montage, welche sich orthogonal zur Montageebene der Basis des Roboters befindet, kann davon ausgegangen werden, dass die Bildebene parallel zur Montageplatte liegt. Daher war für die neue Kontrollposition über der Kamera keine erneute Kalibrierung notwendig.

Bisher wurde nach der Bestückung eines Kondensators linear zurück Richtung Kamera verfahren und anschließend erneut zum Tray. In seltenen Fällen kam es vor, dass der Roboter bei der Erkennung des Kondensators positiv um die letzte Gelenkachse zur Platine allerdings nicht wieder negativ zurückdrehte, sondern weiterhin positiv und somit den eigentlichen korrekten Winkel jedoch  $+360$  Grad anfuhr. Dabei lief der Roboter in den Fehler der Gelenkgrenzen und das Programm stoppte. Dieses Problem konnte nach einigen Tests, insbesondere dann reproduziert werden, wenn ein Kondensator bei der Erkennung nahe 180 Grad Differenz zur zwölf Uhr Position aufwies. Der Lösungsansatz hierfür war, eine Gelenkwinkelstellung über das **Template Move to State** in die Trajektorie einzufügen, welche klar definiert, welche Winkel die Gelenke haben dürfen. Somit war ein Winkel eines Gelenks, welcher um 360 Grad versetzt ist, nicht möglich. Dadurch verfährt der Roboter nun im Gelenkraum, statt wie vorher kartesisch, was zu ausgeprägteren Bahnen führt, wie in Abbildung 5.4 sichtbar. Dies führte zu Kollisionen mit den Türen der Umhausung. Daher musste eine Kombination aus unterschiedlichen Bewegungstemplates gewählt werden, um die Trajektorie fern von der Umhausung allerdings auch absolut definiert zu gestalten. Dabei wurden unterschiedliche Varianten über die Bausteine **Move Linear**, **Move to Point**, **Move to Region** und **Move to State** umgesetzt. Insbesondere die Kombinationen aus kartesischen und Gelenkbewegungen führte beim Überschleifen zu Problemen, da es dort zu ungewollten Rucken kam. Nach Rücksprache mit ArtiMinds liegt das Problem am UR. Da das eine extreme Belastung für die Getriebe des Roboters bedeutet, musste eine dauerhafte Lösung dafür gefunden werden. Durch weiteres Optimieren konnte eine homogene und kontinuierliche Bahn über die Verknüpfung von einem **Move to State** und zwei **Move to Point** Templates erzielt werden.

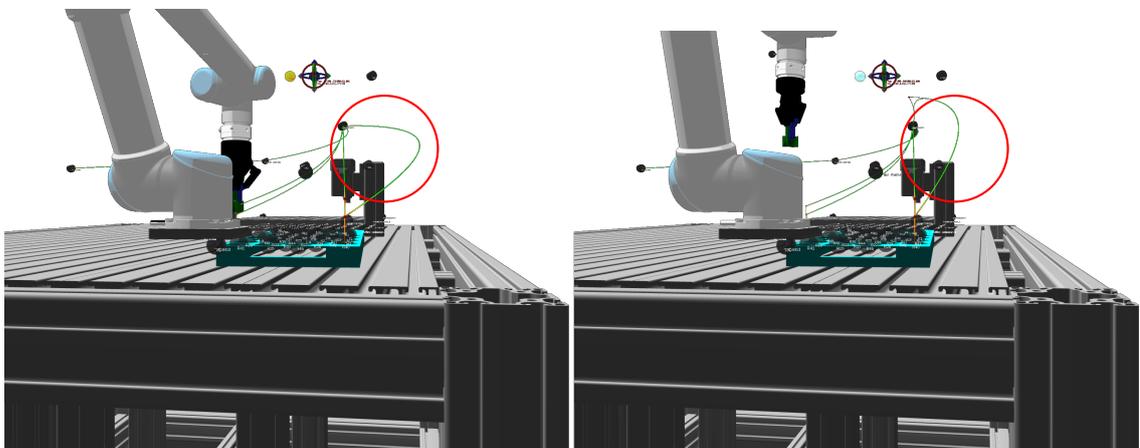


Abbildung 5.4: Vergleich der Trajektorie im Bereich der Türen

Der Fall, dass ein Kondensator im Gegentray fehlt, wurde bislang über die Erkennung als Ausschuss abgedeckt. Da eine bewusste Leerfahrt zur Kamera und anschließend zur Ausschussposition allerdings viel Zeit kostet, wurde sich eine Lösung überlegt, welche Zeit einspart. Denn der Fall, dass ein Kondensator fehlt, wird insbesondere dann wichtig, wenn der Roboter am Ende einer Schicht ein Tray zu beispielsweise 75 Prozent entnommen hat. Rücksprache mit einem Kollegen aus der Fertigungsplanung ergab, dass eine Anforderung der Anlage ist, dass sie zu Schichtbeginn nicht vom Bediener befüllt werden muss, wenn das Tray nicht komplett leer ist. Daher wurde die Erkennung, ob ein Kondensator vorhanden ist, über das Nachdrück-Template geprüft. Hierbei kontrolliert der Roboter beim Festigen des Kondensators im Greiferanschlag, ob eine Kraft von

20 N aufgebaut wird. Ist das nicht der Fall, so wird angenommen, dass kein Kondensator im Trayplatz steckt. In diesem Fall wird der Index hochgezählt und direkt die nächste Position im Tray angefahren. Dies macht der Roboter so lange, bis ein Kondensator gefunden wurde. Dies führt zu einem erweiterten Programmablaufplan, welcher in Abbildung 5.5 dargestellt ist.

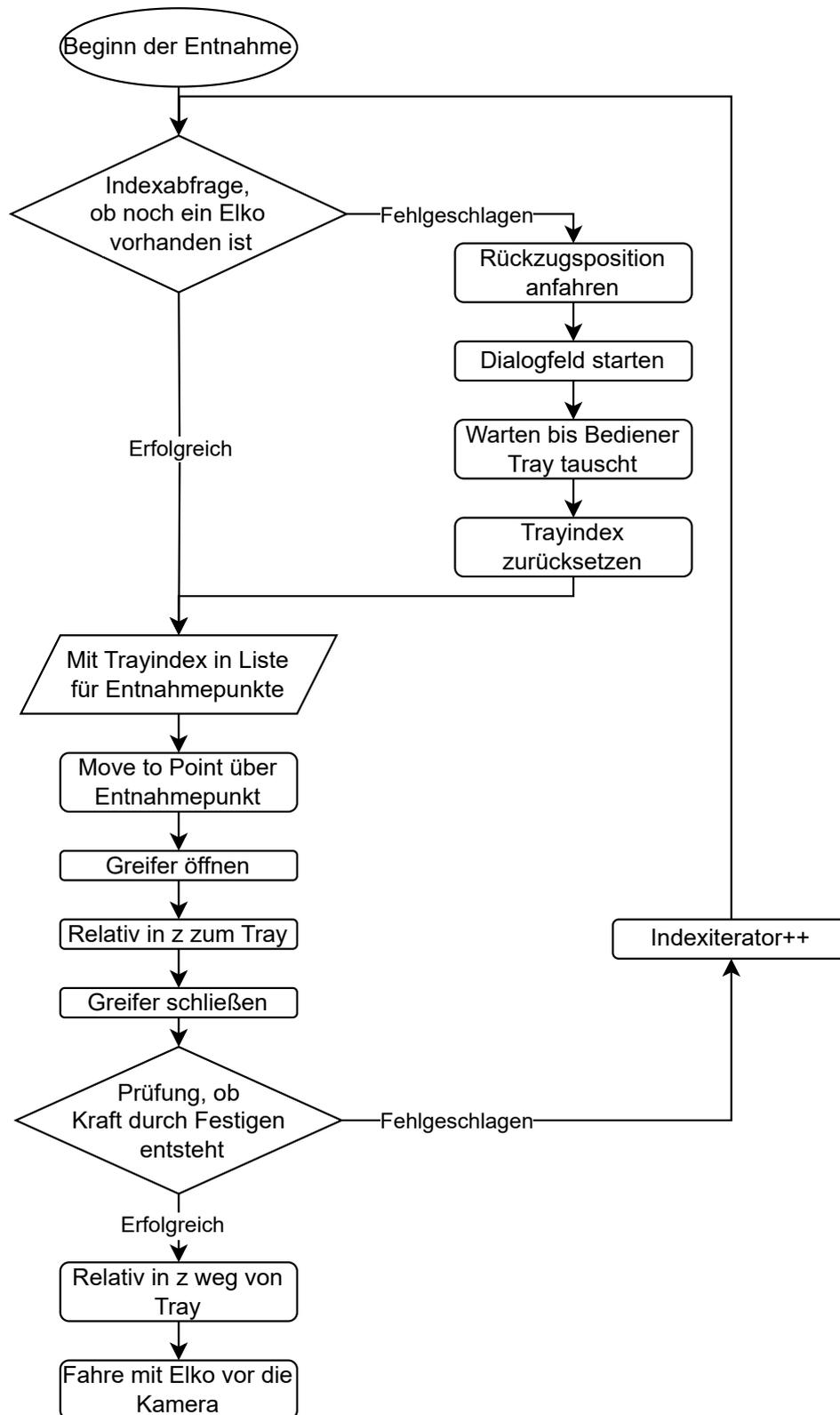


Abbildung 5.5: Optimierter Programmablaufplan der Kondensatorentnahme

### 5.2.2 Zuverlässigkeitsanpassungen

Damit eine hohe Zuverlässigkeit der Anlage erreicht wird, waren weitere Anpassungen erforderlich. Beispielsweise fiel nach einer unbeabsichtigten Kollision des Greifers auf, dass die Bestückung im Anschluss deutlich schlechtere Positionierungsergebnisse lieferte. Das Problem konnte dabei schnell auf die Anbindung der Greiferfinger zurückgeführt werden. Der Bund der Schrauben für die Befestigung der Greiferfinger hatte Spiel in der Zapfensenkung des Greifers. Somit konnte sich bei der Kollision der gesamte Finger verschieben, weshalb der vermessene TCP nicht mehr stimmte. Dieses Problem wurde gelöst, indem die Greiferfinger nicht mehr nur noch kraftschlüssig über die Gewinde gehalten wurden, sondern nun auch formschlüssig über hinzugefügte Wände, welche den Greiferfinger zusätzlich stützten. Die modifizierte Version des Fingers ist in Abbildung 5.6 zu sehen. Infolgedessen war ein erneutes Einmessen des TCPs sowie der Komponenten notwendig.

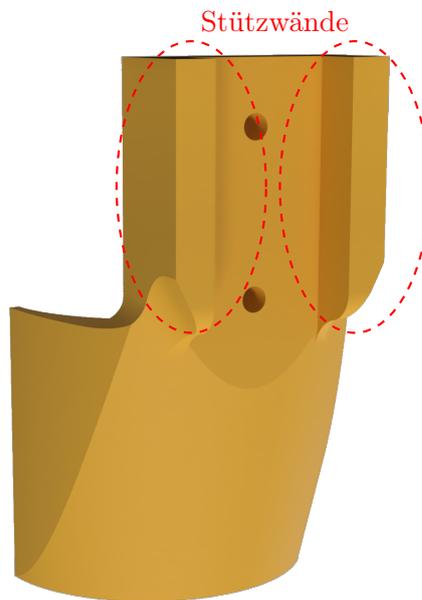


Abbildung 5.6: Überarbeitetes Greiferfingerdesign Version 10

Im Anschluss zu dieser Anpassung bemerkte ich, dass der Greifer nach der erfolgten Bestückung nicht genug öffnete und somit vereinzelt Kondensatoren wieder aus den Bohrungen des Leitungsträgers zog. Ein größerer Öffnungswinkel des Greifers war dabei keine Option, da er bereits beim aktuellen Öffnungswinkel benachbarte Kondensatoren touchierte. Daher wurde die schiefe Ebene der Greiferfinger auf zwei Grad reduziert. Dies löste das Problem zuverlässig.

Die Reibung der Greiferfinger an einem benachbarten Kondensator reichte in seltenen Fällen schon aus, dass der Roboter bei der Kontaktfahrt zur Platine dies als Auftreffen auf die Platine aufgrund der erreichten Kraftgrenze wertete und mit der Spiralsuche begann. Um dieses Problem zu umgehen, wurde daher die Kraftschwelle in z-Richtung beim relativen Verfahren zur Platine auf drei N erhöht. Vereinzelt kam es vor, dass durch den Bestückungsprozess benachbarte Kondensatoren umgestoßen wurden und diese anschließend leicht schräg auf der Platine standen. Das war grundsätzlich kein großes Problem, da die Kondensatoren meist bei der Entnahme der Platine zurück in ihre lotrechte Position kippten. Es kam allerdings vereinzelt vor, dass ein zuvor umgeschobener Kondensator schräg stand und der benachbarte bestückt werden sollte. Hier kam es dann zu einer Kollision, da der Schrägstehende über seinen eigentlichen Platz hinaus hing. Um dieses Problem zu lösen, wurde das Greiferfingerdesign hinsichtlich der Breite nochmal genauer analysiert und optimiert. Hierfür wurde, wie in der Grafik 5.7 erkennbar, die Wand ausgedünnt. Die Grafik zeigt einen Vergleich der Schnittanalysen der Greiferfinger. Eine deutliche Reduzierung von umgekippten Kondensatoren wurden bei nachfolgenden Tests festgestellt.

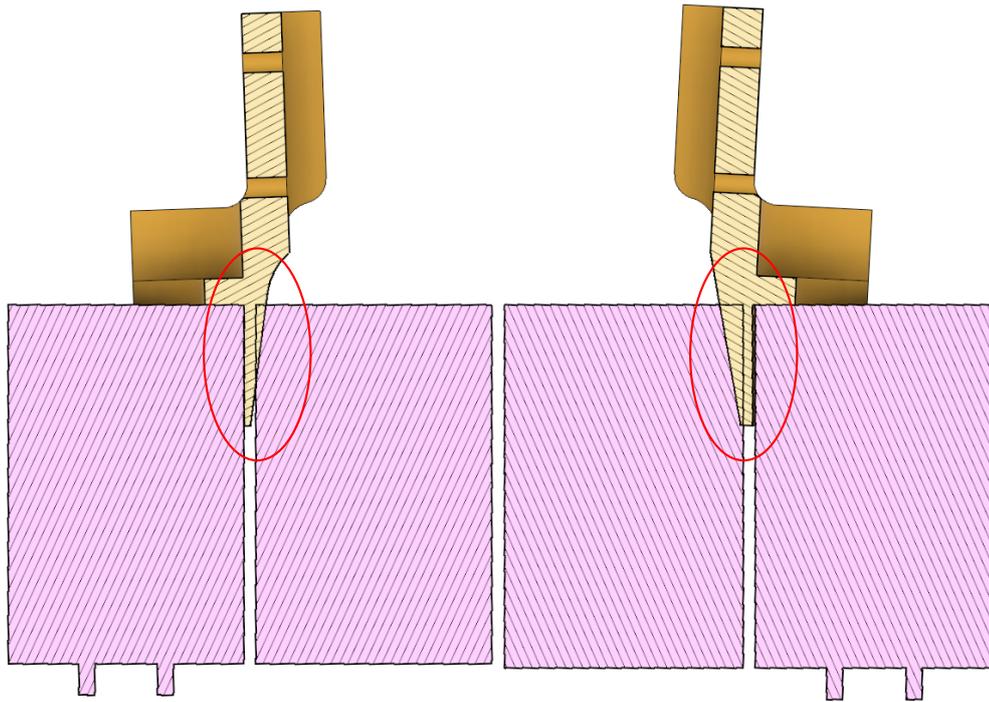


Abbildung 5.7: Vergleich der Schnittanalysen der Greiferfinger. Links die optimierte Version, rechts die vorherige Version.

Im Hinblick auf die Herstellertoleranzen der Kondensatoren kam es vor, dass Kondensatoren, welche leicht gebogene Anschlüsse aufwiesen, versucht wurden zu bestücken. Dabei war es dem Roboter nicht möglich, mit diesen Gegebenheiten den Kondensator zu fügen. Diese Kondensatoren lagen dann auf der Platine und führten später zu Zwischenfällen. Daher wurde die Konfigurierung der Detektoren nochmals genauer untersucht. Die Lösung war die Anhebung des Score-Wertes des Beinchen-Detektors von 80 auf 85, um sicherzustellen, dass lieber ein bestückbarer Kondensator im Ausschuss landet als ein nicht bestückbarer bestückt wird. Dieser Schwellwert wurde auf Basis der Mittelwertermittlung, welche in Tabelle 5.1 sichtbar ist, definiert. Dadurch wird die Zuverlässigkeit der Anlage gefördert, da so seltener Ausfälle entstehen.

Kondensatoranschlüsse	1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	Mittelwert
Normal	89,0	88,7	88,5	88,9	88,78
Geknickt	83	82,4	81,1	83,8	82,58

Tabelle 5.1: Mittelwertberechnung Detektor-Score-Wert

Bisher wurde das Gegentray über Spannpratzen fixiert, jedoch benötigt dies viel Zeit und Werkzeug, um die Aufspannung zu lösen. Die Fertigung nutzt für temporäre Aufspannungen Kniehebelspanner, wie in Abbildung 5.8 dargestellt. Diese wurden als Inspiration für eine optimierte Aufspannung des gedruckten Gegentrays herangezogen. Diese gibt es in unterschiedlichen Ausführung und unterscheiden sich dabei hauptsächlich darin, ob in horizontaler oder vertikaler Richtung eine Kraft ausgeübt wird. Diese Kraft entsteht über das Umlegen eines Hebels. Für das Gegentray wurden daher horizontale Kniehebelspanner beschafft, welche ein Verrutschen der Konstruktion verhindern. Dadurch kann das Gegentray deutlich schneller und angenehmer gelöst und ausgetauscht werden.



Abbildung 5.8: Horizontaler Kniehebelspanner zur prozessoptimierten Aufspannung des Gegen-trays. Quelle: [41]

### 5.2.3 Komfortanpassungen

Da in der Fertigung ein hoher Anspruch an Bedienungsfreundlichkeit gefordert wird und um die Anlage vorsorglich zu gestalten, wurden weitere Anpassungen vorgenommen. Eine Anpassung umfasste Modifikationen am Werkstückträger. Dieser hatte im Rahmen, auf welchen die Leiterplatte aufliegt, Taschen gefräst, in Bereichen, in denen sich die Widerstände befanden. Um die Entnahme der Platine angenehmer zu gestalten, wurden auf beiden kurzen Seiten des Trägers mittig ebenso Taschen mittels einer konventionellen Fräsmaschine gefräst. Dadurch können die Fingerkuppen auch von unten bei der Entnahme der Platine unterstützen, was für einen besseren Halt sorgt.

Beim Erreichen des Index der Tray- oder Platinenliste blieb der Roboter inmitten der Trajektorie stehen. Dadurch stand der Roboter dem Bediener teilweise im Weg und es war nicht eindeutig, dass der Mitarbeiter nun handeln muss. Hierfür wurde eine Rückzugsposition eingefügt, welche angefahren wird, sobald entweder das Tray leer ist oder die Platine vollständig bestückt wurde. Die Roboterzelle verfügt über Sicherheitspositionsschalter, daher lag nahe diese mit der Anlage zu koppeln. Um das Verletzungsrisiko zu verringern und den Sicherheitsanforderungen in der Fertigung gerecht zu werden, muss der Roboter beim Öffnen der Tür stoppen. Dafür wurde sich zunächst mit den Sicherheitseingängen des URs vertraut gemacht. Dieser bietet zwei Optionen an. Zum einen ein Softguard-Stop, bei welchen es sich nach der Norm IEC 60204-1 um eine Stoppkategorie 2 handelt. Zum anderen einen Emergency-Stop, wobei es sich um die Stoppkategorie 1 handelt. Der Unterschied liegt dabei darin, dass bei Kategorie 2 die Energie konstant an den Motoren anliegt, während sie bei Kategorie 1 nach Einlegen der mechanischen Bremse entfernt wird. Der Emergency Eingang sollte für Notaus Schaltungen verwendet werden, wohingegen der Softstopp für Türschalter, Trittmatten oder ähnliche Sicherheitstechnik geeignet ist. Dieser schont durch sein sanftes Anfahren die Mechanik des Roboters. Außerdem erfordert eine Emergency-Stop Auslösung eine Neuinitialisierung des Roboters, was in der Fertigung nicht akzeptabel ist, wenn das bei jeder Öffnung der Türen der Fall ist. Daher wurden die Türpositionsschalter an den Softguard-Eingang verkabelt. Hierbei muss der Roboter bei Öffnung der Türen nicht neuinitialisiert werden, sondern der Eintrag muss in der Robotersteuerung nur quittiert werden, bevor er weiterfahren kann. Hierfür muss ein Quittiertaster an den digitalen Eingängen verbunden werden. Dieser ist ebenso zweikanalig nach Performance Level d, wie die Sicherheitseinrichtung.[42]

Ein Verfahren des Roboters, während der Softstopp aktiv ist, ist nicht möglich. Dies macht ein nachträgliches Einlernen von Punkten oder Einmessen von Komponenten unmöglich ohne geöffnete Türen. Aus diesem Grund wurde ein Schlüsselschalter in die Schaltung eingebunden. Dieser ist parallel zu den beiden Türschaltern, welche in Reihe verkettet sind, verschalten. Die Anbindung an die Robotersteuerung ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Dadurch kann die Türschaltung über den Türschalter gebrückt werden. Dies kann sowohl für das Anlernen von Punkten, das Einmessen von Material als auch für genauere Analysearbeiten verwendet werden. Die Verwendung dieses Schlüsselschalters ist dabei ausschließlich geschultem Personal vorbehalten.

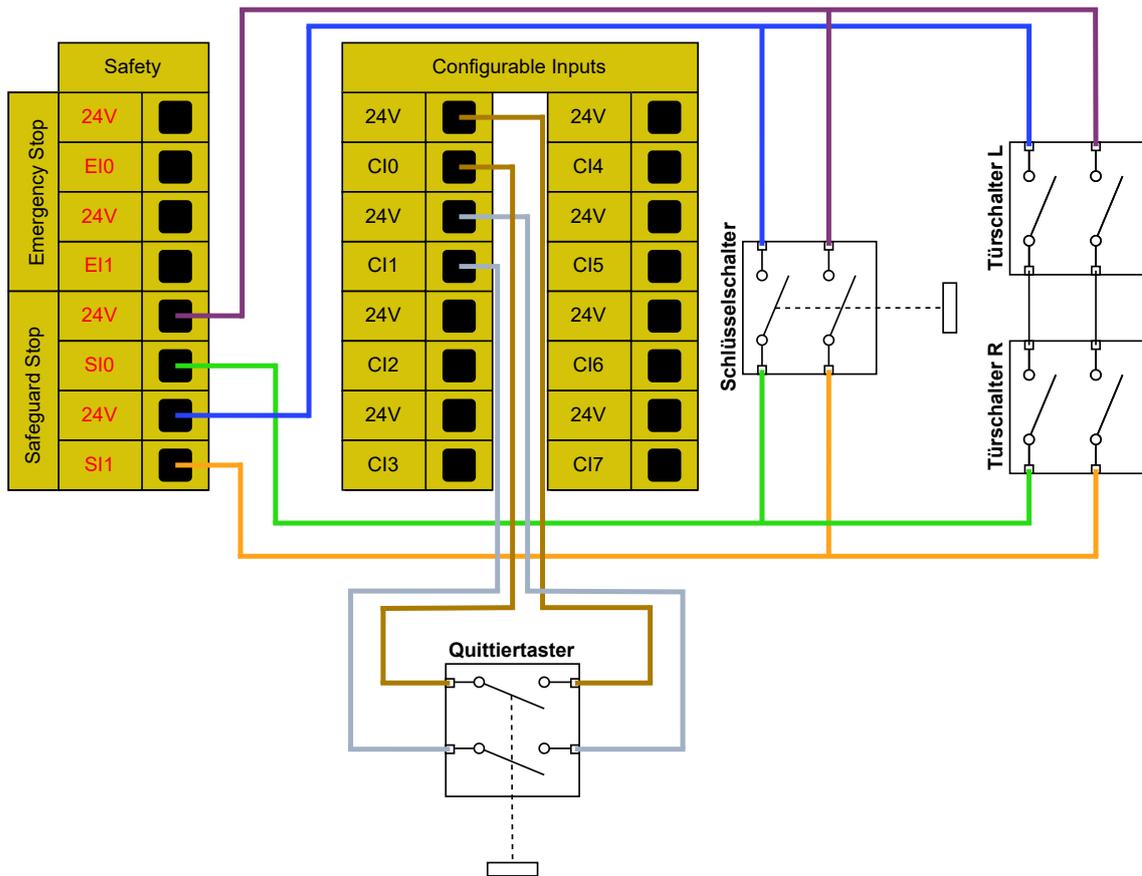


Abbildung 5.9: Elektrische Verschaltung der Sicherheitskomponenten. Angelehnt an Quelle [42]

Durch die Menge an Anpassungen hat sich die Struktur des Roboterprogramms teilweise verändert. Der dadurch entstandene Programmablaufplan ist in voller Länge inklusive der Anpassungen im Anhang zu finden.

### 5.3 Validierung der Anlage

Die parametrisierten Kräfte der Templates wurden zunächst mit kleinen Werten belegt, um das Risiko von Beschädigungen an Greiferfingern, Kondensatoren oder dem Gegentray zu minimieren. In dem Plot in Grafik 5.10 ist erkennbar, dass der Kraftwert von 30 N, welcher beim Festigen des Griffs festgelegt wurde, deutlich überstiegen wird. Dies ist der Fall aufgrund der Geschwindigkeit des Roboters in dieser Bahn und da der Sensorwert nicht oft genug geprüft wird. Somit endet die Trajektorie, wenn bereits eine höhere Kraft erreicht wurde. Aufgrund der weiterhin bestehenden Funktion und nicht feststellbaren Beschädigungen wird diese Kraftschwellwerteneinstellung beibehalten.

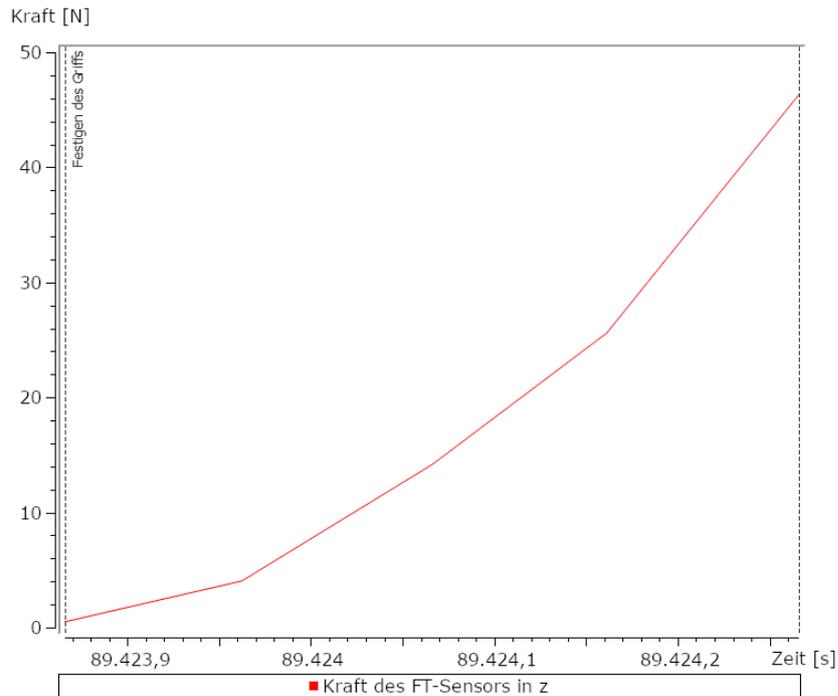


Abbildung 5.10: Ausschnitt der Kraftaufzeichnung während der Entnahme. Speziell für das Template: **Festigen des Griffs**

Durch dieses umfassende Programm konnte eine durchschnittliche Ablaufdauer von etwa 13 Minuten erreicht werden, siehe Tabelle 5.2. Dabei hing die Zeit von den einzelnen Rotationen der Kondensatoren im Tray sowie der Menge an Kondensatoren, die als Ausschuss gewertet wurden, ab.

Durchläufe	1. Lauf	2. Lauf	3. Lauf	4. Lauf	5. Lauf	Mittelwert
Bestückungszeit [min]	14	13,5	12,5	12,5	11,9	12,9

Tabelle 5.2: Mittelwertberechnung Bestückungszeit

## 6 Bewertung

In diesem Abschnitt folgt die Bewertung des gesamten automatischen Fertigungsprozesses. Dabei wird der Fokus auf die im Anforderungskatalog gestellten Kriterien gelegt. Im Anschluss wird ein Vergleich zwischen der robotergestützten und der konventionellen Bestückung gezogen und Verbesserungsvorschläge formuliert.

### 6.1 Prozessfähigkeit

Durch Verwendung unterschiedlichster Materials innerhalb der Testläufe wurde bewiesen, dass die Anlage die Toleranzen des Materials kompensieren kann. Durch Einsatz der Kamera und Einbindung in das Roboterprogramm können Kondensatoren mit beliebigem Winkel erkannt und korrigiert werden. Etwaige Sonderfälle sind über den Programmablaufplan abgedeckt. Beispielsweise ist die Erkennung von Ausschuss durch genaue Prüfungen des Materials sichergestellt. Durch intelligente Suchalgorithmen ist gewährleistet, dass Toleranzen durch die Wiederholgenauigkeit des Roboters sowie durch Abweichungen des Materials ausgeglichen werden können. Dank der individuellen Greiferfinger, welche auf den verwendeten Elko abgestimmt sind, lässt sich ein sicherer Transport auch bei hohen Geschwindigkeiten realisieren. Aufgrund der geringen Positionstoleranzen der Platine und der Greiferfinger kommt es selten zum Einsatz des Suchalgorithmus. Dennoch ist dieser hilfreich, wenn ein Kondensator außerhalb des Mittelwerts aber innerhalb der Standardabweichung liegt. Durchgeführte Tests bewiesen dabei die Prozessfähigkeit durch einen problemlosen und zuverlässigen Ablauf. Die Kondensatoren wurden dabei fehlerfrei bestückt. Somit läuft der Prozess stabil ab.

Des Weiteren wurde die Nachhaltigkeit in Form des Stromverbrauchs geprüft. Dabei ergaben sich im Betrieb eine durchschnittliche Leistung von 113,1 W und im Ruhebetrieb von 95,5 W. Auch die Wartungsintensität der Anlage ist zu betrachten. Diese beschränkt sich dabei auf die Wartung der verwendeten Komponenten, das heißt dem Roboter, der Kamera sowie den verschraubten Halterungen. Grundsätzlich sollten die Schraubverbindungen der Komponenten sowie die Steckverbindungen der Anlage regelmäßig überprüft werden. Universal Robot bietet für die Kontrolle des Roboters mit Tabelle 6.1 eine detaillierte Wartungsliste an. Für die Kamera reicht hingegen eine optische Inspektion der Kamera sowie die Prüfung der elektrischen Anschlüsse[43].

Checkliste		Monatlich	Halbjährlich	Jährlich
<b>Roboterarm</b>				
Prüfung der blauen Deckel *	O		x	
Prüfung der Schrauben der Deckel	F		x	
Prüfung der Gelenkflachringe	O		x	
Prüfung der Roboterkabel	O		x	
Prüfung der Kabelverbindungen *	O		x	
Prüfung der Basisverschraubungen *	F	x		
Prüfung der Flanschverschraubung *	F	x		
Prüfung der Gelenkverschraubungen *	F		x	
<b>Robotersteuerung und Teach Pendant</b>				
Prüfung des Notaus	F	x		
Prüfung des Backdrive Modus	F	x		
Prüfung des Freedrive Modus	F		x	
Prüfung der Sicherheitsein- und ausgänge	F		x	
Prüfung der TP Kabel und Anschlüsse	O		x	
Prüfung und Reinigung des Filters der Steuerung	O		x	
Prüfung der Klemmen in der Robotersteuerung	F		x	
Prüfung des Massekontakts zur Robotersteuerung	F			x
Prüfung der Stromversorgung zur Steuerung	F			x

O = Optische Inspektion, F = Funktionsprüfung

\* = Muss nach starker Kollision geprüft werden

Tabelle 6.1: Wartungsliste des Universal Robot UR5. Angelehnt an Quelle [44]

## 6.2 Erweiterbarkeit

Dank der ArtiMinds Robot Programming Suite lässt sich das Roboterprogramm hinsichtlich der Positionen sowie der Komponenten skalieren sowie adaptieren. In kürzester Zeit kann das Layout der Komponenten aber auch deren Lage geändert werden. Durch die Profilbauweise der Zelle ist das nicht nur digital, sondern auch analog möglich. So können die Positionen der Komponenten innerhalb der Zelle schnell angepasst werden, indem sie mit Nutensteinen in den Profilen befestigt werden.

Das konstruierte Gegentray bietet eine interaktive Lösung für die Materialvorbereitung der Anlage. Wie bereits erwähnt, wird dieses über einen Anschlag und Kniehebelspanner in der Zelle befestigt. Durch dieses Bauteil lässt sich die Anlage in Kürze mit 100 neuen Kondensatoren befüllen, womit die Anlage im Schnitt wieder zwei Platinen bestücken kann und somit für etwa 13 Minuten beschäftigt ist, bevor der Bediener eingreifen muss.

Auch die individuellen Greiferfinger wurden selbstständig entworfen und gefertigt, was den Vorteil hat, dass Anpassungen schnell umgesetzt und in der Anlage getestet werden können. Es lassen sich so neue Greiferfinger auf Basis der modellierten Anbindung an den Greifer entwerfen. Sollte sich der Kondensatortyp ändern, kann die Anlage über Änderung von Parametern und dem Anpassen der Finger leicht adaptiert werden. Der Greifer selbst erwies sich als suboptimal, aufgrund des radialen Griffs und dem sich damit ändernden TCP. Dennoch ließ sich mit ihm die Aufgabe lösen.

Die Kamera ist der Hauptbestandteil der Ausschuss- sowie Winkellageerkennung des Kondensators. Sie gewährleistet, dass Kondensatoren mit beliebiger Ausrichtung erkannt werden. Durch die benutzerfreundliche Oberfläche der SensoPart Konfigurationssoftware lassen sich schnell und flexibel andere Anwendungen, die eine Erkennung erfordern, umsetzen. Hierfür müssen lediglich ein neuer Jobsatz sowie neue Detektoren für die Erkennung der Merkmale angelegt werden. Die Wahl

der Vorverarbeitung, sofern diese benötigt wird, hängt dabei individuell von der Anwendung und den Umgebungseigenschaften ab. Somit lässt sich das Programm durch die Umsetzung in der ArtiMinds Robot Programming Suite leicht durch das Abändern von Parametern justieren. So lassen sich Änderungen in der Flowchart-Programmierung durch denkbare Materialanpassungen einfach verwirklichen.

### **6.3 Bedienbarkeit**

Die Bedienbarkeit der Anlage teilt sich in die Benutzerfreundlichkeit der angewandten Software und in die Ergonomie bei der Befüllung in und Entnahme aus der Anlage. Die Bedienung ist durch unterschiedliche Funktionen so gestaltet, dass sie für den Mitarbeiter leicht zu verstehen und zu befolgen ist. Die Programmauswahl sowie der Start des Programms funktioniert dabei über das integrierte Teach Pendant. Die Freischaltung der Sicherheitstechnik sowie die Servicestellung der Zelle fungiert über einen an der Zelle angebrachten Quittier- und Schlüsselschalter. Die Komponenten sind innerhalb der Zelle so angeordnet, dass sie bequem nach der Türöffnung erreicht werden können. Das Gegentray besteht jeweils aus vier Vierteltrays, weshalb es rotationssymmetrisch ist. Es wurde allerdings nicht geprüft, ob das Programm auch bei verdrehter Einlegung noch einwandfrei funktioniert und die eingemessenen Positionen einhält. Daher wurde das Gegentray an einer Ecke markiert, welche die Lage in der Zelle vorgibt. Die Bedienung durch einen zuvor geschulten Mitarbeiter ist somit möglich.

Nach einer Schulung in die ArtiMinds Software Robot Programming Suite sowie eine Vorstellung des erstellen Programms sind Mitarbeiter in der Lage Parameter sowie Anpassungen an der Struktur des Programms zu verändern. Die Learning & Analytics for Robots Software bietet ein leistungsfähiges Analysewerkzeug für den Programmablaufplan. Dadurch lassen sich Bestückungszeiten bis zu den Dauern der einzelnen Templates untersuchen.

Da sich die Software noch in der Entwicklung befindet, kann es hin und wieder vorkommen, dass Bugs existieren oder Funktionen nicht zu 100 Prozent durchdacht sind. Diese wirken sich teilweise auf die Programmierung des Roboters aus. Auch nach einer Einführung in die SensorPart Software sind Mitarbeiter fähig, Anpassungen an der Merkmalerkennung durch die Kamera durchzuführen.

### **6.4 Variantenwahl**

Die Fertigung unterschiedlicher Varianten ist über die Programmauswahl am Teach Pendant möglich. Dadurch kann der Mitarbeiter die Anlage schnell auf den geforderten Auftrag anpassen. Zusätzliche Programme können dabei flexibel über die RPS offline erstellt und mittels eines USB-Sticks auf die Steuerung übertragen werden.

### **6.5 Zeitvorgabe**

Der Richtwert von zehn Minuten konnte nicht ganz erreicht werden. Dennoch ist der Mittelwert von 12,9 Minuten nach Rücksprache akzeptabel. In dieser Zeit bestückt der Roboter eine Leiterplatte mit 46 THT-Kondensatoren. Parallel dazu kann der Mitarbeiter einen zweiten Auftrag an einem weiteren Handbestückungsplatz bearbeiten.

### **6.6 Sicherheitskonzept**

Die Sicherheitstechnik des Roboters gewährleistet einen sicheren Betrieb der Anlage in der Produktion. Sie erfüllt dabei die Anforderungen an die Arbeitssicherheit, da die Anlage mit

Schutzeinrichtungen ausgestattet ist, die verhindern, dass ein Mitarbeiter von dem Roboter verletzt werden kann. Sie wurde dabei an die sichere Steuerung des Roboters angebunden, was eine Vorgabe für den sicheren Betrieb darstellt. Die Schutzeinrichtungen umfassen einen Sicherheitschalter, der den Roboter stoppt, wenn ein Mitarbeiter in den Gefahrenbereich gelangt. Um den Mitarbeiter zu schützen und die Funktion des Roboters zu erhalten, wurde hier ein Kompromiss eingegangen in Form einer Stoppkategorie 2. Außerdem ist die Anlage mit einer Notausschalttaste ausgestattet, die den Roboter sofort stoppt. Eine CE-Zertifizierung ist zum aktuellen Zeitpunkt noch ausstehend. In Hinsicht auf das Sicherheitskonzept bietet die Einhausung einen großen Vorteil, da hiermit eine Abnahme vereinfacht wird im Vergleich zu einer kooperativen Anlage. Grundsätzlich wäre die Anlage auch ohne eine Einhausung umsetzbar gewesen, jedoch ist dann mit Einbußen in der zulässigen Geschwindigkeit oder mit zusätzlicher, umfangreicher Sicherheitstechnik zu rechnen.

## 6.7 Kostengünstig

Die Funktion der Anlage konnte mit geringen finanziellen Mitteln dargestellt werden. Bereits bei der Vorauswahl der Komponenten wurde dieses Kriterium beachtet. Beispielsweise wurde sich bei den zur Auswahl stehenden Kameras für die preiswerteste entschieden. Abgesehen von den bereits beschafften Komponenten wurde nur noch Material in Form von Kniehebelspannern und Filament für den 3D-Druck der Finger und des Gegentrays benötigt. Für die angefertigten Komponenten wurde sich an dem zur Verfügung stehenden Material und Werkzeug orientiert. Dabei wurde sich am Inventar oder Reststücken der Firma bedient.

Die Erfüllung der Anforderungen werden in Tabelle 6.2 zusammenfassend mit Schulnoten bewertet. Dabei steht die Schulnote 1 für „sehr gut“ und eine 6 für „ungenügend“.

Anforderungen	Erfüllung					
Pflichtkriterien	1	2	3	4	5	6
Prozessfähigkeit	x					
Erweiterbarkeit		x				
Bedienbarkeit		x				
Variantenwahl	x					
Wunschkriterien						
Bestückungszeit von 10 Minuten			x			
Sicherheitskonzept	x					
Kostengünstige Umsetzung	x					

Tabelle 6.2: Erfüllung der Anforderungen

## 6.8 Vergleich zur konventionellen Fertigung

Anbei folgt ein Vergleich der robotergestützten Bestückung zur konventionellen. In Tabelle 6.3 wird dabei der Vergleich der Zeiten zwischen konventioneller und automatischer Bestückung angeführt, aus welcher hervorgeht, dass die Bestückung insgesamt länger dauert als zuvor. Die Fertigungszeit setzt sich nach dem Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung (REFA) dabei vereinfacht aus der Rüst- und der Ausführungszeit zusammen. Unter der Rüstzeit ist die Zeit, welche benötigt wird, um die Betriebsmittel einmalig für den Auftrag vorzubereiten, zu verstehen. Die Ausführungszeit umfasst die Zeit für sich wiederholende Arbeit, welche immer wieder pro Iteration anfällt.[45, 46]

Die Rüstzeit der konventionellen Fertigung deckt dabei das Einrichten des Lötrahmens auf die Leiterplatte ab. Die Ausführungszeit hingegen umfasst die Handbestückung sowie das Spannen der Platine im Lötrahmen und das Legen auf das Förderband zur Wellenlötanlage. Für die Roboterzelle besteht die Rüstzeit aus der Montage der benötigten Komponenten und Aufspannungen, wie der Werkstückträger sowie das Einmessen dieser. Auch der Lötrahmen muss weiterhin auf die LP abgestimmt werden. Aufgrund der Komplexität dieser Rüstung wird eine Rüstzeit von 25 Minuten angesetzt. Das Einlegen der Trays sowie das Entnehmen der Platine aber auch die Bestückung durch den Roboter gehört dabei zur Ausführungszeit. Da eine Ausführungszeit für die Anlage erst im Betrieb bestimmt werden kann, wird in der Tabelle vereinfacht die Bestückungszeit für den Vergleich herangezogen, welche lediglich die Bestückung umfasst. Auch eine tatsächliche Rüstzeit kann erst festgestellt werden, wenn die Anlage in den Betrieb integriert wurde. Neben diesen zeitlichen Differenzen fordert die Anlage außerdem einmalig höhere Kosten für die Anschaffung der Komponenten. Sie ist auch nicht so flexibel einsetzbar, wie der Mitarbeiter, was aber durch geringe Varianz in der Zwischenkreisfertigung nicht unbedingt nötig ist. Hinsichtlich des Durchsatzes bietet die Anlage Vorteile, da somit eine Zweimaschinenbedienung ermöglicht wird. Der Mitarbeiter kann nun eine weitere Tätigkeit parallel erledigen, während der Roboter bestückt. Insgesamt bietet die Anlage eine Basis für den selbstständigen Betrieb. Betrachtet man den Ablauf, wie die Kondensatoren zuvor für einen Auftrag passend abgezählt wurden, so bestehen nun deutliche Vorteile, da der Mitarbeiter die Anlage nur noch befüllen muss. Dadurch können laufende Kosten durch die Reduktion von logistischem Aufwand eingespart werden.

	konventionell	automatisch
angesetzte Bestückungszeit pro Kondensator [s]	5	13
durchschnittliche Bestückungszeit pro Kondensator [s]	4	16,8
angesetzte Rüstzeit [min]	10	25

Tabelle 6.3: Vergleich der Bestückungs- und Rüstzeiten

## 6.9 Mögliche Verbesserungen

Verbesserungsmöglichkeiten unter den aktuellen Gegebenheiten bestehen darin, die Anlage noch zuverlässiger, effizienter und bedienerfreundlicher zu entwickeln.

Dafür wäre es sinnvoll, das Greiferfingerdesign in Hinsicht auf die Dicke zu optimieren. Da sich das aktuelle Design am Rande des möglichen für eine Fertigung mit einem Fused Deposition Modeling (FDM)-Drucker befindet, müssten diese dann mit einem anderen Verfahren hergestellt werden. Denkbar wäre hierfür ein 3D-Druck über das Verfahren Selektives Lasersintern oder eine Fertigung mittels einer CNC-Fräse. Durch eine zusätzliche Prüfung für die Anwesenheit einer Platine lassen sich Bestückungen, bei denen keine Platine vorhanden ist, vermeiden. Dies kann entweder über einen simplen Sensor im Werkstückträger oder durch eine weitere Fallbetrachtung im Roboterprogramm gelöst werden. Infolge der neuen Lage der Kamera ist das Objektiv nun nach oben gerichtet, was suboptimal für die Zuverlässigkeit der Erkennung ist. Daher könnte eine Säuberung der Kamera durch den Roboter integriert werden.

Zeiteinsparungen wären möglich, indem nicht über der Kamera rotiert wird, sondern lediglich die Aufnahme des Kondensators gemacht wird. Im Anschluss verfährt der Roboter unmittelbar zur Bestückungsposition, während die Kamera Zeit hat, den Winkel zu ermitteln. Sobald diese Prozesszeit abgeschlossen ist, kann der bestimmte Winkel auf die Bestückungsposition aufaddiert werden. Durch die Erweiterung des Speichers an Elektrolytkondensatoren um ein zweites Tray sowie weitere Werkstückträger und angepasster Programmierung gewinnt die Anlage an Selbstständigkeit, da sie länger ohne Eingriffe bestücken kann.

Der Startprozess lässt sich hinsichtlich der Bedienung durch die Optionen `Autoinitialisieren` und `Autoprogramm` vereinfachen. Dadurch initialisiert sich der Roboter beim Hochfahren selbst-

ständig und lädt das gewählte Programm. Somit muss dieser Prozess nicht mehr manuell durchlaufen werden. Außerdem könnte der Anlaufprozess zu Schichtbeginn optimiert werden, indem sich die zuletzt gegriffene Position aus dem Tray in einer lokalen Datei gespeichert wird. Das Programm würde dann auf diese Variable zugreifen und bei Start dort fortfahren, wo er zuletzt gegriffen hat. Da immer ein Programm zu Beginn angewählt wird, würde es sich anbieten, die Variantenwahl über eine Auswahlmöglichkeit mittels Dialogfelder, über welche die Variante vom Bediener gewählt wird, umzusetzen. Alternativ zur Schnittstelle über das Teach Pendant wäre eine intuitivere Bedienung denkbar. Beispielsweise wäre ein Start und die Auswahl eines Programms über fest installierte Taster möglich, was die Bedienung einfacher gestaltet. Taster sowie Statusampeln zur Visualisierung des aktuellen Zustands könnten über die digitalen Eingänge mit der Robotersteuerung verbunden werden. Auch die Zwischenschaltung einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) für die Erweiterung der Sicherheitseingänge wäre denkbar, sollte mehr Sicherheitstechnik, wie beispielsweise Laserscanner oder Trittmatten hinzukommen. In Hinsicht auf den Einrichtbetrieb würde ein Parallelbackengreifer eine Vereinfachung in der Adaption bieten, da dieser einen weniger komplexen Mechanismus vorweist als der Radialgreifer. Somit lassen sich Positionen leichter anlernen.

## 7 Zusammenfassung

Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit war es, eine Anlage zu entwickeln, welche die Bestückung von THT-Kondensatoren übernimmt. Hierfür war es notwendig sich ein Konzept für die interaktive Bestückung auszudenken, den mechanischen Aufbau der Komponenten zu verwirklichen sowie die elektrischen Verbindungen aller Komponenten auszuführen und den Roboterablaufplan zu programmieren. Anschließend wurde die Anlage getestet und Optimierungen durchgeführt.

Zur Lösung der gestellten Aufgabe wurde sich in Fertigungsverfahren und Bestückungstechnologien eingearbeitet sowie der konventionelle Fertigungsprozess der Leiterplatte analysiert. Daraufhin wurden die Ergebnisse einer vorangegangenen Bachelorarbeit in Form einer Machbarkeitsstudie rekapituliert und bewertet. Da sich einige Gegebenheiten seit der Entstehung dieser Studie geändert hatten und die Zielsetzung eine andere war, wurde diese dahingehend geändert.

Im Anschluss wurden die Rahmenbedingungen und die in der Zwischenzeit entstandenen Fortschritte beschrieben. Dazu zählen das Arbeitsumfeld sowie die angefertigten und beschafften Komponenten, die die Fertigstellung der Anlage beschleunigten. Hierbei wurden die Hauptkomponenten dieser Anlage vorgestellt und detailliert erklärt.

Danach wurde der Stand der Technik als Inspiration aufgezeigt. Aus diesen sowie aus den vorher gewonnenen Erkenntnissen folgte dann die Entstehung und Beschreibung des Konzepts für die Interaktion zwischen Bediener und Maschine sowie Ideen für die Umsetzung. Dabei war auf eine Integration in ein traditionelles Arbeitsumfeld zu achten. Für die Konzeptionierung galt es zu klären, wie der Aufbau eingesetzt wird und welche Tätigkeiten der Mitarbeiter und welche die Anlage umzusetzen hat. Nach der Erläuterung dieses Konzeptes und dem Entwurf von Abläufen für den Materialwechsel wurde damit begonnen, erste Prototypen für den Robotergrifer zu entwerfen und zu fertigen.

Als Nächstes folgte die Umsetzung der Ideen sowohl in Hard- als auch in Software. Hierbei wurde besonders auf die Zusammenhänge der konstruierten Hardware und dem entwickelten Roboterprogramm und deren Interaktion eingegangen. Bei der Entstehung des Roboterprogramms wurde besonderer Wert auf die Adaptier- und Skalierbarkeit gelegt. Das ist essenziell, um schnell auf Materialanpassungen reagieren zu können. Hierfür wurden Methoden vorgestellt, wie diese leicht eingepflegt und umgesetzt werden können. Ein weiterer, wichtiger Aspekt war der visuelle Bestandteil, da dieser für die Zuverlässigkeit der Anlage steht. Hier wurde erläutert, wie eine korrekte Erkennung, durch den Einsatz von Bildverarbeitung gewährleistet wird.

Anschließend wurden einige Testläufe durchgeführt, um die Funktion der Anlage zu validieren. Zunächst wurde mit einfachen Versuchen begonnen, um den Umfang eingrenzen zu können. Danach wurden vollumfängliche Bestückungsversuche durchgeführt. Dadurch ergab sich erstmalig die Funktion der Anlage. Die Kriterien wurden zu diesem Zeitpunkt noch nicht eingehalten, weshalb der Bestückungsprozess näher analysiert und Anpassungen hinsichtlich der zu erfüllenden Kriterien vorgenommen wurden. Die Komponenten sowie das Roboterprogramm wurden dabei stetig durch Erkenntnisse aus diesen und weiteren Testdurchläufen angepasst und optimiert.

Abschließend wurde die entwickelte Anlage hinsichtlich der gestellten Anforderungen bewertet und ein Vergleich zur konventionellen Fertigung durchgeführt. Naheliegende Verbesserungsmöglichkeiten wurde ebenso formuliert. Die entwickelte Anlage hat die Anforderungen eindeutig erfüllt und ermöglicht eine automatisierte Bestückung. Schlussendlich können nun erstmals Platinen vollständig, ohne das Eingreifen und Ausbessern von Mitarbeitern automatisch bestückt werden. Die Kondensatoren werden dabei selbstständig auf ihre Ausrichtung geprüft und die Anlage muss lediglich befüllt und die bestückten Platinen entnommen werden. Hiermit steht die erste robotergestützte Anlage in der Fertigung am Standort Nürnberg.

## 8 Ausblick

Um einen noch höheren Grad an Produktivität und Bedienbarkeit zu erreichen, stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung. Dabei stellt sich stets die Frage, in welche Richtung eine Optimierung angestrebt wird. Im Folgenden werden Potenziale der Anlage durch Neuan-schaffungen und Umstrukturierungen gezeigt.

Deutlich geringere Bestückungszeiten ließen sich beispielsweise mit der Verwendung eines Scara-Roboters erreichen. Dieser kann aufgrund der Auslegung als klassischer Industrieroboter mit höheren Geschwindigkeiten verfahren. Des Weiteren bietet er eine höhere Steifigkeit, wodurch Positionen mit einer höheren Wiederholgenauigkeit angefahren werden können. Neben der Umstellung auf einen Scara-Roboter wäre auch das Aufrüsten auf einen UR e-Serie Roboter eine Variante. Dieser besitzt bereits einen integrierten Kraft-Momenten-Sensor und verfügt über eine neuere Steuerung, welche eine intuitivere Bedienung bietet. Außerdem besitzt die e-Serie eine kleinere Zykluszeit von 2 ms im Gegensatz zu 8 ms der CB3 Steuerung, was ihn in der Prozesszeit schneller macht.[47, 48].

Eine höhere Selbstständigkeit erreicht die Anlage durch die Skalierung des Speichers an Kondensatoren. Mit Integration eines Tellerspenderprinzips können die Kondensatoren so übereinander gestapelt werden, wobei dann auf eine genaue Positionierung geachtet werden muss. Alternativ kann der Schritt, dass der Bediener die Kondensatoren mithilfe des Gegentrays umdrehen muss, vereinfacht werden, indem sich ein Konzept überlegt wird, welches die Kondensatoren selbstständig dreht. Dabei ist mit Einbußen in der Bestückungszeit zu rechnen, jedoch entfällt der Vorbereitungsprozess beim Mitarbeiter. Naheliegend ist hier die Anlage automatisch mit Kondensatoren zu befüllen, wobei hier die genannten Konzepte aus 3.3 und deren Erkenntnisse zu beachten sind. Im gleichen Zuge ist eine automatische Abfuhr der Leiterplatten sinnvoll, da dann während der Laufzeit der Anlage kein Mitarbeiter mehr benötigt wird. Hierfür wären Konzepte wie ein Drehteller mit mehreren Werkstückträgern denkbar, wodurch die Anlage an Eigenständigkeit gewinnt.

Eine verbesserte Bedienbarkeit würde über die Einbindung der Zelle in das bestehende Auftrags-system erreicht werden, weil dann Aufträge gescannt werden können und so das Roboterprogramm automatisch ausgewählt werden kann.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersicht der Bestückungstechnologien . . . . .	2
1.2	Beispielhafte Produktbilder für unterschiedliche Platinentypen . . . . .	3
1.3	Rohleiterplatte 3.1613 . . . . .	4
1.4	Rubycon Elektrolytkondensator . . . . .	5
1.5	Fertigungsmomentaufnahme Servoumrichter Baugröße 6 . . . . .	6
1.6	Anlieferungszustand der Kondensatoren im Tray . . . . .	7
1.7	Lötrahmen zur Fertigung der LP 3.1613 . . . . .	8
1.8	Arbeitsplan der Handbestückung für LP 3.1613 . . . . .	8
2.1	Aufbau der Anlage zum Stand der Machbarkeitsstudie . . . . .	11
2.2	Konstruierte Roboterzelle für die Bestückung . . . . .	13
2.3	Universal Robot UR5 mit Controlbox und Teach Pendant . . . . .	14
2.4	SensoPart Visor V20 . . . . .	14
2.5	Kraft-Momenten-Sensor der Firma Robotiq . . . . .	15
2.6	2-Finger-Greifer der Firma Robotiq . . . . .	16
3.1	Automatische Bestückungsanlagen in der Elektronikfertigung . . . . .	18
3.2	Programmablaufplan des Bedieners der Anlage . . . . .	19
3.3	Anwendung des Gegentrays zur Kondensatorvorbereitung . . . . .	20
3.4	Ausschnitt der Platine mit Anordnung der Elkos . . . . .	21
3.5	Freiheitsgrade des Kondensators im zwei Fingergreifer . . . . .	22
3.6	Konstruiertes und gedrucktes Greiferfingerdesign Version 4 . . . . .	23
3.7	Schnittanalyse der Abweichung des parallelen Griffs bei Krafteinfluss . . . . .	23
4.1	Aufbau der Benutzeroberfläche der Robot Programming Suite . . . . .	26
4.2	3D-gedruckte Spitze zur Vermessung der Komponenten . . . . .	27
4.3	Ergebnis der Arbeitsabstandermittlung . . . . .	28
4.4	Konstruierter und 3D-gedruckter Kalibrierplattenhalter . . . . .	29
4.5	Einlernen der Kontur eines Detektors . . . . .	30
4.6	Detektorergebnis eines erkannten Kondensators . . . . .	31
4.7	Vorverarbeitungsfilter für die Kondensatorerkennung . . . . .	31
4.8	Programmablaufplan der Kondensatorentnahme . . . . .	34
4.9	Ausschnitt der Momentenaufzeichnung während der Bestückung . . . . .	35
4.10	Programmablaufplan der Kondensatorbestückung . . . . .	36
5.1	Überblick über den Dynamic Property Wizard . . . . .	39
5.2	Zwischenstand der Anordnung der Komponenten in der Anlage . . . . .	40
5.3	Zeiterfassung der Teiltrajektorien mit den höchsten Ablaufdauern . . . . .	40
5.4	Vergleich der Trajektorie im Bereich der Türen . . . . .	41
5.5	Optimierter Programmablaufplan der Kondensatorentnahme . . . . .	42
5.6	Überarbeitetes Greiferfingerdesign Version 10 . . . . .	43
5.7	Vergleich der Schnittanalysen der Greiferfinger . . . . .	44
5.8	Horizontaler Kniehebelspanner . . . . .	45
5.9	Elektrische Verschaltung der Sicherheitskomponenten . . . . .	46
5.10	Ausschnitt der Kraftaufzeichnung während der Entnahme . . . . .	47

# Tabellenverzeichnis

5.1	Mittelwertberechnung Detektor-Score-Wert . . . . .	44
5.2	Mittelwertberechnung Bestückungszeit . . . . .	47
6.1	Wartungsliste des Universal Robot UR5 . . . . .	49
6.2	Erfüllung der Anforderungen . . . . .	51
6.3	Vergleich der Bestückungs- und Rüstzeiten . . . . .	52

# Abkürzungsverzeichnis

- CAD** Computer-aided design. i, 15, 20, 22, 23, 26, 27, 32, 72
- CE** Conformité Européenne. 51
- CNC** Computerized Numerical Control. 52
- Elko** Elektrolytkondensator. 2, 4, 5, 8, 11, 12, 21, 32, 35, 48, 52, 56, 72
- FDM** Fused Deposition Modeling. 52
- GmbH** Gesellschaft mit beschränkter Haftung. 4
- KLT** Kleinladungsträger. 6
- LAR** Learning & Analytics for Robots. i, 16, 38, 50
- LP** Leiterplatte. i, ii, 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 17, 32, 37, 40, 50, 52, 54, 56
- PAP** Programmablaufplan. 18, 19, 34, 35, 36, 42, 46, 48, 50, 56, 72
- Profinet** Process Field Network. 13
- REFA** Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung. 51
- RPS** Robot Programming Suite. i, 16, 25, 26, 27, 32, 38, 49, 50, 56, 72
- Scara** Selective Compliance Assembly Robot Arm. 55
- SLS** Selektives Lasersintern. 52
- SMD** Surface-mounted device. 3, 4
- SMT** Surface-Mount-Technology. i, 1, 3, 4
- SPS** speicherprogrammierbare Steuerung. 53
- TCP** Tool center point. 25, 26, 29, 43, 49, 72
- THT** Through-Hole-Technology. 2, i, 1, 3, 5, 10, 12, 17, 18, 50, 54
- TP** Teach Pendant. 13, 14, 15, 16, 26, 33, 37, 38, 49, 50, 53, 56
- UR** Universal Robot. 48, 72
- USB** Universal serial bus. 15, 50

# Quellenverzeichnis

- [1] Heiko Weckbrodt. *Robotereinsatz in Deutschland auf Rekordkurs*. URL: <https://oiger.de/2023/09/26/robotereinsatz-in-deutschland-auf-rekordkurs/188351>. (zugegriffen: 06.01.2024).
- [2] Matthias Ernst. „Entwicklung eines Versuchsaufbaus für die Durchführung von roboterassistierten Bestückungsvorgängen“. Bachelorarbeit. Technische Hochschule Nürnberg, Aug. 2020.
- [3] Andreas Risse. *Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätektechnik*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner (GWV), 2012.
- [4] Ekbert Hering, Klaus Bressler und Jürgen Gutekunst. *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer-Verlag, 2008.
- [5] Andreas Föhrenbach. „Technologie der Leiterplattenbestückung“. In: *Simulationsgestützte Leistungsanalyse in der Elektronikmontage: Entscheidungsunterstützung bei Planung und Betrieb von Anlagen*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2002. DOI: 10.1007/978-3-322-89139-6\_2. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-322-89139-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-322-89139-6_2).
- [6] *DIY KITS MINIPA100 1.8-54MHz 100W SSB Linear HF Power Amplifier for FT-817*. Walmart Inc. URL: <https://www.walmart.com/ip/DIY-KITS-MINIPA100-1-8-54MHz-100W-SSB-Linear-HF-Power-Amplifier-for-FT-817-KX3-FT-818-IC-703-CW-AM-FM/5044183130>. (zugegriffen: 21.11.2023).
- [7] *FLEXIBLE LEITERPLATTENTECHNOLOGIE*. PCB Connect GmbH DEUTSCHLAND. URL: <https://www.pcbconnectgroup.com/de/flex-technology/>. (zugegriffen: 21.11.2023).
- [8] Kella Knack. *Differenzielle Signalübertragung in Flex-Schaltungen*. Altium Europe GmbH. URL: <https://resources.altium.com/de/p/addressing-differential-signaling-flex-circuits>. (zugegriffen: 21.11.2023).
- [9] Johann Peter Vogt u. a. „Das Antriebssystem und seine Komponenten“. In: *Antriebslösungen: Mechatronik für Produktion und Logistik*. Hrsg. von Edwin Kiel. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, S. 77–265. DOI: 10.1007/978-3-540-73427-7\_3. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-73427-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-73427-7_3).
- [10] Manfred Winkelkemper. „Reduzierung von Zwischenkreiskapazitäten in Frequenzumrichtern für Niederspannungsantriebe“. Diss. 2005. DOI: 10.14279/depositonce-1252.
- [11] Manfred Meyer. „Umrichter mit Zwischenkreis“. In: *Leistungselektronik: Einführung. Grundlagen. Überblick*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990, S. 330–333. DOI: 10.1007/978-3-642-87348-5\_11. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-87348-5\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-642-87348-5_11).
- [12] Herbert Bernstein. „Drehstrommotoren am Frequenzumrichter“. In: *Angewandte Leistungselektronik: Drehstrom: Elektromotor und Antriebstechnik in der Praxis*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 445–516. DOI: 10.1007/978-3-658-29614-8\_6. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-658-29614-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-658-29614-8_6).
- [13] Matthias Beetz. *Grundlagen: Der Zwischenkreis*. Baumüller Nürnberg GmbH. URL: <https://www.baumueller.com/de/insights/grundlagen/grundlagen-der-zwischenkreis>. (zugegriffen: 10.11.2023).

- [14] Nils Wittig. *Der Unterschied zwischen Selektivlöten und Wellenlöten – Vorteile und Unterschiede*. Assmy & Böttger Electronic GmbH. URL: <https://www.aundb-electronic.de/magazin/selektivloeten-oder-wellenloeten#:~:text=Wellenl%C3%B6ten%20ist%20ein%20ganzheitliches%20automatisiertes,saamt%20der%20durchkontaktierten%20Bauteile%20benetzt..> (zugegriffen: 10.11.2023).
- [15] *ROBOTERTECHNOLOGIE FÜR ALLE ZUGÄNGLICH MACHEN*. Universal Robots (Germany) GmbH. URL: <https://www.universal-robots.com/de/uber-universal-robots/unsere-geschichte/>. (zugegriffen: XX.XX.2023).
- [16] *Compatibility chart and robot generations*. Universal Robots A/S. URL: <https://plus.universal-robots.com/urcap-basics/compatibility-chart/>. (zugegriffen: 31.10.2023).
- [17] *Technische Spezifikation UR5*. Techn. Ber. Universal Robots ApS, 2013.
- [18] *Benutzerhandbuch*. Universal Robots A/S. 2020.
- [19] *Controlbox und Teachpendant*. Universal Robots A/S. URL: [https://www.mybotshop.de/bilder/Prod\\_Beschreibung\\_Bilder/Universal\\_Robots\\_Touch.jpg](https://www.mybotshop.de/bilder/Prod_Beschreibung_Bilder/Universal_Robots_Touch.jpg). (zugegriffen: 31.10.2023).
- [20] *VISOR® V20 Robotic Professional, Sichtfeld weit*. SensoPart Industriesensorik GmbH. URL: <https://www.sensopart.com/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=926&token=74a374f87711d69529429c4c6b06a616aa6f2b7c>. (zugegriffen: 31.10.2023).
- [21] „Beleuchtung“. In: *Bildverarbeitung für Einsteiger: Programmbeispiele mit Mathcad*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, S. 305–324. DOI: 10.1007/3-540-26788-3\_18. URL: [https://doi.org/10.1007/3-540-26788-3\\_18](https://doi.org/10.1007/3-540-26788-3_18).
- [22] *VISOR Robotic*. SensoPart Industriesensorik GmbH. URL: <https://variobotic.de/wp-content/uploads/2022/12/vissor-v20-01.jpg>. (zugegriffen: 31.10.2023).
- [23] *FT 300-S Force Torque Sensor*. Robotiq. URL: [https://blog.robotiq.com/hubfs/Product-sheets/FT%20300/ur/Product\\_sheet-FT300S\\_FC\\_DE.pdf?\\_ga=2.79466324.1300563032.1698744829-1694583896.1698744829](https://blog.robotiq.com/hubfs/Product-sheets/FT%20300/ur/Product_sheet-FT300S_FC_DE.pdf?_ga=2.79466324.1300563032.1698744829-1694583896.1698744829). (zugegriffen: 31.10.2023).
- [24] *Support*. Robotiq. URL: <https://robotiq.com/support>. (zugegriffen: 09.11.2023).
- [25] *Robotiq 2F-85 & 2F-140 Instruction Manual*. Techn. Ber. Robotiq Inc., 2018.
- [26] *Robotiq Elektrischer 2-Finger Greifer 2F-85*. Bachmann Engineering AG. URL: <https://www.plugandautomate.swiss/robotiq-2f-85.html>. (zugegriffen: 06.11.2023).
- [27] *ArtiMinds RPS + Vision*. ArtiMinds Robotics GmbH. URL: <https://www.artiminds.com/de/robotik-software-und-services/robot-programming-suite-plus-vision/#top>. (zugegriffen: 23.11.2023).
- [28] *ArtiMinds RPS + Force*. ArtiMinds Robotics GmbH. URL: <https://www.artiminds.com/robotics-software-and-services/robot-programming-suite-plus-force/>. (zugegriffen: 24.11.2023).
- [29] *Was ist ArtiMinds Learning & analytics for robots?* ArtiMinds Robotics GmbH. URL: <https://www.artiminds.com/de/robotik-software-und-services/learning-and-analytics-for-robots/>. (zugegriffen: 23.11.2023).
- [30] Niko Glaub. *Pressemitteilung: Bestückung mit GL-THTeasy*. Techn. Ber. Glaub Automation & Engineering GmbH, 2020.
- [31] *Ersa ROBOPLACE - Eine neue Ära der Mensch-Maschine Kollaboration*. Techn. Ber. Ersa GmbH, 2014.
- [32] *THT-Bestückung - Next Level mit Glaub Roboterzelle GL-THTeasy*. Glaub Automation & Engineering GmbH. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=G-0GkNFWIQk&list=TLGGB1-5J1F4qgEyMjExMjAyMw>. (zugegriffen: 22.11.2023).

- [33] *THT Placer*. pi4\_robotics GmbH. URL: <https://www.pi4.de/product-thtp1.html>. (zugegriffen: 06.11.2023).
- [34] „Kollege Roboter“ übernimmt THT-Bestückung". Kurtz Holding GmbH & Co. URL: <https://www.ke-mag.de/ausgabe-38/artikel/collaborative-roboplace.html>. (zugegriffen: 06.11.2023).
- [35] Dirk Buchholz. *Bin-picking. New approaches for a classical problem*. Bd. 44. Studies in systems, decision and control. Cham: Springer International Publishing, 2016. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26500-1>.
- [36] *Wendelförderer*. BAGMATIC GmbH. URL: <https://www.bagmatic.com/de/wendelfoerderer/#:~:text=Wendelf%C3%B6rderer%20Funktionsweise%20%E2%80%93%20Moderne%20Technik&text=Ein%20elektromagnetischer%20Schwingantrieb%20in%20Vibrationen,Mikrowurf%20in%20die%20gew%C3%BCnschte%20Richtung..> (zugegriffen: 14.11.2023).
- [37] *Why is it worth using ArtiMinds robot programming software solutions?* ArtiMinds GmbH. URL: <https://www.artiminds.com/robot-programming-software/>. (zugegriffen: 15.11.2023).
- [38] Herbert Süße und Erik Rodner. „Kamerakalibrierung“. In: *Bildverarbeitung und Objekterkennung: Computer Vision in Industrie und Medizin*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 339–361. DOI: 10.1007/978-3-8348-2606-0\_15. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2606-0\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2606-0_15).
- [39] Haroon Ashraf, Wail A Mousa und Saleh Al Dossary. „Sobel filter for edge detection of hexagonally sampled 3D seismic data“. In: *Geophysics* 81.6 (2016), N41–N51.
- [40] *ArtiMinds Robot Programming Suite (RPS) Trainingshandbuch*. Techn. Ber. ArtiMinds Robotics GmbH, 2023.
- [41] *RS PRO Spannzwinde, Kniehebelzwinde x 16.9mm*. RS Components GmbH. URL: <https://de.rs-online.com/web/p/klemmen/0254670?gb=s>. (zugegriffen: 17.11.2023).
- [42] *CONNECTING AN EMERGENCY STOP DEVICE VS. A SAFEGUARD PROTECTIVE DEVICE*. Universal Robots A/S. URL: <https://www.universal-robots.com/articles/ur/application-installation/connecting-an-emergency-stop-device-vs-a-safeguard-protective-device/>. (zugegriffen: 17.11.2023).
- [43] *Visor Benutzerhandbuch*. Techn. Ber. SensoPart Industriesensorik GmbH, 2022.
- [44] *INSPECTION AND MAINTENANCE PLAN*. Universal Robots A/S. URL: <https://www.universal-robots.com/articles/ur/robot-care-maintenance/inspection-and-maintenance-plan/>. (zugegriffen: 02.12.2023).
- [45] *Betriebsmittel-Ausführungszeit taB*. International Process & Industrie Consult SA. URL: <https://refa-international.com/lexikon/b/betriebsmittel-ausfuhrungszeit-tab>. (zugegriffen: 01.12.2023).
- [46] *Betriebsmittel-Rüstzeit trB*. International Process & Industrie Consult SA. URL: <https://refa-international.com/lexikon/b/betriebsmittel-ruestzeit-trb>. (zugegriffen: 01.12.2023).
- [47] *CB3 TO E-SERIES PROGRAMS TRANSFERRING QUICK GUIDE*. Universal Robots A/S. URL: <https://www.universal-robots.com/articles/ur/interface-communication/cb3-to-e-series-programs-transferring-quick-guide/>. (zugegriffen: 20.11.2023).
- [48] *The URScript Programming Language*. Techn. Ber. Universal Robots A/S, 2016.

# Anhang

## 8.1 Analoger Anhang

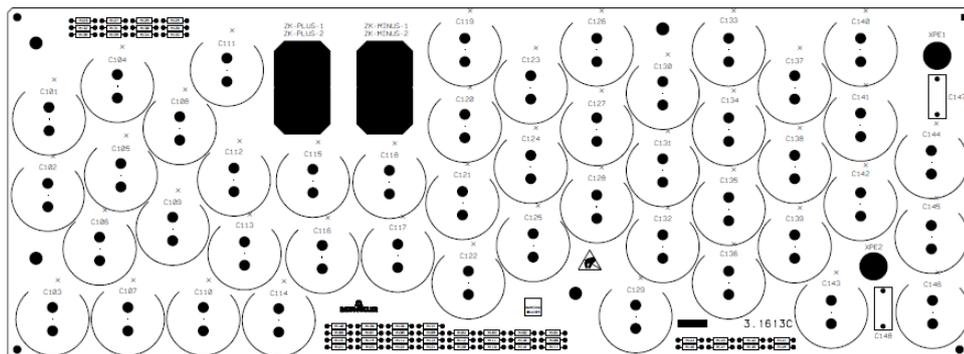
### Zusammenfassung der Varianten

#### 1. Variante AA00470111

#### Handbestückung

106

Pos.	Bezeichnung Typ EDV-Nr.	Kennzeichnung	Raster	Stück	Bemerkung	Pater- noster	Schale
1.	Leiterplatte 33.1613.XX.C/Autom. 00470107	<b>Festrüstung</b>		1	<b>Rahmen siehe Bild</b>		
2.	Kondensator 22n/300V 00411051	C147,C148		2		16-02	1
3.	Al-Elko 470µF/400V 00343344	C101,102,103,104,105,106, C107,108,109,110,111,112, C113,114,115,116,117,118, C119,120,121,122,123,124, C125,126,127,128,129,130, C131,132,133,134,135,136, C137,138,139,140,141,142, C143,144,145,146		46			2

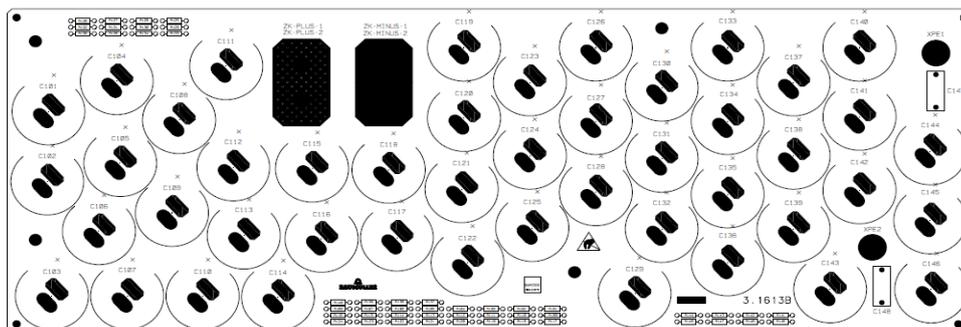


## 2. Variante AA00470112

### Handbestückung

106

Pos.	Bezeichnung Typ EDV-Nr.	Kennzeichnung	Raster	Stück	Bemerkung	Pater- noster	Schale
1.	Leiterplatte 33.1613.XX.C/Autom. 00470107	Material zusammengestellt		1	Rahmen siehe Bild		
2.	Kondensator 22n/300V 00411051	C147,C148		2		16-02	
3.	Al-Elko 470µF/400V 00463270	C101,C102,C103,C104,C105, C106,C107,C108,C109,C110, C111,C112,C113,C114,C115, C116, C117,C118, 119, C120, C121,C122,C123,C124,C125, C126,C127,C128,C129,C130, C131,C132,C133,C134,C135, C136,C137,C138,C139,C140, C141,C142,C143,C144,C145, C146		46	Wichtig B43541-A9477-M7  AICtech 105°		

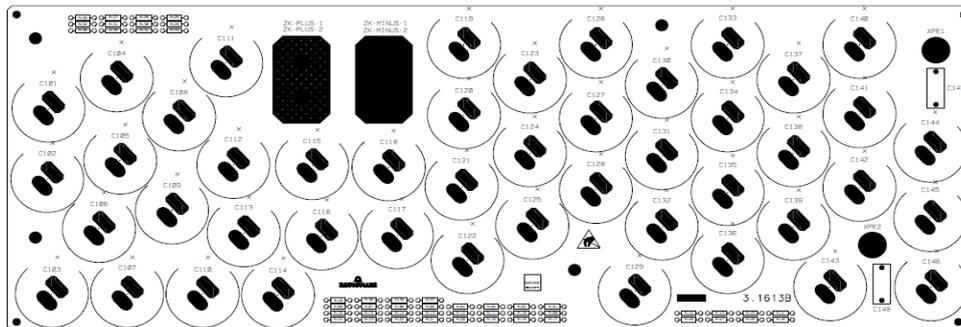


### 3. Variante AA00470113

#### Restbestückung

106

Pos.	Bezeichnung Typ EDV-Nr.	Kennzeichnung	Raster	Stück	Bemerkung	Pater- noster	Schale
1.	Leiterplatte 33.1613.XX.C/Autom. 00470107	Material zusammengestellt		1	Rahmen siehe Bild		
2.	Kondensator 22n/300V 00411051	C147,C148		2		16-02	
3.	Al-Elko 680µF/400V 00467809	C101,C102,C103,C104,C105, C106,C107,C108,C109,C110, C111,C112,C113,C114,C115, C116, C117,C118, 119, C120, C121,C122,C123,C124,C125, C126,C127,C128,C129,C130, C131,C132,C133,C134,C135, C136,C137,C138,C139,C140, C141,C142,C143,C144,C145, C146		46			

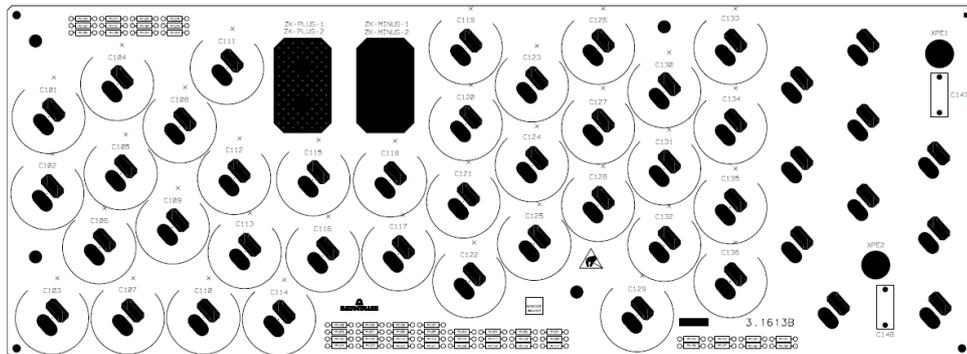


## 4. Variante AA00470110

### Restbestückung 161303C

106

Pos.	Bezeichnung Typ EDV-Nr.	Kennzeichnung	Raster	Stück	Bemerkung	Pater- noster	Schale
1.	Leiterplatte 33.1613.XX.C/Autom. 00470107	<b>Festrüstung</b>		1	<b>Rahmen siehe Bild</b>		
2.	Kondensator 22n/300V 00411051	C147,C148		2		16-02	
3.	Al-Elko 470µF/400V 00343344	C101,102,103,104,105,106, C107,108,109,110,111,112, C113,114,115,116,117,118, C119,120,121,122,123,124, C125,126,127,128,129,130, C131,132,133,134,135,136		36			

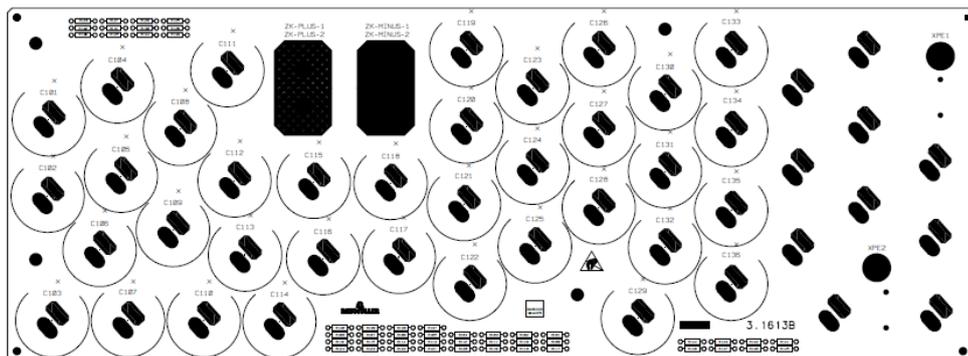


## 5. Variante AA00470116

### Handbestückung

106

Pos.	Bezeichnung Typ EDV-Nr.	Kennzeichnung	Raster	Stück	Bemerkung	Pater- noster	Schale
1.	Leiterplatte 33.1613.XX.C/Autom. 00470107	<b>Festrüstung</b>		1	<b>Rahmen siehe Bild</b>		
2.	Al-Elko 470µF/400V 00343344	C101,102,103,104,105,106, C107,108,109,110,111,112, C113,114,115,116,117,118, C119,120,121,122,123,124, C125,126,127,128,129,130, C131,132,133,134,135,136,		36			

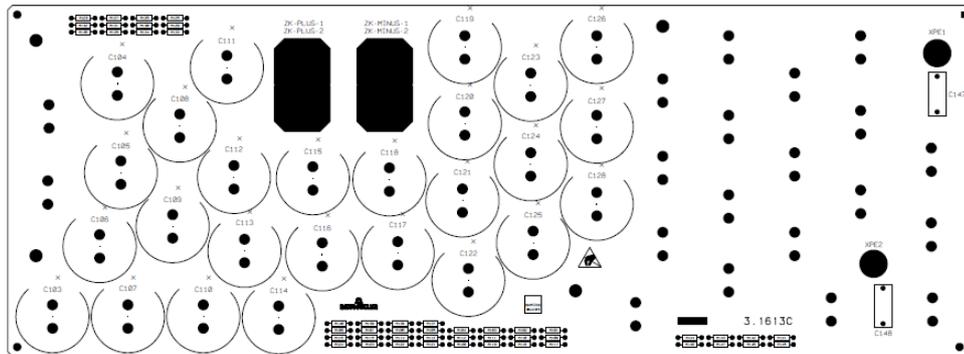


## 6. Variante AA00470109

### Handbestückung

106

Pos.	Bezeichnung Typ EDV-Nr.	Kennzeichnung	Raster	Stück	Bemerkung	Pater- noster	Schale
1.	Leiterplatte 33.1613.XX.C/Autom. 00470107	Festrüstung		1	Rahmen siehe Bild		
2.	Kondensator 22n/300V 00411051	C147,C148		2		16-02	
3.	Al-Elko 470µF/400V 00343344	C103,104,105,106,107,108, C109,110,111,112,113,114, C115,116,117,118,119,120, C121,122,123,124,125,126, C127,128		26			

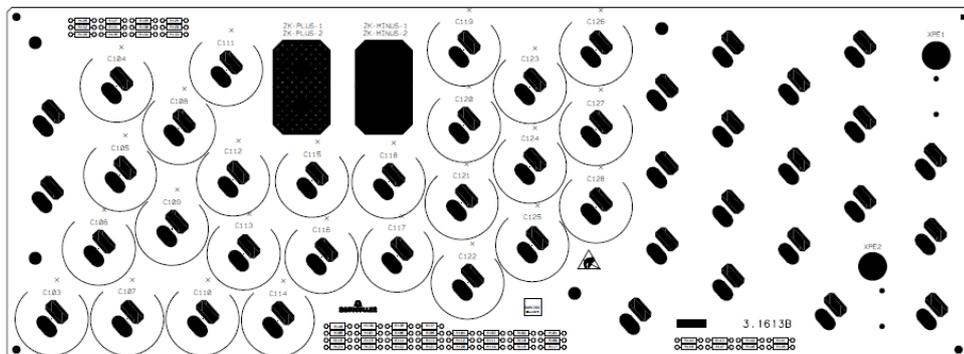


## 7. Variante AA00470115

### Handbestückung

106

Pos.	Bezeichnung Typ EDV-Nr.	Kennzeichnung	Raster	Stück	Bemerkung	Pater- noster	Schale
1.	Leiterplatte 33.1613.XX.C/Autom. 00470107	<b>Festrüstung</b>		1	<b>Rahmen siehe Bild</b>		
2.	Al-Elko 470µF/400V 00343344	C103,104,105,106,107,108, C109,110,111,112,113,114, C115,116,117,118,119,120, C121,122,123,124,125,126, C127,128		26			

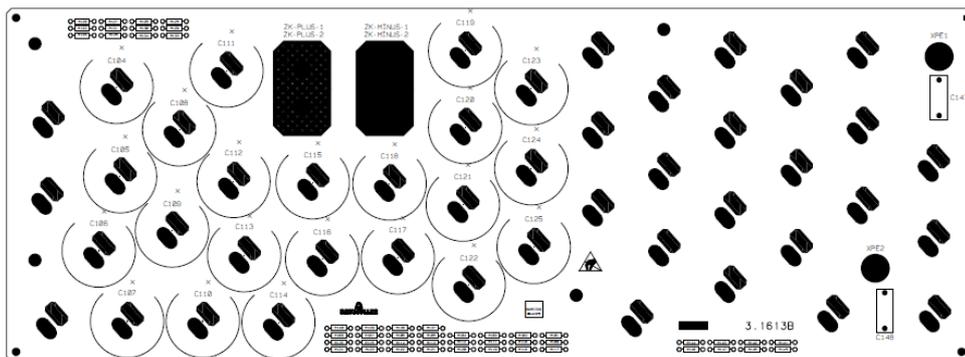


## 8. Variante AA00470108

### Handbestückung

106

Pos.	Bezeichnung Typ EDV-Nr.	Kennzeichnung	Raster	Stück	Bemerkung	Pater- noster	Schale
1.	Leiterplatte 33.1613.XX.C/Autom. 00470107	Festrüstung		1	Rahmen siehe Bild		
2.	Kondensator 22n/300V 00411051	C147,C148		2		16-02	
3.	Al-Elko 470µF/400V 00343344	C104,105,106,107,108,109, C110,111,112,113,114,115, C116,117,118,119,120,121, C122,123,124,125		22			

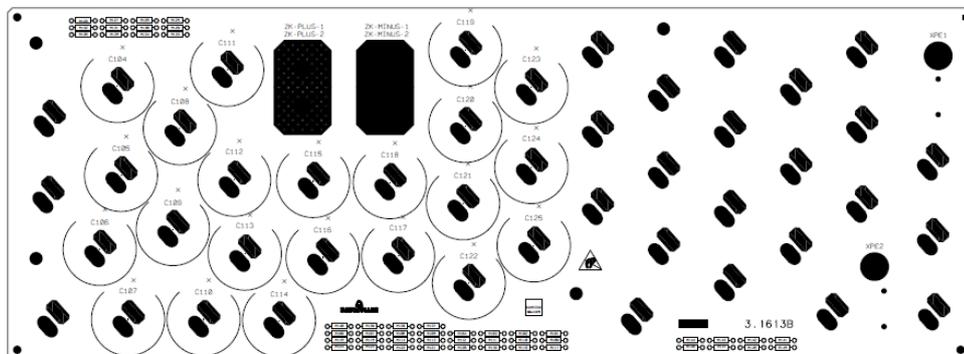


## 9. Variante AA00470114

### Handbestückung

106

Pos.	Bezeichnung Typ EDV-Nr.	Kennzeichnung	Raster	Stück	Bemerkung	Pater- noster	Schale
1.	Leiterplatte 33.1613.XX.C/Autom. 00470107	Festrüstung		1	Rahmen siehe Bild		
2.	Al-Elko 470µF/400V 00343344	C104,105,106,107,108,109, C110,111,112,113,114,115, C116,117,118,119,120,121, C122,123,124,125		22			



## Unterschiede der Varianten

### **Variante 1 - 3**

Gleiche Anzahl (46 Stück) an Kondensatoren für die robotergestützte Bestückung  
Unterschiedliche Kondensatortypen  
nachgelagerte Handbestückung von Folienkondensatoren

### **Variante 4 & 5**

Gleiche Anzahl (36 Stück) und gleiche Art an Kondensatoren für die robotergestützte Bestückung  
Unterschiede in der nachgelagerten Handbestückung von Folienkondensatoren

### **Variante 6 & 7**

Gleiche Anzahl (26 Stück) und gleiche Art an Kondensatoren für die robotergestützte Bestückung  
Unterschiede in der nachgelagerten Handbestückung von Folienkondensatoren

### **Variante 8 & 9**

Gleiche Anzahl (22 Stück) und gleiche Art an Kondensatoren für die robotergestützte Bestückung  
Unterschiede in der nachgelagerten Handbestückung von Folienkondensatoren

## **Fazit**

Es handelt sich letztlich um vier verschiedene robotergestützte Bestückungsvarianten, bei denen sich die Anzahl der zu bestückenden Kondensatoren unterscheiden. Der Unterschied der Kondensatoren bei den Varianten 1–3 ist noch zu betrachten. Gegebenenfalls unterscheiden sich hier die Höhe oder weitere Eigenschaften, welche Anpassungen erfordern.

## 8.2 Digitaler Anhang

Zusätzlich zum analogen Anhang liegt der wissenschaftlichen Arbeit eine SD-Karte mit folgendem Inhalt bei:

- **Datenblätter**

- Datenblatt des Elektrolytkondensators
- Datenblatt des Sicherheits-Positionsschalters
- Trainingshandbuch der Robot Programming Suite
- Bedienungsanleitung des Visors
- Benutzerhandbuch des Universal Robot

- **Konstruktionsdateien**

- CAD-Datei der Roboterzelle
- CAD-Datei des Leiterplattenhalters
- CAD-Datei der Greiferfinger Version 11
- CAD-Datei der Leiterplatte 3.1613
- CAD-Datei des Gegentrays
- CAD-Datei des Kalibrierplattenhalters
- CAD-Datei der Kameraaufnahme
- CAD-Datei der TCP-Spitze

- **Programmierung**

- Jobsatz der Kamera
- Programmablaufplan des Roboterprogramms
- Quellcode des Ablaufprogramms als UR-Script

- **Dokumente**

- digitale Version der Bachelorarbeit

## Erklärung nach § 30 Abs. 4 Nr. 7 APO THI

---

### Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die Arbeit selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Buxheim, 10. Januar 2024

---

Ort, Datum

R. Fürst

---

Unterschrift