



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Institut für
Fertigungstechnik und
Hochleistungslasertechnik



Diplomarbeit

Collaborative Robots zur Produktivitätssteigerung

Ihr Einsatz bei der Montage eines Einblasventils

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing. oder DI)

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und
Betriebswissenschaften von

Severin Heger

Mat.Nr.: 1026907

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Burkhard Kittl

Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik

Wien, im Januar 2020

Severin Heger

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einen Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, im Januar 2020

Severin Heger

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all Jenen bedanken, die mich auf meinem Weg durch das Studium und im Laufe dieser Arbeit unterstützten.

Zunächst gilt der Dank Herrn Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Burkhard Kittl, mein Betreuungsprofessor am Institut für Fertigungstechnik an der TU Wien, der es mir ermöglichte diese Diplomarbeit zu verfassen und Herrn Univ. Ass. Dipl.-Ing. Florian Pauker, der immer ein offenes Ohr für mich hatte und mich tatkräftig mit seinem Fachwissen und Verbesserungsvorschlägen im Laufe dieser Arbeit unterstützte.

An meine lieben Eltern: Ich möchte Euch von ganzem Herzen für Eure aktive Unterstützung über die vielen Jahren danken. Angefangen von meiner Kindheit bis zum abgeschlossenen Studium seid ihr mir immer mit positiven und manchmal auch – berechtigterweise – scharfen Worten zur Seite gestanden, habt mich motiviert und aufgemuntert in schwierigen Zeiten und mich zu dem geformt, was ich heute bin.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Großeltern für die große Liebe und Zuneigung bedanken, die ich besonders während meiner Zeit in Wien genießen durfte. An dieser Stelle sei noch das von meinem Großvater geerbte mathematische Verständnis zu erwähnen, das mich durch dieses Studium gebracht hat.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Freundin und Wegbegleiterin, bei meiner liebsten Stefanie, bedanken. Nur mit deinem Humor, deinem Verständnis und vielen guten Ideen konnte ich die letzten Studienjahre meistern. Du hast mir die Zeit währenddessen unbeschreiblich versüßt und mir gezeigt, was es heißt, bedingungslos geliebt zu werden. Danke, dass ich in Deinem Leben sein darf.

Kurzfassung

Der Einsatz von Robotern in Automations- und Fertigungstechnik ist bereits seit einiger Zeit üblich. Ihr Gebrauch beschränkt sich jedoch zum Großteil auf die Automobilindustrie und andere Industriesparten ähnlicher Größe oder auf Firmen, die auf die Fertigung großer Stückzahlen spezialisiert sind. Ein Grund hierfür sind hohe Investitionskosten, die bei einer Umstellung auf Vollautomation anfallen und, abgesehen von den Anschaffungskosten für die Industrieroboter selbst, auf die aufwendigen Sicherheitsvorkehrungen, Programmierung und Inbetriebnahme zurückzuführen sind. Mit einer Reduktion eben angeführter Kostenpunkte eröffnet sich auch für Klein- und Mittelunternehmen (KMUs), sowie Fertigungszentren mit der Produktion von kleinen Chargen die Möglichkeit, die Vorteile einer (Teil-) Automation nutzen.

Die folgende Arbeit beschäftigt sich mit einer erst kürzlich auf den Markt gekommenen Version eines Industrieroboters, der diese Bedingungen zu erfüllen vermag: Der kollaborierende Roboter. Er ist darauf ausgelegt, in unmittelbarer Nähe des Menschen ohne physische Sicherheitsvorkehrungen arbeiten zu können und mit diesem sogar direkt zu kollaborieren. Diese Arbeit zeigt anhand einer ausführlich durchgeführten Simulation eine derart mögliche Kollaboration und die Problemstellungen bzw. Vorteile, die sich daraus ergeben.

Abstract

The use of robots in automated industrial manufacturing and assembly is very common nowadays. However, usually one can find them as part of fully automated industrial manufacturing lines with a big quantity of output or other production cycles of a similar size. The enormous costs in investment, implementation, maintenance and safety measurements cause the rather rare use by smaller enterprises. A reduction of those costs could potentially change how robots are going to be used and especially make it an affordable and effective option for smaller businesses or for those, which produce a relatively small lot size.

This thesis provides a state-of-the-art analysis of a special industrial robot concept, that could provide a steppingstone for the above-mentioned development: the collaborative robot. It is designed to work within the same environment as human beings without the usage of extensive safety equipment and can therefore be used to work side by side and even collaborate with humans. This paper aims to provide one such potential collaborative effort and shows the possible problems and positive effects that can occur with such an implementation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Überblick über kollaborierende Robotik.....	8
2.1	Definition	8
2.2	Vorteile der Kollaboration von Mensch und Maschine.....	8
2.2.1	Wirtschaftlichkeit.....	8
2.2.2	Ergonomie	9
2.3	Grad der Zusammenarbeit	9
2.3.1	Gering.....	9
2.3.2	Mittel	10
2.3.3	Hoch	10
2.4	Beispiele aus der Industrie	11
2.4.1	ABB	11
2.4.2	KUKA.....	12
2.4.3	Universal Robots	13
2.4.4	BOSCH	14
2.4.5	Rethink Robotics.....	15
2.4.6	F&P Robotics.....	16
2.4.7	Vergleichstabelle	17
2.5	Blick in die Zukunft	18
3	Kollaborierende Montage eines Einspritzventils.....	20
3.1	Problemstellung und Ziele.....	20
3.2	Konzept.....	20
3.3	Einzelteil- und Baugruppenstudie Einspritzventil.....	22
3.4	Roboterwahl	24
3.5	Montageplanung.....	26
3.6	Layout	35
3.6.1	Arbeitsplatz	35
3.6.2	Der Robotertisch.....	36
3.6.3	Der Arbeitstisch	37
3.6.4	Förderband	38

3.6.5	Montagehilfen	39
3.6.6	Montagemaschinen	40
3.7	Simulation.....	42
3.8	Effektivitätsstudie	43
3.8.1	Zeitanalyse	43
3.8.2	Kostenerfassung.....	44
3.9	Lösungsansätze zur Umstellung auf Cobots	47
4	Resümee.....	52
5	Anhang.....	53
6	Literaturverzeichnis	54
7	Abbildungsverzeichnis.....	55
8	Tabellenverzeichnis.....	56
9	Abkürzungsverzeichnis	57

1 Einleitung

1950 stellte der Sci-Fi Autor Isaac Asimov in seinem Roman „Ich, der Roboter“ (inoffizielle) Roboter Gesetze auf, die durch die Erfindung des kollaborierenden Roboters zumindest teilweise zu realistischen Hinweisen wurden:

1. *Ein Roboter darf kein menschliches Wesen verletzen oder durch Untätigkeit zulassen, dass einem menschlichen Wesen Schaden zugefügt wird.*
2. *Ein Roboter muss, den ihm von einem Menschen gegebenen Befehlen gehorchen – es sei denn, ein solcher Befehl würde mit Regel eins kollidieren.*
3. *Ein Roboter muss seine Existenz beschützen, solange dieser Schutz nicht mit Regel eins oder zwei kollidiert.*

Diese Richtlinien gewinnen mit der rapiden Entwicklung der Robotertechnik der letzten Jahre immer mehr an Bedeutung. Mit der Geburt des kollaborierenden Roboters wurde auch das Augenmerk auf den 1. Punkt der Asimov'schen Gesetze gelegt. Im Speziellen, auf die Sicherheit des Menschen in unmittelbarer Nähe zum Roboter.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Stand der Technik kollaborierender Roboter und der Implementierung eines solchen in den Montageprozess eines Einspritzventils eines Dieselmotors.

Zunächst wird ein Überblick über die Funktionsweisen, die den Roboter im Speziellen von einem herkömmlichen Industrieroboter unterscheidet und die Vor- bzw. Nachteile seines Einsatzes in der industriellen Fertigung geboten, gefolgt von einem Benchmark-Vergleich der Spezifikationen aktuell am Markt befindlicher Modelle, welcher zur Auswahl eines Roboters für den praktischen Einsatz dient.

Ein Großteil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Simulation des praktischen Einsatzes eines Roboters in Kollaboration mit einem menschlichen Kollegen. Das Ziel ist eine Effektivitätsstudie, die den Vergleich eines Montageablaufs mit Roboter und ohne, also der rein manuellen Montage, erlaubt.

Zuletzt werden die Erfahrungswerte, die bei der simulierten Umstellung auf die halb-automatisierte Montage gesammelt wurden, dargelegt. Ähnlichen Projekten wird somit die Möglichkeit geboten, im Voraus einen Einblick über etwaig auftretende Problemstellungen zu bekommen und entsprechende Maßnahmen zu setzen.

2 Überblick über kollaborierende Robotik

2.1 Definition

Im Unterschied zu herkömmlichen Industrierobotern arbeiten kollaborative Roboter direkt mit dem Menschen zusammen. Es kann somit zum direkten Kontakt zwischen Menschen und Maschine kommen, da sich die Arbeitsbereiche der beiden überschneiden, ohne dass eine physische Sicherheitsgrenze, wie zum Beispiel Zäune oder Plexiglaswände, vorhanden sind. (Bauer, Bender, Braun, & Rally, 2016)

Damit bei der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) dennoch die Sicherheit der Mitarbeiter gewährleistet werden kann, sind die Maschinen selbst mit Sensoren wie Kraft- und Drehmomentmessern und/oder kapazitiven Sensoren ausgestattet, die einen unerwarteten Kontakt beider Parteien „erfühlen“ können und entweder zu einer Geschwindigkeitsreduktion oder zum gänzlichen Stillstand der Maschine führen. Zusätzlicher Einsatz peripherer, optischer Mittel (Lichtschraken oder Kamerasysteme) können erweiterten Schutz vor Verletzungen am Arbeitsplatz bieten.

Manche Systeme nutzen eine integrierte Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Roboter und Arbeiter, die dem Operator deutlich macht, wohin und in welcher Form die nächste Roboterbewegung ausfallen wird. Hierdurch können etwaige gefährliche Situationen, Kollisionen und Verletzungen von vornherein vermieden werden.

Die Sicherheitsanforderungen für kollaborierende Roboter werden in der Norm DIN ISO/TS 15066 festgehalten und von der DIN EN ISO 10218-1 und der DIN EN ISO 10218-2 für den gemeinen Industrieroboter unterstützt.

2.2 Vorteile der Kollaboration von Mensch und Maschine

2.2.1 Wirtschaftlichkeit

Durch die engere Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine kann eine Montage- oder Fertigungsaufgabe effizienter und flexibler als zuvor ausgeführt werden. Somit werden Produktivität und folglich die Wirtschaftlichkeit einer Anlage gesteigert.

Die erfolgreiche Kooperation lässt die besten Attribute beider Parteien bestmöglich zum Vorschein bringen. Während ein Roboter mit Eigenschaften wie Schnelligkeit, Präzision, Kraft und Ausdauer besticht, kann ein Mensch – zumindest zum derzeitigen Stand der Technik noch – mit seiner Intelligenz und der Fähigkeit Probleme kreativ zu lösen, den mechanischen Kollegen übertrumpfen (Zitat DIN 15066). Zusammen können die beiden eine symbiotische Einheit bilden.

So vermögen komplexe Aufgabenstellungen – sowohl im Vergleich zu Vollautomation als auch zu rein manueller Arbeit – durch den Einsatz von collaborative robots (kurz: Cobots) viel Zeit und Geld bei Konzeption, Programmierung und Ausführung einzusparen (Augustsson, Olsson, Christiernin, & Bolmsjö, 2014). Die Losgröße spielt hier eine besonders große Rolle. Gerade Klein- und Mittelunternehmen, die in Produktion und Montage durch kleine Stückzahlen, zum Teil stark individualisierte Produkte und durch immer geringer werdende Produktlebenszyklen zu hoher Flexibilität gezwungen sind, können durch den Einsatz von MRK profitieren. (Bauer et al., 2016)

2.2.2 Ergonomie

Einen großen Vorteil, der sich allerdings nicht unbedingt auf den wirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens auswirkt, bieten MRK-Systeme durch verbesserte Ergonomie am Arbeitsplatz. Der Roboter kann dem Arbeiter mit großer Ausdauer und Kraft unterstützend unter die Arme greifen. Er übernimmt Arbeiten mit ungünstigen Haltepositionen (z.B. Überkopfarbeiten) und ist im Stande große Greifweiten überwinden zu können. Zusätzlich kann ein Roboter eine monotone, repetitive Aufgabe mit höchster Wiederholgenauigkeit viel effizienter durchführen als der Mensch. (Bauer et al., 2016)

2.3 Grad der Zusammenarbeit

Der Grad der Zusammenarbeit kann grob in drei Kategorien eingeteilt werden.

2.3.1 Gering

Es besteht keine direkte Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Der Mensch spannt ein Werkstück lediglich auf eine Vorrichtung, die daraufhin in den Arbeitsbereich des Roboters, welcher durch eine Sicherheitsabgrenzung umgeben ist

(sog. Zelle), befördert wird, ohne dass der Arbeiter diese jemals betritt. Nach der Bearbeitung wird das Stück wieder aus der Fertigungszelle mittels Förderband, Drehtisch o.ä. herausgeführt. Eine Schweißzelle mit Drehtisch wäre ein Beispiel einer solch geringen Zusammenarbeit. (Shi, Jimmerson, Pearson, & Menassa, 2012)

2.3.2 Mittel

Es besteht direkte Interaktion, jedoch nur, wenn sich der Roboter im Stillstand befindet und keine Spannung an jeglichem Servomotor des Roboters angelegt ist. Der Arbeiter spannt das Bauteil direkt in den Greifer am Ende des Roboterarms oder in Spannbacken in unmittelbarer Nähe des Arms ein. Der Roboter setzt sich erst wieder in Bewegung, sobald der Mensch dessen Arbeitsbereich verlassen und – in den meisten Fällen – dies durch die Betätigung eines Knopfdrucks bestätigt hat. (Bauer et al., 2016; Shi et al., 2012)

2.3.3 Hoch

Mensch und Roboter arbeiten in direkter Nähe ohne trennenden Schutzzaun parallel an einem oder mehreren Werkstücken. Geschwindigkeit und Bewegungsabläufe können unter Umständen bei Meldung der Sensorik oder bei direkter Kommunikation zwischen beiden „Arbeitskollegen“ angepasst oder eventuell zur Gänze gestoppt werden. Dies geschieht entweder, um neue Aufträge einzuleiten, oder aber auch um Verletzungen zu vermeiden. (Shi et al., 2012)

Ferner können drei Unterkategorien unterschieden werden:

Koexistenz: Roboter und Mensch arbeiten gleichzeitig an zwei unterschiedlichen Werkstücken, ohne dass sich die beiden Arbeitsräume überschneiden. Es sollte somit zu keinem direkten Kontakt zwischen den beiden kommen.

Kooperation: Der Arbeiter befindet sich während seiner Tätigkeiten innerhalb des Bewegungsradius des Roboters während dieser ebenfalls in Aktion ist. Allerdings arbeiten die beiden nicht zur gleichen Zeit am selben Objekt.

Kollaboration: Mensch und Maschine teilen sich eine Arbeitsaufgabe und kollaborieren, um einem gemeinsamen Ziel am selben Produkt oder Werkstück entgegen zu arbeiten. (Bauer et al., 2016)

2.4 Beispiele aus der Industrie

2.4.1 ABB

ABB ist 2015 mit dem zweiarmigen kollaborierenden Roboters YuMi (kurz für You and Me) in den Markt eingestiegen (Bogue, 2016). Seine beiden Arme bestehen im Inneren aus einem Magnesium Gerüst, das von einem Plastikgehäuse mit zusätzlich polsterndem Material umgeben ist. Das Gesamtgewicht beträgt 34 kg. Beide „Hände“ sind mit Kameras ausgestattet, die eine genaue Positionierung ermöglichen, selbst wenn das Zielobjekt für herkömmliche Industrieroboter nicht präzise genug gelagert ist. Abgesehen von einem allgemeinen Adapterflansch, können für eine erhöhte Flexibilität am Ende eines jeden Arms entweder Servo-Greifer oder duale Vakuumsauger montiert werden.¹



Abbildung 2-1: YuMi¹

Die Programmierung erfolgt vereinfacht über die Teach-by-Demonstration Methode. Hierbei lenkt ein Mitarbeiter den Roboterarm per Hand in die gewünschten Positionen und markiert dabei bestimmte Wegpunkte für den Roboter durch eine App auf einem angeschlossenen Tablet. Zusätzlich werden dort auch die notwendigen Greifbewegungen eingegeben. Der Roboter speichert den Bewegungsablauf in seiner Steuerung ab und programmiert sich so quasi selbst. Dies hat den großen Vorteil, viel Zeit und Geld für relativ einfache Programmabläufe einsparen zu können, da die Einrichtung nicht unbedingt von einem Experten übernommen werden muss.

¹ <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/yumi>

Allerdings besteht immer noch die Möglichkeit der herkömmlichen Programmierung über die ABBs RAPID Programmiersprache, sollte Bedarf dafür bestehen.²

2.4.2 KUKA

Ursprünglich zur Verwendung im Weltraum konstruiert, brachte KUKA die beiden Cobots der Serie „LBR iiwa“ heraus (Bogue, 2016). Diese Bezeichnungen lassen sich auf „Leichtbauroboter“ und „intelligent industrial work assistant“ zurückleiten. Bei einer maximalen Traglast von 7 bzw. 14 kg gegenübergestellt einem Eigengewicht von 23.9, respektive 29.9 kg werden beide KUKA Roboter ihrem Namen gerecht.³



Abbildung 2-2: Kuka LBR iiwa⁴

Beide Roboter sind mit integrierten Drehmomentmessern in allen sieben Gelenken (Achsen) ausgestattet und verfügen so über eine sehr sensible Kollisionserkennung. In Gefahrensituationen kann dies zu sofortiger Geschwindigkeitsreduktion führen. Die Sensoren sind so sensibel, dass sich bei der Programmierung, die auf gleicher Weise wie bei ABBs YuMi erfolgt (s.o.), der Arm durch reine Handberührungen in die gewünschte Position leiten lässt. Zusätzliche Sicherheit und Leichtigkeit bieten abgerundete Ecken am Aluminium Gehäuse.³

Ähnlich wie ABBs YuMi findet sich auch hier die Eigenschaft, spontan und automatisch ungenaue Positionierungen auszugleichen, indem Konturen und Oberflächen von Werkstücken erkannt und bis zur exakten Position verfolgt werden können, ohne dass Kollisionsgefahr besteht.³

² <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/yumi>

³ <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/lbr-iiwa>

⁴ <http://www.directindustry.de/prod/kuka-roboter-gmbh/product-17587-1650349.html>

2.4.3 Universal Robots

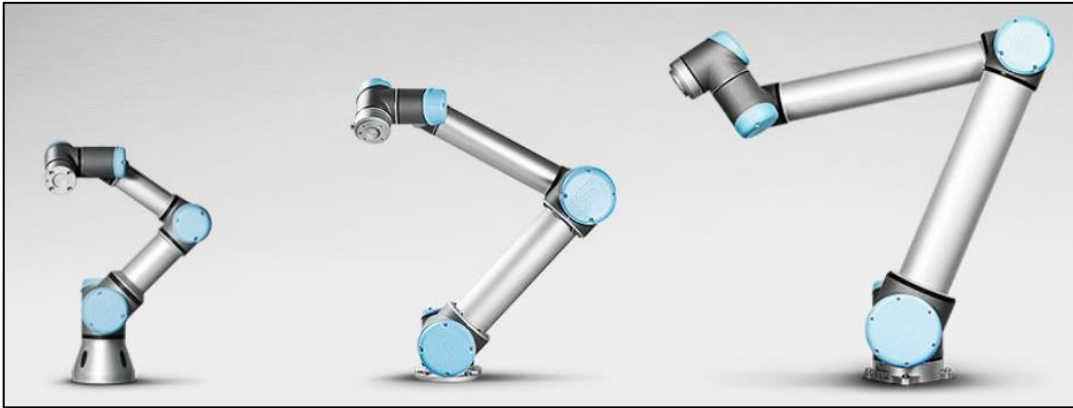


Abbildung 2-3: Universal Robots⁵

Bei Universal Robots stehen drei verschiedene Modelle einarmiger kollaborierender Roboter im Angebot, benannt nach deren jeweiliger maximaler Traglast. Siehe Abbildung 2-3 von links: UR3, UR5, UR10

Die Programmierbarkeit und sicherheitstechnischen Aspekte gleichen zu großen Teilen den oben beschriebenen Cobots. So ist auch hier eine Teach-by-Demonstration Programmierung mit zusätzlicher Hilfe und 3D Visualisierung auf mitgeliefertem Tablet möglich, welches auch eine Ausrichtung des Arms über Pfeiltasten erlaubt. Im Betriebszustand erkennt eine eingebaute Kraftregelung jeglichen Kontakt mit Hindernissen und bringt den Roboter auf der Stelle zum Stillstand. Sobald sich ein Mensch in den Arbeitsraum des Roboters begibt, schaltet dieser in einen kraft- und geschwindigkeitsreduzierten Modus, um die Sicherheit zu gewährleisten.⁶

Die erhöhte Produktivität durch den Einsatz kollaborierender Roboter lässt sich durch die geringe durchschnittliche Amortisationszeit von 195 Tagen veranschaulichen.

„Der UR5 braucht vier Stunden für Aufgaben, die bei manueller Arbeit zwei bis drei Tage in Anspruch nehmen würden. [...]“ (Zitat Geoff Escalette, CEO, RSS Manufacturing)⁷

⁵ <https://www.universal-robots.com/products/help-me-choose/>

⁶ https://www.universalrobots.com/media/1479185/10971_199917_ur_main_product_brochure_ger_low.pdf

⁷ <https://www.universal-robots.com/de/produkte/ur5-roboter/>

Ein Roboter kann zum Beispiel acht CNC-Maschinen gleichzeitig bedienen, während einem Menschen lediglich die Betreuung von drei Einheiten zur selben Zeit möglich ist.⁶

2.4.4 BOSCH

APAS, kurz für Automated Product Assistant, nennt sich die Reihe der Roboter für die direkte Kollaboration mit dem Menschen aus dem Hause BOSCH. Diese Serie kann in zwei Modelle unterteilt werden: APAS Assistent und APAS Inspector. Während letzterer eine automatisierte Qualitätskontrolle ermöglicht, ähnelt ersteres dem oben beschriebenen Produkt der Firma Universal Robots. Der Unterschied besteht in einer möglichen mobilen Ausführung (s. Abbildung 2-4) zur erweiterten Flexibilität.⁸ (Bogue, 2016)



Abbildung 2-4: APAS assistant F911-7m⁹

Ausgestattet mit einer 2D monochromen Übersichtskamera, 3D Stereokameras und integrierter Infrarot-Beleuchtung werden Objekte und Umgebung aufgefasst und verarbeitet. Eine kapazitive „Sensorhaut“ bietet kontaktlosen Schutz vor Kollisionen mit Personen. Optional kann ein Fernüberwachungsbereich eingerichtet werden. Solange sich kein Mensch in diesem befindet, kann der Roboter seine Tätigkeiten mit maximaler Geschwindigkeit und Effizienz ausführen. Bei Eintritt einer Person verlangsamen sich seine Bewegungen und kommen im Nahbereich zum Menschen

⁸ http://www.bosch-apas.com/de/apas/produkte/assistant/apas_assistant_3.html

⁹ http://www.bosch-apas.com/de/apas/produkte/assistant/beispiel__apas_assistant_auf_mobiler_plattform/apas_assistant_17.html

zum völligen Stillstand. Sobald diese Bereiche wieder verlassen werden, setzt der Roboter seine Aufgaben in angemessener Geschwindigkeit wieder automatisch fort.⁸

2.4.5 Rethink Robotics

Sawyer und Baxter nennen sich die beiden Varianten von collaborative robots, entwickelt von Rethink Robotics. Entweder mobil oder statisch erhältlich, sind beide Roboter standardmäßig mit einem Zweifingergreifer ausgestattet und auf Arbeiten wie Pick&Place, Packaging und Material Handling ausgerichtet. Die beiden Arme des Baxters können entweder gleichzeitig zwei unterschiedliche Aufgaben erledigen und so die Produktivität steigern oder miteinander kooperieren und an ein und demselben Stück gleichzeitig arbeiten. Rethink Robotics gibt an – ähnlich wie ein Mensch –, die ausgeübte Kraft durch die simultane Kontrolle des Drehmoments in den Gelenken und der Position zu überwachen und somit auf zusätzliche Sensoren verzichten zu können.

Wie in Abbildung 2-5 und Abbildung 2-6 erkennbar, erfolgt die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine über den „Kopf“, ein LCD-Display mit grafischer Benutzeroberfläche. Befindet sich der Roboter in Betrieb, wird ein Augenpaar angezeigt, das die Bewegungen des Roboterarms verfolgt und so dem menschlichen Mitarbeiter signalisiert, wohin er sich bewegen wird.^{10,11}



Abbildung 2-5: Sawyer¹¹



Abbildung 2-6: Baxter¹⁰

¹⁰ <http://www.rethinkrobotics.com/baxter/>

¹¹ <http://www.rethinkrobotics.com/sawyer/>

2.4.6 F&P Robotics

F&P Robotics AG ist ein 2014 gegründetes Schweizer Unternehmen, das mit seinem 6-achsigen Leichtbau Roboter P-Rob R2 auf dem Markt vertreten ist¹² (Bogue, 2016)

Der sichere Umgang mit seinen Kollegen aus Fleisch und Blut wird durch integrierte Kollisionserkennung, weiche Gehäusematerialien und reduzierten Krafteinsatz gewährleistet. Zusätzlich ist der Roboter mit „künstliche-Intelligenz“-Algorithmen ausgestattet, wodurch der Roboter jederzeit auf unerwartete Situationen entsprechend reagieren und selbstständig nach alternativen Lösungen zur gegebenen Problemstellung suchen kann.



Abbildung 2-7: P-Rob R2¹²

¹² from <http://www.fp-robotics.com/en/technology/>

2.4.7 Vergleichstabelle

	Max Traglast	Reichweite	Wiederhol- Genauigkeit	Max Speed (typ. Tool)
ABB YuMi	2 x 0.5 kg	2 x 500 mm	± 0.02 mm	1.5 m/s
KUKA LBR iiwa 7	7 kg	800 mm	± 0.1 mm	k.A.
KUKA LBR iiwa 14	14 kg	820 mm	± 0.15 mm	k.A.
Rethink Robotics Sawyer	4 kg	1260 mm	± 0.1 mm	1.5 m/s
Rethink Robotics Baxter	2 x 2.2 kg	2 x 1210 mm	± 0.1 mm	1.5 m/s
Universal Robots UR 3	3 kg	500 mm	± 0.1 mm	1 m/s
Universal Robots UR 5	5 kg	850 mm	± 0.1 mm	1 m/s
Universal Robots UR 10	10 kg	1300 mm	± 0.1 mm	1 m/s
BOSCH APAS Assistant	4 kg	911mm	± 0.03 mm	0.5 m/s
F&P Robotics P-Rob 2R	3-5 kg	775 mm	± 0.1 mm	k.A.

Tabelle 2-1 Schlüsseldatenvergleich^{13,14,15,16,17,18,19}

¹³ <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/yumi>

¹⁴ <http://www.fp-robotics.com/de/technology/>

¹⁵ http://www.bosch-apas.com/de/apas/produkte/assistant/apas_assistant_3.html

¹⁶ <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/lbr-iiwa>

¹⁷ <http://www.rethinkrobotics.com/baxter/>

¹⁸ <http://www.rethinkrobotics.com/sawyer/>

¹⁹ https://www.universal-robots.com/media/1479185/10971_199917_ur_main_product_brochure_ger_low.pdf

2.5 Blick in die Zukunft

Die Anwendung kollaborativer Roboter steckt zurzeit noch in den Kinderschuhen.

Laut einer Studie des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswissenschaften und Organisation IAO bezüglich des Einsatzes von Leichtbaurobotern in der manuellen Montage, bestehe bisher kaum Kollaboration, sondern lediglich Koexistenz zwischen den beiden Interaktionspartnern. Die größte Hürde seien die Neuheit der Technologie und einige damit verbundene Unsicherheiten, die jedoch mit steigender Erfahrung und wachsendem Vertrauen im Laufe der Zeit überwunden werden sollten. (Bauer et al., 2016)

Eine tatsächliche Bestätigung der erhöhten Wirtschaftlichkeit steht ebenfalls noch aus, da noch keines der in der Studie begutachteten Unternehmen einen klassischen Wirtschaftlichkeitsnachweis erbringen konnte. Vor allem die möglichen Kollisionen und die damit verbundene verhältnismäßig verlangsamte Bewegung der Roboterarme oder gar Notstopps werfen die Frage der verbleibenden Produktivität auf. (Bauer et al., 2016)

Die Amortisationszeit bei einem Einsatz von MRK-Systemen scheint gerade in der Anfangsphase dieser Technologie noch länger als bisherige Umstellungen auf einen automatisierten Betrieb zu sein. So fallen unerwartet hohe Kosten bei Erstimplementierungen an. Ähnlich wie bei der Vollautomatisierung setzen sich diese zu einem Drittel aus dem Roboter selbst und zu zwei Drittel aus sonstigen notwendigen Maßnahmen zusammen. Eine robotergerechte Materialbereitstellung ist derzeit ebenfalls noch mit einigem Aufwand verbunden, der allerdings im Laufe der Zeit mit immer intelligenteren Systemen und beweglicheren Roboterarmen reduziert werden könnte. Zudem wurden für die schutzzaunlose Verwendung neue Normen zu Sicherheit und Umsetzung eingeführt, mit denen die Firmen noch nicht vollends vertraut sind, und die neue Zertifizierungen verlangen. (Bauer et al., 2016)

Ein Roboter wird als unvollständige Maschine angesehen, deren Sicherheit nur im endgültigen Einsatzraum in Verbindung mit allen anderen mit ihm in Kollaboration stehenden Entitäten bestimmt werden kann. Dies hat zur Folge, dass die Vorteile der flexiblen Cobot-Nutzung zurzeit noch nicht völlig ausgeschöpft werden. Cobots befinden sich vorwiegend im stationären, meist nicht jedoch – wie möglich – in serienübergreifenden Einsatz. Ein weiterer Grund hierfür ist wohl der erhöhte

Schwierigkeitsgrad, der eine so mobile und unterschiedliche Nutzung mit sich bringen würde (Bauer et al., 2016). Die Zukunft geht jedoch immer mehr in die Richtung individuell zusammengestellter Produkte mit dem Ziel, auch sehr kleine Stückzahlen bis hin zum Unikat in einer flexiblen Massenfertigungseinrichtung effizient herstellen zu können (Edelmann & Anderegg, 2016).

Sind diese anfänglichen Schwierigkeiten einmal überwunden, und der Einsatz von kollaborierenden Robotern in der Industrie weiter verbreitet, so werden einige der oben genannten Kostenpunkte erheblich reduziert werden können und der „Return on Investment“ wird sich deutlich erhöhen. Laut Herstellerbrochuren befindet sich die durchschnittliche Amortisationszeit der Leichtbauroboterarme bereits jetzt bei 195 Tagen.²⁰

Augenblicklich ist man sich über die Auswirkungen eines hohen Automatisierungsgrades auf dem Arbeitsmarkt noch im Unklaren. Im Gegensatz zu einer vollautomatisierten Fertigungs- oder Montagestätte werden kollaborierende Roboter zur Unterstützung menschlicher Arbeiter eingesetzt, ohne diese zur Gänze zu ersetzen. Angesichts der derzeitigen intensiven Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der künstlichen Intelligenz ist der Zeitpunkt absehbar, ab dem der effiziente Einsatz der menschlichen Arbeitskraft in bestimmten Bereichen nicht mehr zu rechtfertigen ist.

Laut ABB kann man jedoch aus der Erfahrung vergangener großer technologischer Sprünge der Industrialisierung und dem damit einhergehenden Wirtschaftswachstum auch auf ein solches in der Zukunft schließen. Es mussten zwar einerseits Arbeitsplätze in bestimmten Bereichen eingespart werden, andererseits entstanden allerdings erst durch eben diese neuen Technologien neue Möglichkeiten und Arten der Arbeit, die zuvor noch gar nicht denkbar gewesen wären.²¹

ABB sieht eine Entwicklung der menschlichen Arbeit, weg von schwerem körperlichem Einsatz und monotonen Beanspruchungen, hin zu mehr kreativen und mentalen Aufgaben. Somit wird es zu einer Reduktion von sowohl arbeitsbedingter physischer als auch psychischer Belastungen und dadurch zu einer Erhöhung der Lebensqualität kommen.²¹

²⁰ https://www.universal-robots.com/media/1479185/10971_199917_ur_main_product_brochure_ger_low.pdf

²¹ <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/yumi>

3 Kollaborierende Montage eines Einspritzventils

3.1 Problemstellung und Ziele

Im folgenden Teil der Arbeit wird ein Konzept zur Anwendung kollaborierender Roboter ausgearbeitet. Im speziellen handelt es sich um die Montage einer Einspritzdüse eines Dieselmotors im Rahmen des Austrian Centers for Digital Production (CDP).

Zunächst erfolgt eine Analyse der benötigten Einzelteile sowie Baugruppen, um eine Abschätzung der nötigen Greif- und Handling-Aktionen erstellen zu können.

Die Absicht ist, einen möglichst effizienten Arbeitsplatz zu konstruieren, eine Simulation des gesamten Montageablaufs zu erstellen, Durchlaufzeiten zu messen und mit Daten der rein manuellen Montage zu vergleichen. Im Rahmen einer Effektivitätsstudie wird eine Aussage bezüglich der Rentabilität des Konzepts getroffen. Zusätzlich werden anhand von Problemen und Überlegungen, die während der Konzipierung auftreten, eine Reihe an „User Cases“ erstellt, die womöglich bei zukünftigen Projekten mit kollaborierenden Robotern als Hilfe herangezogen werden können.

3.2 Konzept

Im folgenden Kapitel wird das Konzept der semiautomatisierten flexiblen Arbeitszelle zur Montage einer Einspritzdüse beschrieben. Im Gegensatz zur rein manuellen Montage, soll hier ein Arbeiter bei dem Zusammenbau von einem kollaborierenden Roboter unterstützt werden. Da in diesem Montageprozess den beiden Arbeitskräfte Zugriff auf die bereitgestellten Einzelteile gestattet ist und sie sogar zur selben Zeit am gleichen Werkstück arbeiten werden, müssen sie sich in unmittelbarer Nähe zueinander aufhalten. Durch integrierte Sicherheitsmechanismen (siehe Kapitel 2.1) besteht die Möglichkeit, dass sich Roboter und Mensch im gleichen Arbeitsraum befinden können, ohne dass eine Verletzungsgefahr für den Arbeiter besteht.

Es wurde Augenmerk daraufgelegt, den Aufwand zur Umstellung von einer rein manuellen Montage auf eine „Cobot“-unterstützte Montage- oder Fertigungszelle möglichst gering zu halten. Aus diesem Grund wurden Maschinen, die bereits zur manuellen Montage verwendet werden, in den Prozess miteinbezogen. Hierbei handelt es sich um die Zwick Prüfmaschine Z050 und die Vercrimpungsmaschine SM

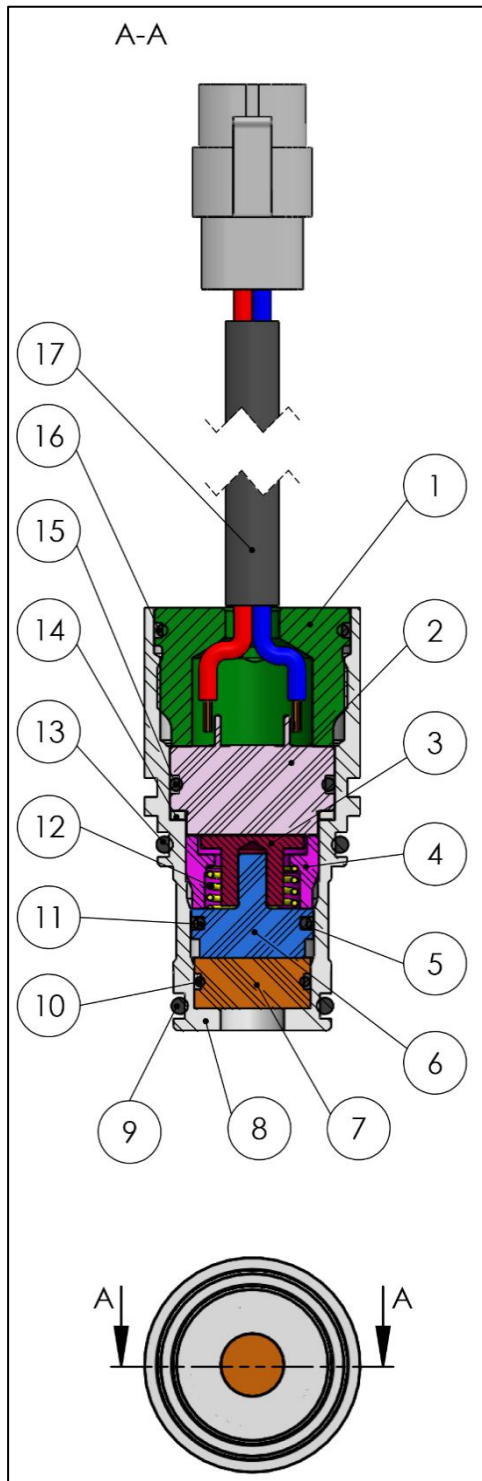
Crimp 2000 der Firma CETEC. Beide werden auch in diesem Montageprozess weiterhin ausschließlich vom Menschen bedient, da sie nicht für eine Handhabung durch einen Roboterarm ausgelegt sind.

Zur Veranschaulichung des Montagevorgangs beinhaltet diese Arbeit im Anhang eine CD mit der Simulation des kompletten Prozesses. So konnte eine Zeiterfassung durchgeführt und mit den aktuellen Durchlaufzeiten der manuellen Montage verglichen werden, um die Effizienz einer Umstellung auf einen kollaborierenden Vorgang zu ermitteln. Allerdings handelt es sich bei der Simulation um idealisierte Arbeitsbedingungen, und die Messdaten können deshalb nur als Richtwert zur Umsetzung in die Praxis genommen werden. Abgesehen von der Abwesenheit äußerer Einflüsse, fällt der Faktor Mensch vermutlich stark ins Gewicht. Die Montagezelle wurde mit Bedacht auf möglichst hohe Ergonomie gestaltet, die natürlich erst in der Realität einem Test unterzogen werden kann. Mit entsprechendem Feedback eines beteiligten Arbeiters kann der Arbeitsplatz klarerweise angepasst werden. Um den konstruktiven Aufwand bei diesem kontinuierlichen Verbesserungsprozess so gering wie möglich zu halten, wurde ein flexibles Zellenlayout erstellt: Sowohl die beiden Arbeitstische als auch die Materialbereitstellung sind individuell verschiebbar und können modular angeordnet werden.

Die Arbeitszelle wurde in der CAD-Software *SolidWorks* konstruiert und zur Simulation des Montagevorgangs in *Robotstudio*, einer Simulationssoftware für Roboter der Firma *ABB*, geladen.

3.3 Einzelteil- und Baugruppenstudie Einspritzventil

Aufschnitt des Einspritzventils



Die Komponenten des Ventils können in folgende Gruppen unterteilt werden:

- Einzelteile:

POS-NR.	BENENNUNG	MENGE
1	Adjustment Cap	1
2	Magnet	1
3	Anchor	1
4	Damper	1
6	Valvelifter	1
7	Seat	1
8	Housing	1
17	Cable	1

Tabelle 3-1: Einzelteilkomponenten des Einspritzventils

- Schüttgut bzw. Normteile:

POS-NR.	BENENNUNG	MENGE
5	Guide Ring	1
9	O-Ring 20.29x2.62	1
10	O-Ring 15x1.5	1
11	O-Ring 15x1.8	1
12	Spring	1
13	O-Ring 25.07x2.62	1
14	Wavespring	1
15	O-Ring 22x2	1
16	O-Ring 26.7x1.78	1

Tabelle 3-2: Schüttgut/Normteile des Einspritzventils

Abbildung 3-1: Aufschnitt des Ventils

Diese Unterteilung wurde vorgenommen, um eine effiziente Materialbereitstellung konzipieren zu können: Alle Einzelteile werden auf Paletten zu jeweils acht Stück mittels Förderbandes angeliefert, während das Schüttgut bereits in größerer Stückzahl permanent am Arbeitsplatz in Behältern zur Verfügung steht. (siehe Kapitel 3.6)

Zusätzlich wurde eine Einteilung in der Handhabbarkeit der Bauteile unternommen. Es handelt sich hierbei um ein wichtiges Kriterium in der Entscheidung, welche Arbeiten vom Roboter übernommen werden können und bei welchen Teilen das Fingerspitzengefühl des Menschen benötigt wird. Die Stückliste wurde hierbei um diverse Montagehilfen erweitert.

	Mensch	Roboter
Adj. Cap	X	X
Magnet	X	X
Anchor	X	X
Damper	X	X
Valvelifter	X	X
Seat	X	X
Housing	X	X
Cable	X	
Schüttgut	X	
Valve-Paket verpresst	X	X
Valve-Paket unverpresst	X	
Aufschiebhülsen	X	X
Montagestempel	X	X
Zentrierhülse	X	

Tabelle 3-3: Handhabbarkeit der Bauteile

3.4 Roboterwahl



Abbildung 3-2: ABB YuMi²²

Die Wahl eines kollaborierenden Roboters fiel auf den *YuMi* – IRB 14000 des Roboterherstellers *ABB*. Er ist ein preiswerter, zweiarmiger Roboter, der eine erhöhte Produktivität erwartet lässt. Abgesehen davon, dass er mit seinen beiden Armen – im Gegensatz zu den meisten „Cobots“ – eine größere Reichweite besitzt (siehe Kapitel 2.4.7), bietet der zusätzliche Arm den Vorteil der Möglichkeit von „Multitasking“. So können die beiden Arme zur gleichen Zeit entweder zwei voneinander unabhängige Aufgaben erledigen oder miteinander an demselben Werkobjekt arbeiten. Der menschliche Kollege wird dadurch noch mehr entlastet und befindet sich in der Lage, parallel seine Aufgabenliste abzuarbeiten.

Ein wichtiges Kriterium bei der Wahl des Roboters ist auch die Flexibilität: Der *YuMi* kann sich durch seine relative leichte Bauweise, bei – für dieses Projekt – ausreichender maximaler Traglast, auszeichnen. Die Tatsache, dass die für *ABB*-Roboter übliche Robotersteuerung „IRC5“ in den Körper des Roboters integriert ist, lässt ihn leichter transportieren, am jeweiligen Arbeitsort installieren und spart zugleich Platz. Optional ist der *YuMi* – pro Arm – mit einem Servo-Zweifingergreifer erhältlich, welcher nach Bedarf zusätzlich mit bis zu zwei Vakuumgreifern (siehe Abbildung 3-3) und einer Kamera ausgestattet ist. Dem Montageprozess der Einspritzdüse und dem Handling der Einzelbauteile angemessen, wurde auf beiden



Abbildung 3-3: ABB-Greifer²²

²² <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/yumi>

Armen jeweils ausschließlich ein Servo-Greifer installiert. Der mögliche Ausbau auf die Zusatzanwendungen des Greifers, macht den *YuMi* jedenfalls zu einer sehr flexibel einsetzbaren Arbeitskraft.

Als weiterer Vorteil des Modells erwies sich die mitgelieferte Simulationssoftware von ABB, mit der die 3D-Simulation des Montageprozesses erstellt werden konnte. (siehe Kapitel 3.7)

YuMi IRB 14000 – 0.5/0.5

Payload	0.5 kg per arm
Reach	559 mm
Accuracy	0.02 mm
Footprint	399 mm * 497 mm
Weight	38 kg
Customer interface	Foot interface
Mounting position	Table

Tabelle 3-4: Schlüsseldaten YuMi IRB 14000²³

²³ <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/yumi>

3.5 Montageplanung

Einer Montageanleitung des Einspritzventils zugrundeliegend wurde ein Flussdiagramm der kollaborierenden Montage erstellt, eingeteilt in Aufgaben, die vom Menschen bzw. den Roboterarmen und zusätzlichen Montagemaschinen übernommen werden. Eine grobe Einteilung bietet die erste Grundlage des Montageplans, des Arbeitsbereichs und für erste Simulationen. Ein ständiger Verbesserungsprozess konnte eingeleitet werden, um den optimalen Prozessablauf und somit die effektive Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Arbeitsressourcen zu gewährleisten.

In den Abbildung 3-4 und 3-5 ist der endgültige Montageablauf in Form eines Gantt-Diagramms dargestellt.

M	Mensch
R	Roboterarm
Z	Prüfmaschine Zwickl/Roell Z050
S	SM Crimp 2000

Tabelle 3-5 Arbeitsressourcenkürzel

Der gesamte Montageprozess wurde in Unterprozesse aufgeteilt, um alle Vorgänge übersichtlicher veranschaulichen zu können:

0 Montageprozess Einspritzventil

1 O-Ring Montage

1.1. O-Ring auf Valve Lifter

1.2. O-Ring auf Seat

1.3. O-Ring auf Magnet

1.4. O-Ring auf Housing

2 Valve Paket verpressen

3 Vercrimpung

4 Housing Montage

Tabelle 3-6 Montageprozesse

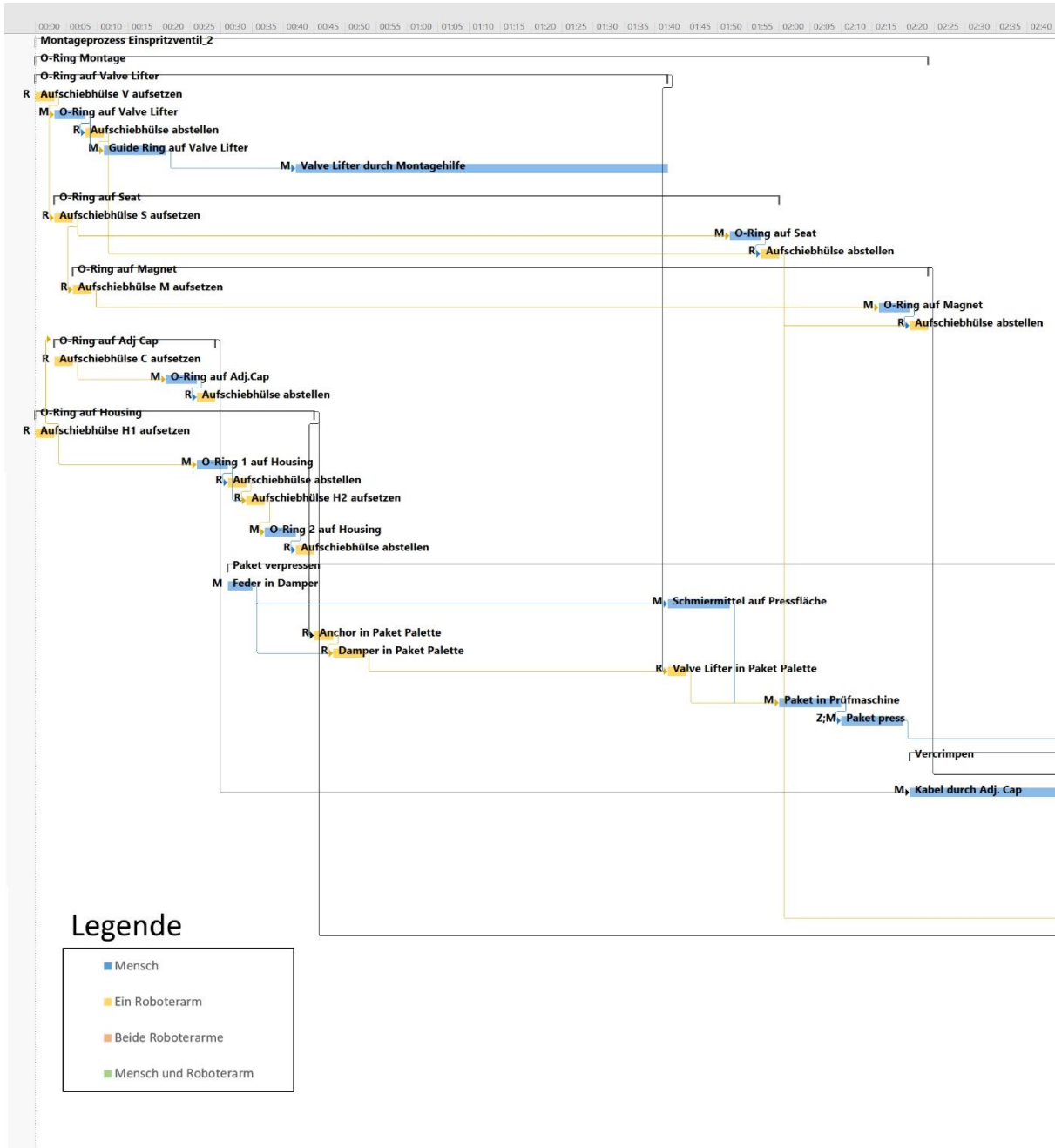


Abbildung 3-4: Gantt-Diagramm des Montageablaufs 1-2

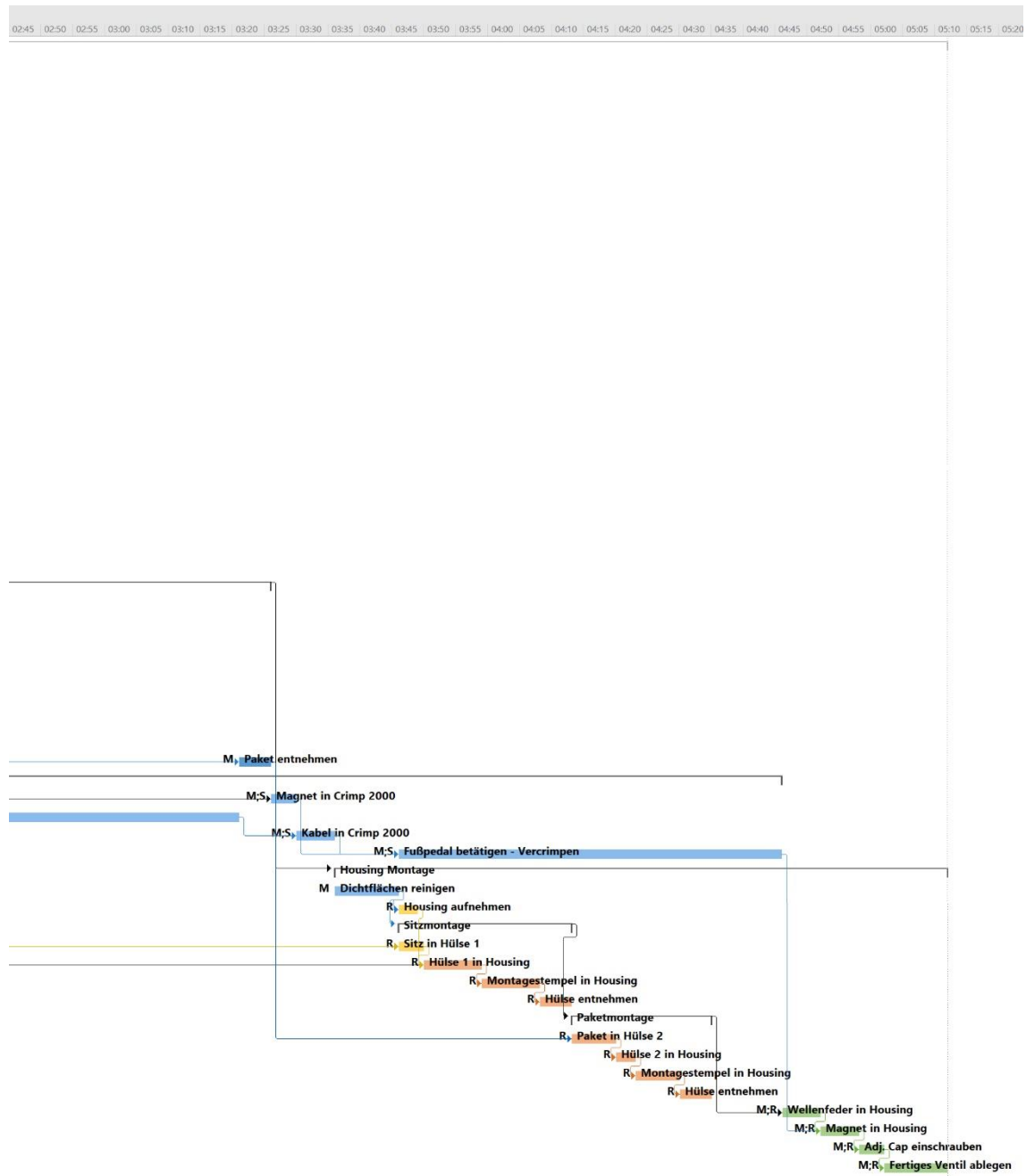


Abbildung 3-5 Gantt-Diagramm des Montageablaufs 2-2

Ad O-Ring Montage:

Vier Einzelteile müssen mit O-Ringen versehen werden, um die Abdichtung des Ventils zu garantieren. Der Vorgang gleicht dem, der rein manuellen Montage. Es befinden sich zwar Maschinen auf dem Markt, die eine O-Ring Montage komplett automatisiert durchführen können, jedoch bestand die Überlegung, dass der Einsatz von Maschinen, die normalerweise eher in einen rein automatisierten Montageablauf integriert werden, nicht für Kollaboration geeignet sind und daher die Absicht dieser Arbeit verfehlen. (siehe Kapitel 4)

Die O-Ring Montage wurde mit den folgenden Prozessschritten beschrieben.

1 O-Ring Montage

1.1	Aufschiebhülsen mit O-Ringen beladen	M
1.(...).1	Aufschiebhülse aufsetzen	R
1.(...).2	O-Ring aufschieben	M
1.(...).3	Aufschiebhülse auf nächstes Objekt	R

Tabelle 3-7 O-Ring Montage

Vor jedem Durchlauf – der aus der Montage von acht Einspritzventilen besteht – werden die Aufschiebhülsen mit jeweils acht O-Ringen beladen.

Die Aufschiebhülsen sind auf das jeweilige Bauteil angepasst und werden vom Greifer des Roboters auf dieses gesetzt. Im nächsten Schritt, dem Aufziehen des O-Rings, ist allerdings mehr Feingefühl gefragt. Um seine volle Dichtleistung erbringen zu können, darf der O-Ring bei der Montage weder beschädigt noch verdrillt eingebaut werden. Daher zieht der Mensch den O-Ring über die Aufschiebhülse auf das Bauteil auf.

Dieser Teilprozess veranschaulicht deutlich eine mögliche harmonische Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine. Jede Entität übernimmt Aufgaben, die auf die jeweiligen Fähigkeiten abgestimmt sind. Somit kann gleichzeitig auch kostbare Arbeitszeit eingespart werden. Der Roboterarm beschäftigt sich mit den repetitiven Aktionen des Hülsenergreifens und -aufsetzens, während der menschliche Arbeiter sein Fingerspitzengefühl einsetzt und schnell erkennen kann, ob der O-Ring richtig sitzt. Sollte der Dichtring während des Aufziehens beschädigt werden, kann der Arbeiter diesen umgehend austauschen.

Zum Abschluss des Arbeitsschritts nimmt der Roboter die Hülse wieder ab und setzt diese sofort auf das nächste Objekt. Zur gleichen Zeit kann der Mensch sich anderen Aufgaben widmen bzw. zum nächsten Bauteil übergehen und dort den O-Ring aufziehen.

Diese drei Schritte werden für die Bauteile Valve Lifter, Magnet und Sitz gleichermaßen ausgeführt. Der einzige Unterschied besteht bei der O-Ring-Bestückung des Gehäuses: Hier werden die drei Schritte wiederholt, da das Gehäuse mit zwei Ringen ausgestattet wird.

Ad Valve Paket verpressen:

Das Valve Paket wird mit Hilfe der Prüfmaschine Z050 von Zwick/Roell verpresst. Da es sich bei dieser Arbeit um eine Umstellung von rein manueller Montage auf die kollaborierende handelt und möglichst flexibel sein soll, wurde versucht, Elemente wie die Prüfmaschinen, direkt von der ursprünglichen Montage zu übernehmen. Die Erwägung, das Paket direkt mit dem Greifer des Roboters zu pressen, wurde durch die Tatsache, dass dafür rund 2,2 kN Presskraft nötig sind und der Greifer nur an die 100 N aufbringen kann, wieder verworfen.

Der Prozess wurde folgendermaßen unterteilt:

2 Valve Paket verpressen

2.1	Feder in Damper	M
2.2	Schmiermittel auf Pressfläche	M
2.3	Anchor in Paket-Palette	R
2.4	Damper in Paket-Palette	R
2.5	Valve Lifter in Paket-Palette	R
2.6	Paket in Prüfmaschine	M
2.7	Paket pressen	Z
2.8	Paket entnehmen	M

Tabelle 3-8 Valve Paket verpressen

Zunächst wird das Schmiermittel Lusin Lub UH 196-420 auf die Pressfläche in der Prüfmaschine aufgetragen.

Wollte man diese Aufgabe dem Roboter übertragen, bestünde die Möglichkeit, dass der Greifer durch Schmiermittel verschmutzen könnte. Es würde das Risiko bestehen, dass der Greifer die Verschmutzung auf andere Bauteile überträgt und somit die Qualität des Endproduktes gefährdet. Schmiermittel oder sonstige Unreinheiten an kritischen Stellen können die Dichtheit und folglich die Funktionstüchtigkeit des Ventils beeinträchtigen. Eine Abhilfe könnte mittels eines Werkzeugwechsels am Roboterarm erreicht werden, wodurch sich jedoch die Umstellung auf eine kollaborierende Montage verkomplizieren und sich zugleich negativ auf die Flexibilität der Montagezelle auswirken würde. Folglich wird das Befeuchten der Pressfläche vom Menschen übernommen.

Das Einlegen der Feder in den Dämpfer erfolgt ebenfalls von Menschenhand. Die Federn werden als Schüttgut bereitgestellt, womit eine standardisierte Aufnahme für den Roboter erschwert wird. Eine robotergerechte Materialbereitstellung mittels Sortierungsanlage würde den Rahmen dieses Projekts übersteigen. Die Möglichkeit der Erweiterung durch eine solche Anlage wird in Kapitel 3.9 näher beschrieben.

Der Anker, Dämpfer (mit der Feder bereits eingelegt) und der Valve Lifter werden vom Roboter in die Ablagepalette, die sich am Robotertisch zwischen den beiden Arbeitskräften befindet, zusammengesetzt. Dort können bis zu vier Pakete parallel gelagert werden. Daraufhin entnimmt der Mensch das Paket aus der Ablage und legt es in die Prüfmaschine ein.

Die Verpressung zu einem Paket erfolgt automatisch von der Prüfmaschine Zwick/Roell Z050, nachdem die Baugruppe korrekt auf der Einpressvorrichtung platziert wurde. Anschließend entnimmt der Arbeiter das Paket wieder und positioniert es auf der oben erwähnten Matrize, wo es bis zur Weiterverarbeitung gelagert wird. Der Arbeiter kann hier, bei Bedarf, eine stichprobenartige Kontrolle der Federspannung im Paket durchführen.

3 Vercrimpung

3.1	Magnet in Crimp 2000	M
3.2	Kabel durch Adj. Cap	M
3.3	Kabel in Crimp 2000	M
3.4	Fußpedal betätigen – Vercrimpen	M,S
3.5	Vercrimpes Kabel entnehmen	M

Tabelle 3-9 Vercrimpung

Wie in Tabelle 3-9 ersichtlich, wird der gesamte Prozess der „Vercrimpung“ vom Menschen gemeinsam mit der Splice-Maschine SM Crimp 2000 der Firma Cetec Systems übernommen. Diese Maschine wurde herangezogen, da bei der derzeitigen, manuellen Montage des Ventils dieses Modell verwendet wird und bei dieser Arbeit Wert darauf gelegt wurde, bereits vorhandene Ressourcen so gut wie möglich in den neuen Montageprozess zu integrieren.

Bei der sogenannten „Vercrimpung“ handelt es sich um den Prozess der formschlüssigen Verbindung zwischen den Dioden des Elektromagneten und des Kabels, das zur Ansteuerung des Ventils benutzt wird. Zunächst wird das Kabel durch die Ventilkappe (Adjustment Cap) gefädelt, da dies nach der „Vercrimpung“ mit dem Magneten nicht mehr möglich wäre. Beide Teile werden nun in die Maschine eingelegt und fixiert. Mittels Trittes auf einen Pedalschalter wird jeweils der Außenleiter und der Normalleiter mithilfe eines Splice verbunden, wobei die Reihenfolge keine Rolle spielt. Daraufhin wird das Kabel mit dem Magneten wieder aus der Fixierung entnommen und bis zur weiteren Verarbeitung abgelegt.

4 Housing Montage

4.1	Dichtflächen reinigen	M
4.2	Housing aufnehmen	R
4.3	Sitzmontage	R
	4.3.1 Seat in Hülse 1	R
	4.3.2 Hülse 1 in Housing	R
	4.3.3 Montagestempel in Housing	R
	4.3.4 Hülse entnehmen	R
4.4	Paketmontage	R
	4.4.1 Paket in Hülse 2	R
	4.4.2 Hülse 2 in Housing	R
	4.4.3 Montagestempel in Housing	R
	4.4.4 Hülse entnehmen	R
4.5	Wellenfeder in Housing	M
4.6	Magnet in Housing	M
4.7	Adj. Cap einschrauben	M
4.8	Fertiges Ventil ablegen	M

Tabelle 3-10 Housing Montage

Im abschließende Montageprozess werden die Einzelteile des Ventils in einem Gehäuse (Housing) zusammengesetzt. Zunächst reinigt der Arbeiter alle Dichtflächen mit Druckluft – nur eine saubere Montage garantiert die fehlerfreie Funktionsweise des Einspritzventils.

Sowohl Sitz (Seat), als auch Paket werden vom Roboter in das Housing mittels einer Montagehülse eingeführt: Der Greifer des linken Roboterarms nimmt die Hülse von der Werkzeugpalette auf, stülpt diese über das jeweilige Bauteil und nimmt es dadurch mit auf. Währenddessen ergreift der rechte Arm des Roboters ein Gehäuse. Daraufhin wird durch eine simultane Bewegung der beiden Arme die bestückte Montagehilfe in das Housing eingebracht und von der Rechten des *YuMi* in Position gehalten. Der

zweite Roboterarm ergreift den sogenannten Montagestempel und drückt den Sitz bis zum Anschlag des Gehäuses durch die Hülse nach unten. Die Montagehilfen werden entfernt und der Vorgang wird mit dem Valve Paket und einer eigenen Montagehülse wiederholt.

Die Verwendung dieser Hilfswerkzeuge setzt einerseits die nötige Reinheit des Endprodukts voraus, indem verhindert wird, dass Schmiermittel die Gehäusewand verschmutzen. Andererseits dienen die Hülsen als schmale Verlängerung des Robotergreifers, der ohne deren Einsatz zu breite bzw. zu kurze Abmessungen der Greiffinger für eine korrekte Befüllung des Ventilgehäuses mit einem Durchmesser von lediglich 32 mm hätte.

Die abschließenden Teilprozesse erfolgen über die Kollaboration zwischen Mensch und Maschine. Es handelt sich hierbei um den Einbau des Magneten, an dem – über das bereits eingefädelt Kabel (siehe Tabelle 3-9 Vercrimpung) – die Gehäusekappe (Adjustment Cap) hängt:

Das Gehäuse befindet sich nach wie vor zwischen den Fingern des rechten Robotergreifers. Der Arbeiter legt zunächst die Wellenfeder, die als Schüttgut angeliefert wird, und danach den Magneten in das Housing ein. Anschließend wird das Gehäuse aufgesetzt und aufgeschraubt, wobei der endgültige Ventildruck erst am nächsten Arbeitsplatz, auf einem Prüfstand, eingestellt wird.

Das Ventil wird zu abschließenden Einstellungen und Versiegelung auf dem Förderband abgelegt und abtransportiert.

Um Rüstzeiten zu reduzieren, besteht jeder Montagezyklus aus einer Losgröße von acht Stück. Dadurch können zusätzlich Arbeitsschritte gegen Ende der Montage des Stückes A mit den Anfangsarbeiten des Stückes B parallelisiert werden. Nach vollendeter Montage der gesamten Losgröße, werden die leeren Matrizen durch vollständige ersetzt und der Prozess beginnt von neuem.

3.6 Layout

3.6.1 Arbeitsplatz

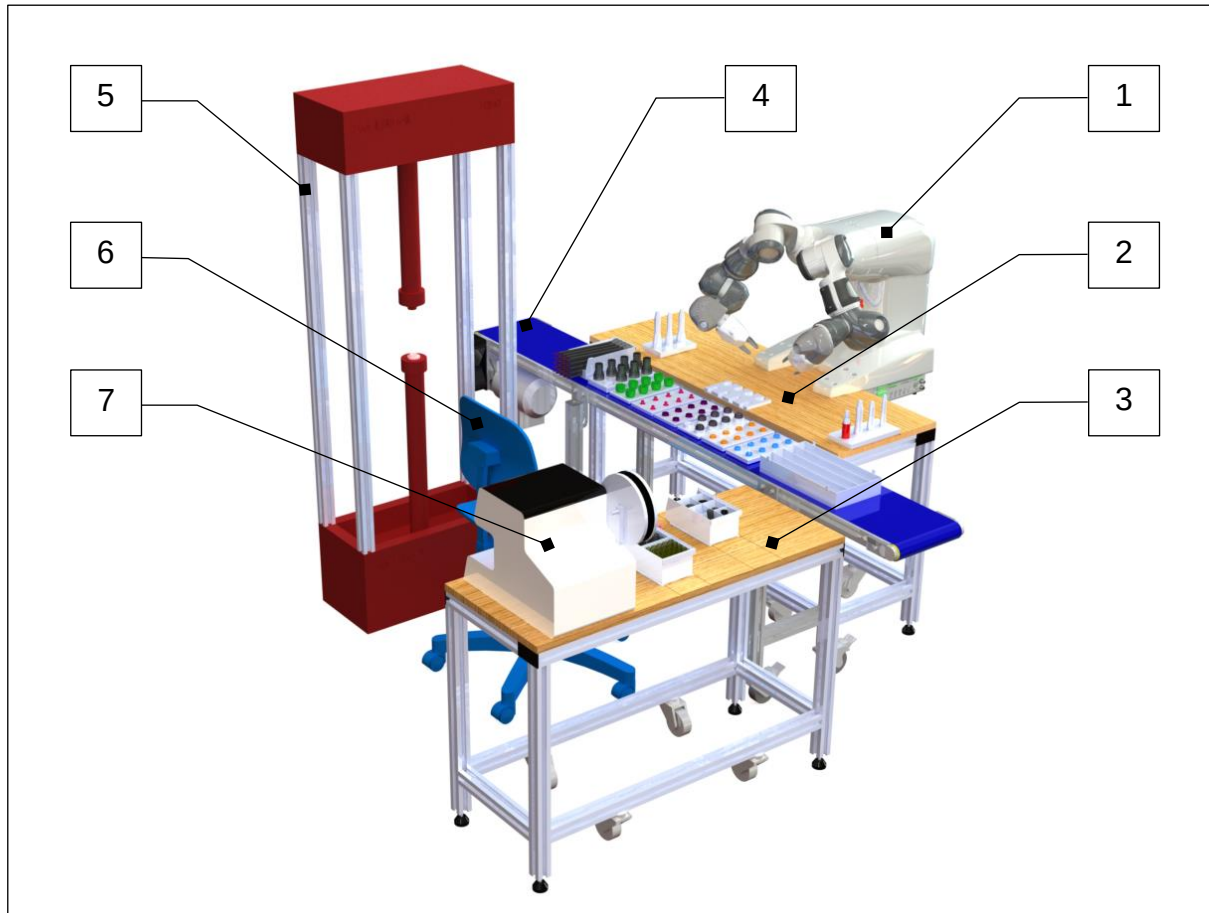


Abbildung 3-6: Layout der Montagezelle

Legende

1	ABB YuMi
2	Robotertisch
3	Arbeitstisch
4	Förderband
5	Zwick/Roell Prüfmaschine Z050
6	Drehstuhl ²⁴
7	CETEC SM Crimp 2000

Tabelle 3-11: Legende des Layouts

²⁴ Quelle CAD-Datei: <https://grabcad.com/library/basic-swivel-chair-bosch-1>

Die Montagezelle besteht aus drei individuell verschiebbaren Arbeitsoberflächen: Dem Robotertisch, dem Arbeitstisch des Menschen und einem Förderband, das zur Materialanlieferung und Weiterbeförderung genutzt wird. (siehe Abbildung 3-6) Zur Linken des Menschen befindet sich die Universalprüfmaschine Z050 von Zwick (Näheres in Kapitel 3.6.6 Montagemaschinen).

3.6.2 Der Robotertisch

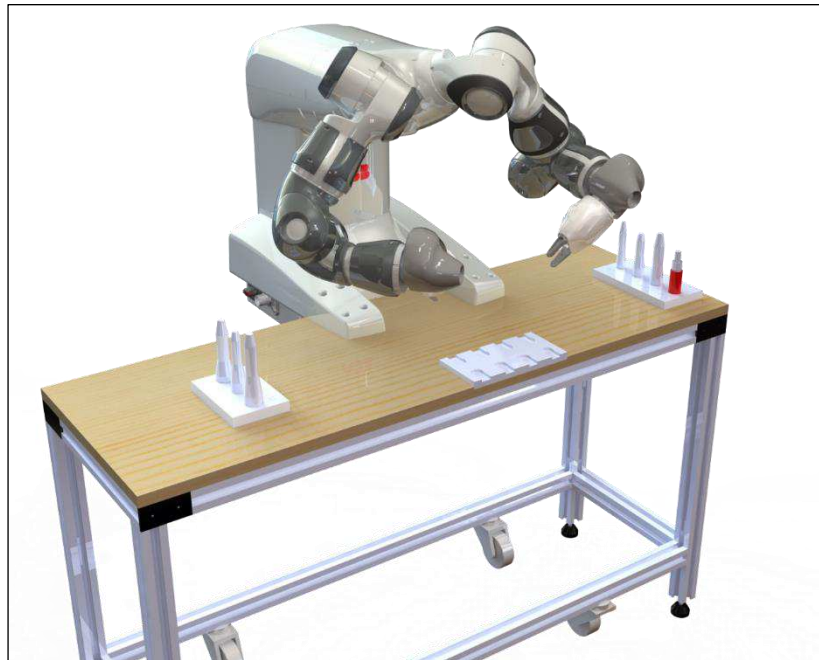


Abbildung 3-7: Robotertisch

In Abbildung 3-7 ist der Robotertisch zu sehen. Er besteht aus einem *Robotunits*-Gestell mit einer Holztischplatte. Der *YuMi* ist über Durchgangslöcher fest mit der Tischplatte verschraubt und ragt über die Rückseite des Tisches hinaus. Im Arbeitsbereich des Roboters befinden sich Ablageflächen bzw. Aussparungen in der Tischplatte für diverse Werkzeug- bzw. Ablagepaletten:

Die Aussparungen in der Tischplatte wurden deshalb konzipiert, damit sich die Paletten und somit die Werkzeuge bzw. Bauteile immer in derselben Position befinden, eine Vorgabe, die für einen effizienten Montagevorgang mittels Roboters unabdingbar ist. Zusätzlich wird durch die Verwendung von Paletten die Flexibilität der Arbeitszelle hochgehalten, indem die Möglichkeit besteht, die Paletten und somit die Werkzeuge austauschen oder entfernen zu können, sollte sich der Montageprozess verändern.

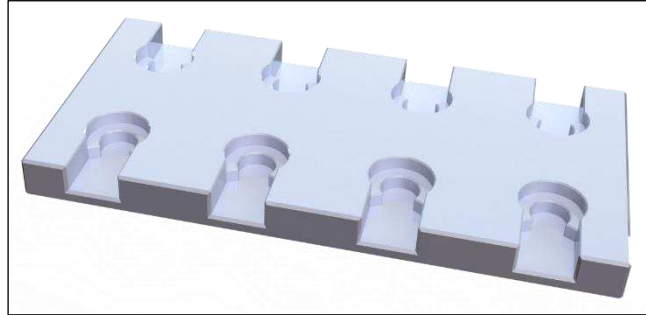


Abbildung 3-8: Paket-Palette

Auf der Frontseite des Robotertischs existiert eine Auskerbung für eine Palette, die zur Zusammensetzung und Ablage des Valve-Lifter-Pakets während der Montage genutzt wird:

Zunächst setzt hier der Roboter das Valve-Paket zusammen. Anschließend entnimmt der Arbeiter das Paket und legt es in die Zwick-Prüfmaschine ein. Nach erfolgter Verpressung legt der Mensch das Paket in der gegenüberliegenden Seite der Ablagepalette wieder ab. Zur leichteren Entnahme durch den Menschen existieren Nuten vom Rand der Palette bis zur Ablagefläche des Pakets (siehe Abbildung 3-8)

3.6.3 Der Arbeitstisch

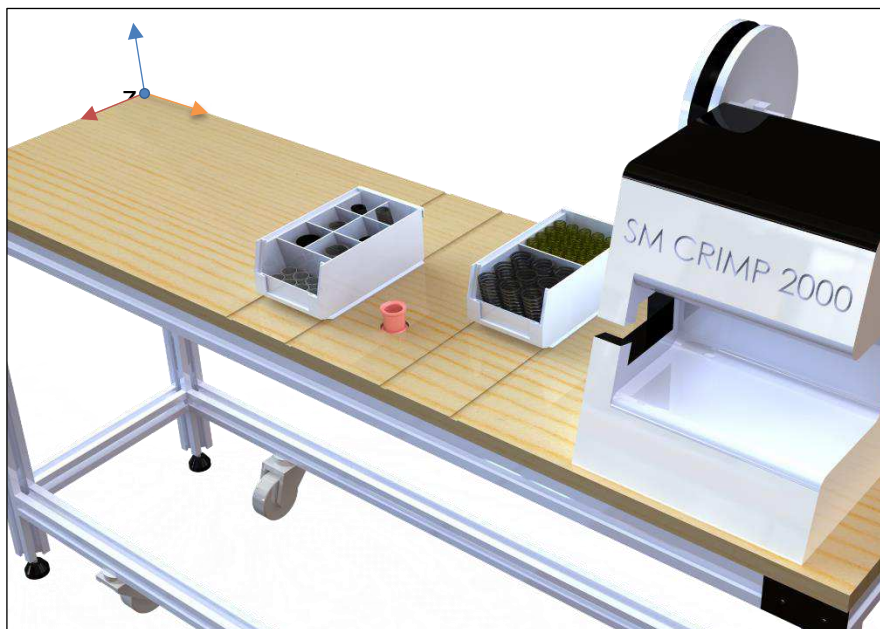


Abbildung 3-9: Arbeitstisch

Auf dem Arbeitstisch des Menschen befinden sich zwei Behälter: Einer ist für die diversen O-Ringe der Einzelteile und den Guide Ring des Valve-Lifters, der andere für Feder und Wellenfeder. Diese werden nicht – wie die restlichen Bauteile – über das Fließband angeliefert, da es sich hierbei um Schüttgut handelt und in größeren

Mengen für mehrere Montagedurchläufe bereits am Arbeitsplatz vorhanden sein kann. Beide Behälter werden über Nuten in der Tischplatte aufgezogen, wodurch diese über einen Freiheitsgrad verfügen. Die Fixierung in Y- und Z-Richtung (siehe Abbildung 3-9) verhindert ein versehentliches Umstoßen der Boxen und folglich die Ausschüttung der Kleinteile. Die Verschiebbarkeit in X-Richtung gewährleistet hingegen die Möglichkeit für den Arbeiter, die Behälter – je nach Arbeitsschritt und Komfort – in die gewünschte Entfernung zur Tischkante zu positionieren. So kann leichter Ordnung und Übersicht gehalten werden und zur gleichen Zeit die Ergonomie auf dem Arbeitsplatz erhalten bleiben.

Zwischen den beiden Schüttgut-Boxen befindet sich eine Aussparung für die Zentrierhilfe, die der Arbeiter zur Fixierung des Guide Rings auf dem Valve-Lifter heranziehen muss.

Am Ende des Arbeitstisches steht die Vercrimpungsmaschine SM Crimp 2000 der Firma CETEC. Näheres dazu siehe Kapitel 3.6.6 Montagemaschinen.

3.6.4 Förderband



Abbildung 3-10: Beladenes Förderband

Die Einzelteile der Einspritzdüse werden über ein Förderband, das sich zwischen Roboter und menschlichem Arbeiter befindet, bereitgestellt. Die Position und Maße ($b = 320\text{mm}$ inkl. Gestell; siehe Abbildung 3-10) des Gurtförderers des Automatisierungsunternehmens *Robotunits* wurden so gewählt, dass sowohl Roboter, als auch Mensch – mit Ausnahme des Schüttguts (s.o.) – Zugriff auf alle Bauteile haben. Zusätzlich ist noch genügend Platz für kollaborierende Arbeiten vorhanden, da

diese meistens im Luftraum über dem Robotertisch oder direkt auf dem Förderband stattfinden.

Wie schon die beiden Arbeitstische, befindet sich der Materialförderer ebenso auf einem mit Rollen bestückten Gestell, um schnelle Veränderungen an der Montagezelle zuzulassen.

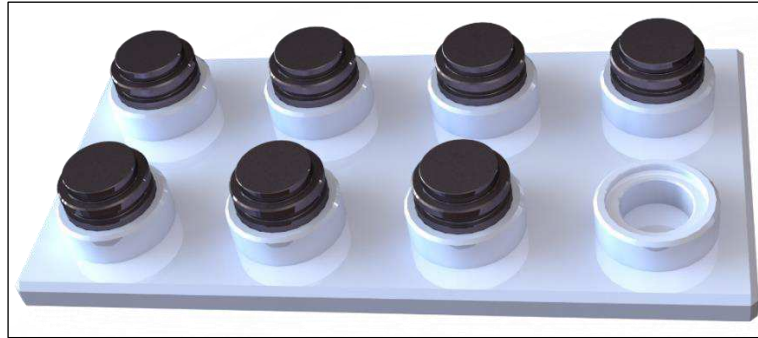


Abbildung 3-11: Beispiel einer Einzelteilpalette: Magnet

Die Einzelbauteile werden nicht auf dem Förderband direkt, sondern in individuell angepassten Paletten mit den Maßen 100mm x 200mm zu jeweils 8 Stück angeliefert. In Abbildung 3-11 wird als Beispiel eine Materialbereitstellungspalette mit Magneten gezeigt. Zur Veranschaulichung ist in der Abbildung bereits ein Magnet entnommen.

Nachdem alle acht Einspritzdüsen montiert wurden, werden die leeren Paletten über das Förderband wieder abgeführt und durch vollbesetzte Paletten ersetzt.

3.6.5 Montagehilfen

Die Montagehilfen wurden weitgehend von dem manuellen Montagevorgang übernommen und nur in ihren Dimensionen zur Benutzung durch den Roboter angepasst.

Es handelt sich um sechs Aufschiebhülsen zum Aufziehen der O-Ringe auf die Einzelbauteile: Eine Zentrierhülse zur Fixierung des Guide-Rings auf dem Valve-Lifter, einen Montagestempel und jeweils eine Montagehülse zur erleichterten Einsetzung des Sitzes bzw. des Presspakets (in Abbildung 3-12 in rot). Die Montagehülsen garantieren zusätzlich, dass das Gehäuse nicht versehentlich verschmutzt und dadurch die Funktionalität des Endprodukts negativ beeinflusst wird.

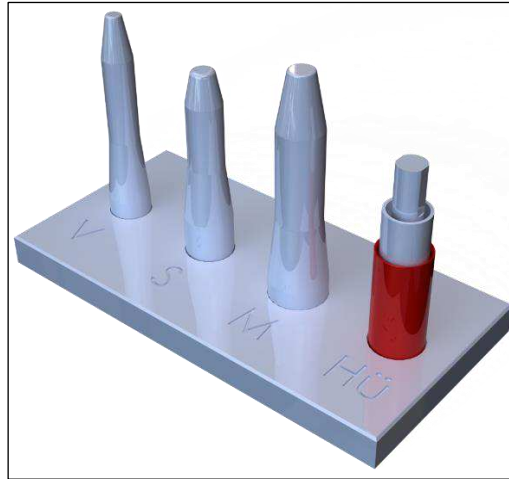


Abbildung 3-12: Montagehilfen in Palette

Mit Ausnahme der Zentrierhülse beinhalten die beiden Paletten seitlich des Roboters Aussparungen für die oben erwähnten Montagehilfen, welche in der Reihenfolge ihrer Anwendung angeordnet sind. Auf der Palette sind die Aufschiebhülsen mit den Anfangsbuchstaben des jeweils zugehörigen Bauteils markiert, um Verwechslungen bei der Be- und Entladung zu vermeiden. Wie aus Abbildung 3-7: Robotertisch auf Seite 376 und Abbildung 3-12 ersichtlich wird, befinden sich zusätzlich zu den Aufschiebhülsen auf der Palette zur Linken des Roboters eine Aussparung für die beiden Montagehülsen und den Montagestempel, die, um Platz zu sparen, ineinander gestapelt werden können.

3.6.6 Montagemaschinen

Aus der manuellen Montage wurden zwei Montagemaschinen in den kollaborierenden Prozess miteinbezogen. Die Wiederverwendung dieser Maschinen erleichtert einerseits den Umstieg auf den roboterunterstützten Montageprozess, andererseits sind die jeweiligen Aufgaben, die diese Maschinen übernehmen, unabdingbar und nicht durch einen kollaborierenden Roboter selbst zu erledigen. Im erstellten Layout in Abbildung 3-6 der Montagezelle werden beide Maschinen aus rechtlichen Gründen nur durch symbolische CAD-Modelle dargestellt.

Zwick/Roell Prüfmaschine Z050:



Die Arbeitsaufgabe der Prüfmaschine besteht darin, den Valve-Lifter, die Feder, den Dämpfer und den Anker zu einem kompakten Paket zu verpressen. Die hierzu benötigte Druckkraft von 2,2 kN kann weder von den Fingern des Greifers, noch von dem Roboterarm aufgebracht werden.

Die Zwick Prüfmaschine befindet sich zur Linken des Arbeiters (siehe Abbildung 3-6), welcher diese mit dem vom Roboter zusammengesetzten Paket belädt. Der Arbeiter übernimmt ebenfalls die Bedienung der Prüfmaschine und entlädt diese auch wieder.

Abbildung 3-13: Zwick/Roell Z050²⁵

CETEC SM Crimp 2000:

Ähnlich der Prüfmaschine (s.o.) kann in diesem Montageablauf nicht auf die Vercrimpungsmaschine SM Crimp 2000 verzichtet werden. Sie dient zur Vercrimpung (auch Splicing genannt) des Kabels mit dem Magneten. Da dieser Arbeitsschritt erst stattfinden kann, nachdem das Kabel durch die Kappe des Ventils gezogen wurde, kann dieses Verfahren auch erst während der Montage manuell durchgeführt werden und nicht bereits vollautomatisiert im Vorfeld.



Abbildung 3-14: CETEC SM Crimp 2000²⁶

Im Arbeitsbereich befindet sich die Maschine zur Rechten des Arbeiters. (siehe Abbildung 3-6) Sie wird mittels eines Fußpedals bedient.

²⁵ <https://www.zwickroell.com/en/products>

²⁶ <https://www.cetec.co.at/seb-page-sections-demo/>

3.7 Simulation

Mit Hilfe der Simulationssoftware *Robotstudio* von *ABB* wurde die Simulation eines vollständigen Montageprozessablaufs erstellt. Diese Software bietet die Möglichkeit, eine virtuelle Robotersteuerung sowohl grafisch als auch direkt im Skript zu programmieren. Diese virtuelle Steuerung entspricht dem exakten Abbild der realen Steuerungssoftware des Roboters, wodurch das virtuell geschriebene „RAPID“-Programm nach erfolgreicher Simulation direkt übernommen und auch auf den realen Roboter geladen werden kann.

Robotstudio ist eine Simulationssoftware, die ausschließlich auf die Simulation und Programmierung von *ABB* Robotersystemen ausgelegt ist. Daher kann in der vorliegenden Studie die menschliche Beteiligung am Montageprozess auch nur durch eine „durch den Raum fliegende Hand“²⁷ angedeutet werden. (siehe Abbildung 3-15)

Es wird jedoch davon ausgegangen, dass der in der Realität beschäftigte Arbeiter den Montageprozess mit zwei Händen verrichtet.

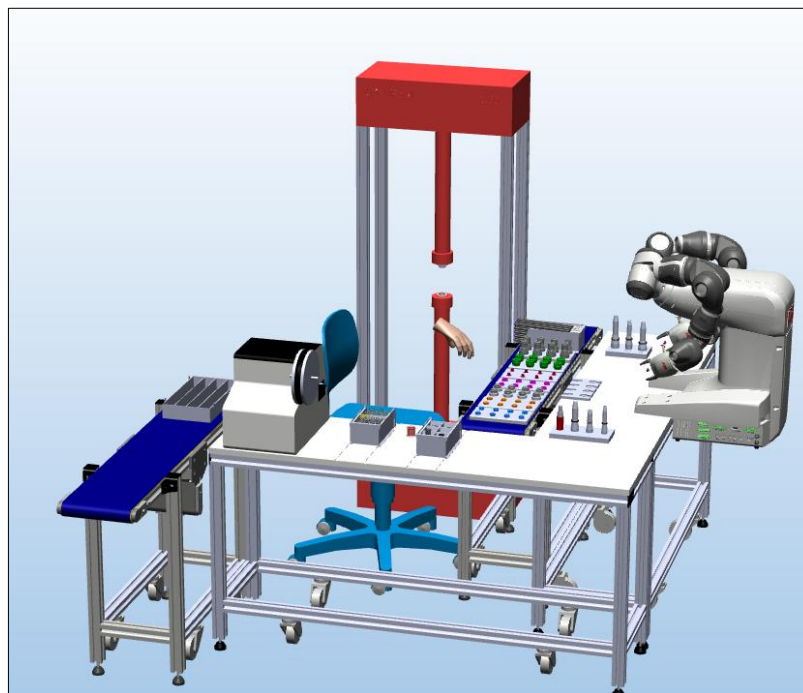


Abbildung 3-15: Screenshot der Simulation in Robotstudio

Die vollständige Simulation befindet sich auf einem digitalen Medium im Anhang dieser Arbeit.

²⁷ Quelle CAD-Datei: <https://grabcad.com/library/human-body-model-joints-for-fusion360-1> (abgeändert)

3.8 Effektivitätsstudie

3.8.1 Zeitanalyse

Laut dem Messbericht im Rahmen eines Montageworkshops beträgt die Montagezeit eines Einspritzventils bei der manuellen Montage $t_M = 8 \text{ Minuten}$.

Dies gilt als Referenzwert, um die Effektivität der Umstellung auf eine kollaborierende Montage zu messen. Mit Hilfe der Simulation (siehe beigelegtes digitales Medium) konnte die Durchlaufzeit des semiautomatisierten Montagevorgangs ermittelt werden:

Vorgangsname	Dauer	Anfang	Ende
Montageprozess Einspritzventil	312 Sek	00:00	05:12
1 O-Ring Montage	229 Sek	00:00	03:49
2 Paket verpressen	142 Sek	00:03	02:25
3 Vercrimping	150 Sek	02:16	04:46
4 Housing Montage	101 Sek	03:31	05:12
4.1 Dichtflächen reinigen	10 Sek	03:31	03:41
4.2 Housing aufnehmen	3 Sek	03:41	03:44
4.3 Sitzmontage	31 Sek	03:41	04:12
4.4 Paketmontage	22 Sek	04:12	04:34
4.5 Wellenfeder in Housing	6 Sek	04:46	04:52
4.6 Magnet in Housing	6 Sek	04:52	04:58
4.7 Adj. Cap einschrauben	4 Sek	04:58	05:02
4.8 Fertiges Ventil ablegen	10 Sek	05:02	05:12

Tabelle 3-12: Durchlaufzeiten der Montageprozesse

Die kollaborierende Montagezeit für ein Stück beträgt $t_{K,theo} = 5,2 \text{ min}$.

Da es sich bei der Simulation um idealisierte Arbeitsbedingungen ohne jegliche äußeren Einflüsse oder sonstige Störfaktoren handelt, wurde die rein theoretisch ermittelte Zeit mit einem Aufschlag von 10% als „Praxisfaktor“ versehen:

$$t_K = 5,2 \text{ min} * 1,1 = 5,72 \text{ min} \quad (1)$$

Im Vergleich zur rein manuellen Montage erbringt die Unterstützung des kollaborierenden Roboters *YuMi* eine Zeitersparnis von

$$\Delta t = 8 \text{ min/Stk} - 5,72 \text{ min/Stk} = \mathbf{2,28 \text{ min/Stk}} \quad (2)$$

Dies kommt einer Reduktion der Montagezeit von 28,5% gleich, wodurch die Produktion von 7,5 *Stk/h* um 39,86% auf 10,49 *Stk/h* steigt.

3.8.2 Kostenerfassung

Erst durch eine Kostenerfassung und die Ermittlung Kapitalwerts C_0 zum Investitionszeitpunkt kann eine eindeutige Aussage über die Effektivität der Umstellung auf eine kollaborierende Montage getroffen werden.

Zur Berechnung des Kapitalwerts wurden folgende Annahmen getroffen:

- Eine Montagezelle produziert 15.000 Einspritzventile pro Jahr.
- Die geschätzten Investitionskosten I_0 des *ABB YuMi* liegen bei \$40.000 und somit bei ca. €35.000.²⁸
- Installationskosten und sonstige Investitionskosten des Arbeitsplatzaufbaus bzw. der Materialbereitstellung I_{sonst} betragen in etwa €5.000
- Instandhaltungskosten werden mit 10% *p.a.* der Investitionskosten abgeschätzt: €3.500 *p.a.*
- Die Nennleistung des Roboters beträgt 360 *W*.
- Betriebskosten werden mithilfe des österreichischen Industriestrompreises von 12,14 *Cent/kWh* berechnet.²⁹
- Der Stundensatz für Werksarbeiter liegt bei 88 €/h.
- Die Arbeitszeit liegt bei einer täglichen Schicht zu 8h/*Tag* und 250 *Arbeitstage/Jahr*
- Die Laufzeit des Projekts ist auf $T = 3 \text{ Jahre}$ angesetzt.
- Der Kalkulationszinssatz $r = 0,5\% \text{ p.a.} = \text{const.}$

²⁸ <https://cobotsguide.com/2016/06/abb-yumi/>

²⁹ <https://oesterreichsenergie.at/daten-fakten-zum-strompreis.html>

Die variablen Produktionskosten bei manueller Montage bestehen aus den Personalkosten des Arbeiters

$$k_M = \frac{8 \text{ min/Stk}}{60 \text{ min/h}} * 88 \text{ €/h} = 11,73 \text{ €/Stk} \quad (3)$$

Die variablen Produktionskosten bei kollaborierender Montage

$$k_K = k_{K.A} + k_{K.R} \quad (4)$$

setzen sich aus den Personalkosten

$$k_{K.A} = \frac{5,72 \text{ min/Stk}}{60 \text{ min/h}} * 88 \text{ €/h} = 8,39 \text{ €/Stk} \quad (5)$$

bzw. den Betriebskosten des Roboters zusammen

$$k_{K.R} = \frac{360 \text{ W} * 10^{-3}}{10,49 \text{ Stk/h}} * 0,1214 \text{ €/kWh} = 0,0041 \text{ €/Stk} \quad (6)$$

Die Differenz der Produktionskosten aus (3) und (4) ergibt eine Ersparnis von

$$3,34 \text{ € pro Stück.}$$

Mithilfe der Kapitalwertmethode kann die Rentabilität der Investition berechnet werden:

$$C_0 = \sum_{t=0}^T Z_t * (1+r)^{-t} \quad (7)$$

In folgender Tabelle werden alle Geldflüsse der dreijährigen Periode veranschaulicht. Da davon ausgegangen wird, dass der Umsatz des Unternehmens unabhängig von der manuellen und kollaborierenden Montage ist, werden hier nur die jährlichen Einsparungen als positiver Cash Flow berücksichtigt.

$$\text{jährliche Einsparungen} = 15.000 \text{ Stk} * 3,31 \text{ €/Stk} = \text{€}50.100 \quad (8)$$

	t_0	t_1	t_2	t_3
<i>Investition</i>	-35.000			
<i>Installation, etc.</i>	-5.000			
<i>Instandhaltung</i>		-3.500	-3.500	-3.500
<i>Einsparungen</i>		50.100	50.100	50.100
<i>Zahlungsüberschuss</i>	-40.000	46.600	46.600	46.600

Tabelle 3-13: Zahlungsüberschüsse zur Berechnung der Kapitalwertmethode

Setzt man die Werte der Tabelle 3-13 in die Formel (7) ein, erhält man einen Kapitalwert von

$$C_0 = -40.000 + \frac{46.600}{1,005} + \frac{46.600}{1,005^2} + \frac{46.600}{1,005^3} = 97.816,54\text{€} \quad (9)$$

Der positive Vermögenszuwachs von 97.816,54€ spricht für eine vorteilhafte Investition des kollaborierenden Roboters.

Die Berechnung des Break-Even-Points gibt die kritische Menge an. Hierbei handelt es sich um die Stückzahl x , die produziert werden muss, um die Investitionskosten zu decken.

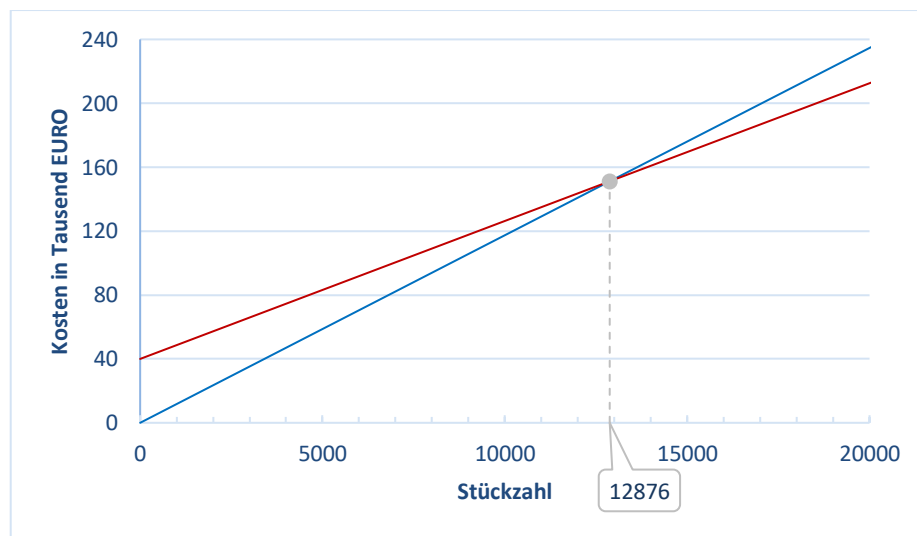


Abbildung 3-16: Break-Even-Point

— Kostenfunktion bei manueller Montage:

$$K_M(x) = k_M * x \quad (10)$$

— Kostenfunktion bei kollaborierender Montage:

$$K_K(x) = I_0 + I_{sonst} + (k_K + k_{inst}) * x \quad (11)$$

mit stückbezogenen Instandhaltungskosten

$$k_{inst} = \frac{3.500\text{€/Jahr}}{15.000\text{Stk/Jahr}} = 0,2333\text{€/Stk} \quad (12)$$

Setzt man die Kostenfunktionen aus (10) und (11) gleich, erhält man eine kritische Menge von $x = 12876 \text{ Stk}$. Dies ergibt eine Amortisationszeit von

$$\frac{12876 \text{ Stk}}{10,49 \text{ Stk/h}} \approx 1228 \text{ h} \approx 154 \text{ Tage} \approx 8 \text{ Monate} \quad (13)$$

3.9 Lösungsansätze zur Umstellung auf Cobots

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der allgemeinen Herangehensweise der Umstellung auf eine kollaborierende Montage anhand des Beispiels der oben praktizierten Simulation.

Montageplanung:

Zunächst ist es ratsam, eine Auflistung aller Arbeitsschritte zu erstellen, um festzulegen, welche Aufgaben offensichtlich für den Roboter ungeeignet sind. Darunter fallen Tätigkeiten, wie Schmiermittel Auftragen oder Dichtflächen Reinigen. Allgemein gesprochen handelt es sich hierbei um Arbeiten, die den Roboter verschmutzen könnten und somit die einwandfreie Montage und in weiterer Folge die Funktionsfähigkeit des Endproduktes gefährden könnten.

Die nächste Möglichkeit der Arbeitsaufgliederung bietet eine Einzelteil- und Baugruppenstudie der Produktkomponenten. Diese Studie dient zur Einteilung nach Geometrie, Gewicht und Handhabbarkeit der Teile durch Roboter und Mensch. Sollte zum Zeitpunkt dieser Einteilung die Greiftechnik des Cobots noch nicht bekannt sein, kann diese Studie zur Auswahl des Mechanismus hilfreich sein: Wie viele Finger benötigt der Greifer? Ist ein Vakuumgreifer ausreichend oder besteht die Möglichkeit einer 2-in-1 Kombination?

Der Umgang mit Hilfswerkzeugen bzw. Fertigungsmaschinen, die bereits bei der rein manuellen Montage verwendet werden, stellt eine der Herausforderungen bei der Umstellung dar. Es bestehen folgende Varianten:

- a) Ersetzen der Werkzeuge durch vollautomatisierte Maschinen, die in den Montageprozess eingebunden werden.
- b) Ersetzen der Werkzeuge durch Spezialwerkzeuge anstelle des Robotergreifers.
- c) Beibehalten der Werkzeuge und Anwendung durch den Roboter mittels standardisierter Robotergreifer.
- d) Beibehalten der Werkzeuge und Anwendung durch den Menschen, wie bisher bei der manuellen Montage.
- e) Beibehalten der Werkzeuge und kollaborierende Anwendung durch Roboter und Mensch

Prinzipiell lässt sich die Entscheidung zwischen den angeführten Optionen nur für jeden betroffenen Arbeitsschritt individuell treffen. Am Beispiel der O-Ring-Montage wird hier die Herangehensweise an dieses Problem etwas genauer beschrieben:

Bei der rein manuellen Montage kamen bisher sogenannte Aufschiebhülsen zum Einsatz, die das verdillungsfreie Aufziehen der O-Ringe auf die Werkteile erleichtern. Option a) einer vollautomatisierten „O-Ring-Aufschieb-Maschine“ könnte den gesamten Montageprozess verkürzen, ist jedoch mit hohen Investitions- und Planungskosten verbunden, da jedes Einzelteil eine individuelle Maschine und die nötige Infrastruktur zwischen Maschinen und Arbeitsplatz erfordern würde.

Für Option b) müsste in diesem konkreten Fall ein Spezialgreifsystem konstruiert werden, das unverhältnismäßigen Aufwand und Kosten verursachen würde. Zusätzlich wäre hier ein zwischenzeitlicher Werkzeugwechsel des Robotergreifers voraussetzen, da – nach dem Aufziehen des O-Ringes – wieder der ursprüngliche Zwei-Finger-Greifer für die nächsten Arbeiten benötigt wird. Von solchen Werkzeugwechseln ist bei kollaborierenden Arbeiten generell abzuraten, da dies die Flexibilität des Roboters verringern und zusätzlicher Planungs- und Programmieraufwand entstehen würde.

Option c) kommt durch das Fehlen des benötigten Fingerspitzengefühls bei Robotergreifern im Umgang mit O-Ringen nicht in Frage. Der korrekte und dichte Sitz eines O-Rings legt den Grundstein der Funktionstüchtigkeit des Einspritzventils.

Option d) würde die herkömmliche rein manuellen Montage beibehalten und nicht die vollen Vorteile der kollaborierenden Montage ausnützen.

Option e) liefert die effizienteste Variante, da beide Arbeitskräfte in Symbiose miteinander arbeiten (siehe Abbildung 3-17) und somit Zeit gespart werden kann. Der Roboter leistet die monotone Arbeit während der Mensch die Präzision verlangenden Handgriffe verrichtet.

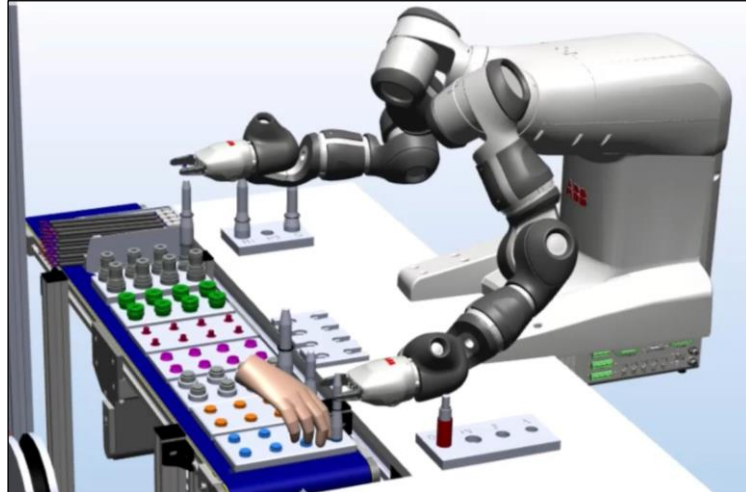


Abbildung 3-17: Kollaboration O-Ring Montage

Arbeiten, welche eine Spezialmaschine benötigen (z.B. das Verpressen durch eine Prüfmaschine oder die Vercrimpung des Kabels durch eine Vercrimpungsmaschine), werden in diesem speziellen Fall weiterhin vom Menschen durchgeführt.

Nach den oben angeführten Einteilungen der Arbeitsaufgaben sollte ein Montageplan erstellt werden, der eine grobe Aufteilung auf rein manuelle, automatische und kollaborierende Arbeiten darlegt. Eine zu detaillierte Einteilung zu Beginn des Umstellungsprozesses ist nicht ratsam, da zunächst ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess nach dem PDAC-Prinzip (plan-do-act-check) eingeleitet werden sollte.

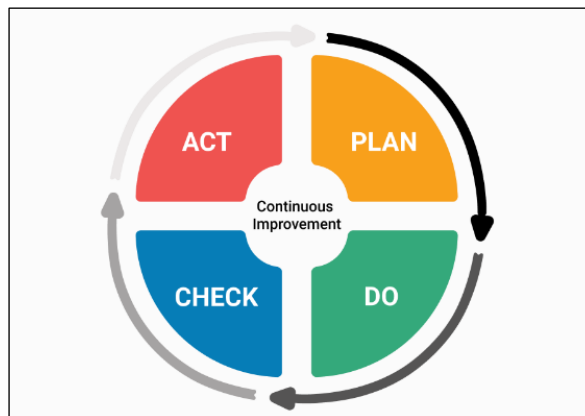


Abbildung 3-18: PDCA-Kreislauf³⁰

Erst eine Simulation bzw. die tatsächliche Implementierung des Montageplans können Aufschlüsse über einen effizienteren Ablauf geben, bis durch ein mehrmaliges Durchlaufen des Kreislaufes (siehe Abbildung 3-18) der optimale Montageprozess

³⁰ <https://kanbanize.com/de/lean-management-de/verbesserung/was-ist-pdca-zyklus/>

erarbeitet werden kann. Zum Start der Planung ist die Verwendung einer Projekt- und Prozessmanagementsoftware zu empfehlen. *MS Project* wurde in dieser Arbeit benutzt, um ein Gantt-Diagramm des Montageablaufs zu erstellen (siehe Abbildung 3-4 und 3-5).

Zellen-Layout:

Das Layout der Montagezelle wurde mit dem Ziel gestaltet, so kompakt wie möglich zu sein, ohne Einbußen an ergonomischen Standards in Kauf nehmen zu müssen: Der gesamte Montagezyklus soll für den Arbeiter im Sitzen durchgeführt werden können. Durch diese Voraussetzungen musste das Problem der Materialbereitstellung gelöst werden, welche zusätzlich noch weitere Anforderungen mit sich bringt:

- Sie sollte möglichst automatisch erfolgen
- Beide Arbeitskräfte müssen uneingeschränkt auf die Werkstücke zugreifen können

Die Lösung: Ein Förderbandsystem, das sowohl als Zulieferer als auch als Arbeitsplatz dient und sich zwischen Roboter und Mensch befindet. Die Hauptbestandteile des Einspritzventils werden auf Matrizen positioniert und über das Förderband angeliefert, während das Schüttgut (O-Ringe, etc.) in Behältern am Arbeitsplatz zur Verfügung steht. Die Aufrüstung der Transportpalette kann z.B. über einen Pick & Place Roboter direkt im Lager oder bei Vorbearbeitungszellen der Fertigungskette manuell durchgeführt werden.

Der Bereitstellungsprozess erfolgt semi-automatisch: Sobald die Montage einer Losgröße abgeschlossen ist, kann der Arbeiter mittels Knopfdrucks die leeren Paletten wieder zurückbefördern und neue, vollbesetzte werden wieder bereitgestellt. Hier empfiehlt es sich ein Zwischenlager direkt vor der Montagezelle einzurichten, um die Wartezeit minimal zu halten.

Kommunikation:

Zum derzeitigen Standpunkt bietet das Human Machine Interface (HMI), also die kommunikative Schnittstelle zwischen dem Menschen und der Maschine, noch Verbesserungsmöglichkeiten. Ein Cobot ist mit ausreichend Sensorik (Kamera, Drehmomentenmesser, etc.) ausgestattet, um autonom arbeiten zu können: So kann er erkennen, wo sich ein Werkstück befindet und dementsprechend seine Greifposition

anpassen oder bei einer unerwarteten Kollision mit einem Fremdkörper seine Bewegung verlangsamen oder gar stoppen.

Bei aktiver kollaborierender Arbeit jedoch, fehlt es an einem ausgeklügeltem HMI, der dem Roboter ermöglicht, dem Menschen – oder vice versa – mitteilen kann, dass er bereit für die nächste Aktion ist. Ohne diese Schnittstelle steigt in bestimmten Situationen das Fehlerpotential und daher die Ausschussquote enorm an.

Während manche kollaborative Modelle bereits Ansätze eines HMI (Gestenkommunikation; Bildschirm; siehe Kapitel 2.4) anbieten, musste in diesem konkreten Projekt ein Umweg genommen werden: Der Arbeiter kann per Fußpedal ein digitales Signal an den Roboter übermitteln, wenn dieser eine bestimmte Aktion durchführen soll, wie z.B. das in Abbildung 3-19 ersichtliche Öffnen des Greifers, um das Fertigteil dem Menschen „zu übergeben“.

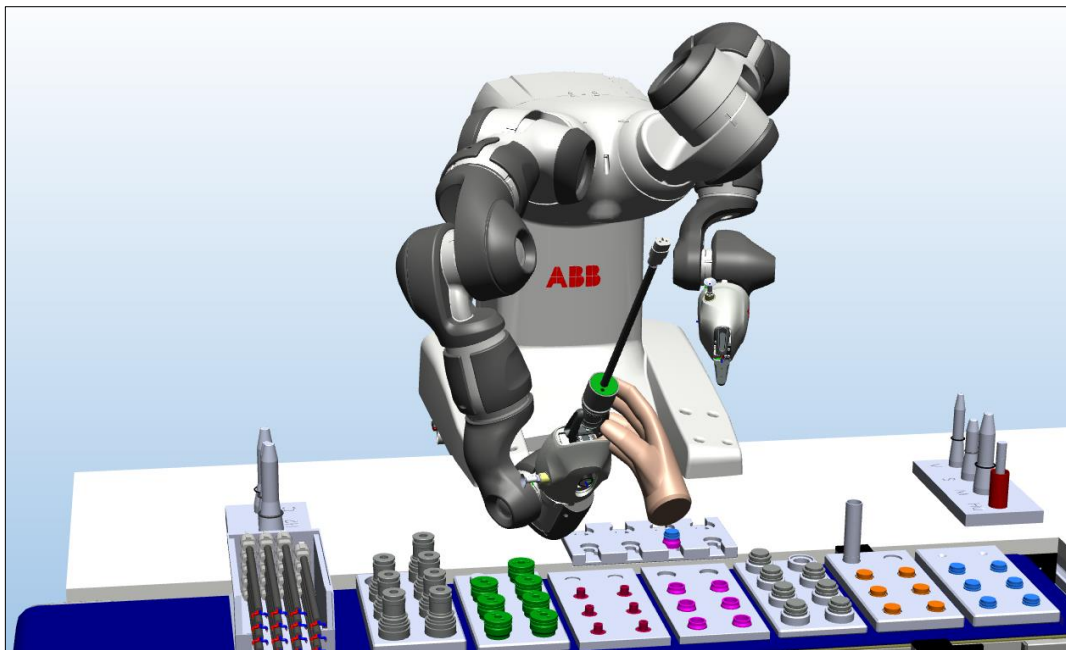


Abbildung 3-19: Übergabe des fertigen Einspritzventils

4 Resümee

Nach der monatelangen eingehenden Beschäftigung mit der Materie erscheint die interaktive Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine ein Arbeitsmodell mit realistischen Zukunftsaussichten.

Es konnte gezeigt werden, dass das Ziel der Produktivitätssteigerung durch den Einsatz eines Cobots im Gegensatz zur rein manuellen Montage erreicht werden kann:

Im konkreten Fall der Montage eines Einspritzventils konnte die Umstellung eine Reduktion der Montagezeit von 28.5% und somit eine deutliche Steigerung der Produktivität von beinahe 40% bringen. Die Amortisationszeit kann bei den geringen Investitionskosten u.a. durch eine unkomplizierte Implementierung, den Wegfall von Sicherheitsmaßnahmen und den Erhalt von Montagemaschinen unter einem Jahr gehalten werden. Die Flexibilität des gewählten Roboters sowie die der Arbeitsanordnung ermöglichen jederzeit eine Anpassung an geänderte Anforderungen und natürlich auch an die Praxis. Denn wie eingangs erwähnt, lässt sich erst in der tatsächlichen Anwendung die Praxistauglichkeit des simulierten Modells durchgängig überprüfen.

Im Gegensatz zu einem vollautomatisierten Prozess bringt die Kooperation zwischen den mechanischen und humanen Arbeitskollegen somit noch mehr Vorteile als nur den Erhalt eines Arbeitsplatzes des Menschen. Der Roboter dient als Unterstützer des Menschen, der ihm gewisse Arbeiten abnehmen und zugleich mit hoher Präzision und Geschwindigkeit erledigen kann. Der Einsatz des mehrfach erwähnten menschlichen „Fingerspitzengefühls“ ist eine Eigenschaft, die derzeit noch nicht, unter Umständen erst in einer der nächsten Robotergenerationen zu ersetzen sein wird. Mit einem ausgereiften HMI bleibt dem Arbeiter dabei immer die Kontrolle über seinen mechanischen Kollegen.

Der Cobot bietet somit eine preiswerte Option für die erstrebte Produktivitätssteigerung bei flexiblen Fertigungs- und Montagezellen und hat in heutigen Arbeitsprozessen mehr als nur eine effizienzsteigernde Berechtigung. Mit der rapiden Entwicklung an künstlicher Intelligenz wird die Kollaboration zwischen Mensch und Maschine bald ihr volles Potential ausschöpfen und in die Symbiose der Zukunft übergehen.

5 Anhang

Die Simulation der kollaborierenden Montagezelle befindet sich auf folgendem Medium:

6 Literaturverzeichnis

- Akella, P., Peshkin, M., Colgate, E., Wannasuphoprasit, W., Nagesht, N., Wells ', J., ... Peacockt, B. (1999). Cobots for the automobile assembly line. *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, (May), 728–733. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1999.770061>
- Augustsson, S., Olsson, J., Christiernin, L. G., & Bolmsjö, G. (2014). How to transfer information between collaborating human operators and industrial robots in an assembly. *Nordic Conference on Human-Computer Interaction*, 286–294. <https://doi.org/10.1145/2639189.2639243>
- Bauer, W., Bender, M., Braun, M., & Rally, P. (2016). Leichtbauroboter in der manuellen Montage – einfach einfach anfangen. Retrieved from <http://www.produktionsmanagement.iao.fraunhofer.de/content/dam/produktionsmanagement/de/documents/LBR/Studie-Leichtbauroboter-Fraunhofer-IAO-2016.pdf>
- Bogue, R. (2016). Europe continues to lead the way in the collaborative robot business. *Industrial Robot: An International Journal*, 43(1), 6–11. <https://doi.org/10.1108/IR-10-2015-0195>
- Edelmann, M., & Anderegg, R. (2016). *Kollaborierende Automation. Interaktion von Mensch und Maschine 4.0*.
- Shi, J., Jimmerson, G., Pearson, T., & Menassa, R. (2012). Levels of human and robot collaboration for automotive manufacturing. *Proceedings of the Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems - PerMIS '12*, 95. <https://doi.org/10.1145/2393091.2393111>

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: YuMi ¹	11
Abbildung 2-2: Kuka LBR iiwa ⁴	12
Abbildung 2-3: Universal Robots	13
Abbildung 2-4: APAS assistant F911-7m	14
Abbildung 2-5: Sawyer ¹¹	15
Abbildung 2-6: Baxter ¹⁰	15
Abbildung 2-7: P-Rob R2 ¹²	16
Abbildung 3-1: Aufschnitt des Ventils	22
Abbildung 3-2: ABB YuMi ²²	24
Abbildung 3-3: ABB-Greifer ²²	24
Abbildung 3-4: Gantt-Diagramm des Montageablaufs 1-2.....	27
Abbildung 3-5 Gantt-Diagramm des Montageablaufs 2-2	28
Abbildung 3-6: Layout der Montagezelle	35
Abbildung 3-7: Robotertisch	36
Abbildung 3-8: Paket-Palette.....	37
Abbildung 3-9: Arbeitstisch.....	37
Abbildung 3-10: Beladenes Förderband.....	38
Abbildung 3-11: Beispiel einer Einzelteilpalette: Magnet	39
Abbildung 3-12: Montagehilfen in Palette	40
Abbildung 3-13: Zwick/Roell Z050 ²⁵	41
Abbildung 3-14: CETEC SM Crimp 2000 ²⁶	41
Abbildung 3-15: Screenshot der Simulation in Robotstudio.....	42
Abbildung 3-16: Break-Even-Point	46
Abbildung 3-17: Kollaboration O-Ring Montage	49
Abbildung 3-18: PDCA-Kreislauf ³⁰	49
Abbildung 3-19: Übergabe des fertigen Einspritzventils	51

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Schlüsseldatenvergleich.....	17
Tabelle 3-1: Einzelteilkomponenten des Einspritzventils	22
Tabelle 3-2: Schüttgut/Normteile des Einspritzventils	22
Tabelle 3-3: Handhabbarkeit der Bauteile	23
Tabelle 3-4: Schlüsseldaten YuMi IRB 14000	25
Tabelle 3-5 Arbeitsressourcenkürzel	26
Tabelle 3-6 Montageprozesse	26
Tabelle 3-7 O-Ring Montage	29
Tabelle 3-8 Valve Paket verpressen.....	30
Tabelle 3-9 Vercrimpung	32
Tabelle 3-10 Housing Montage	33
Tabelle 3-11: Legende des Layouts	35
Tabelle 3-12: Durchlaufzeiten der Montageprozesse	43
Tabelle 3-13: Zahlungsüberschüsse zur Berechnung der Kapitalwertmethode.....	45

9 Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
Cobot	Collaborative robot
d.h.	das heißt
DLZ	Durchlaufzeit
etc.	et cetera
exkl.	exklusive
HMI	Human Machine Interface
i.d.R	in der Regel
inkl.	Inklusive
lt.	laut
MTM	Methods-Time Measurement
Min.	Minuten
o.g.	oben genannt
p.a.	per annum
Sek.	Sekunden
Std.	Stunden
Stk.	Stück
tlw.	teilweise
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel