
Bachelor-Thesis



Bachelor-Thesis

Erarbeitung eines Konzeptes für die Einführung
eines kollaborierenden Robotersystems am
Beispiel der Endmontage einer BLDC-Elektronik

Vorgelegt am: 26.08.2019

Von: Dominik Berndt
Am Waldesrand 7
06792 Sandersdorf

Studiengang: Industrielle Produktion
Studienrichtung: Produktionstechnik

Seminargruppe: 4PT16

Matrikelnummer: 4002477

Praxispartner: HKR Automotive GmbH
Sonnenallee 1-5
06766 Bitterfeld-Wolfen

Gutachter: Dipl.-Wirt.-Ing. Thomas Günther (HKR Automotive GmbH)
Prof. Dr. Heiko Enge (Staatliche Studienakademie Glauchau)

Themenblatt Bachelorthesis

Studiengang Industrielle Produktion

Student: **Dominik Berndt**
Matrikelnummer: **4002477**
Seminargruppe: **4PT16-1**

Thema der Bachelorthesis

**Erarbeitung eines Konzeptes für die Einführung eines kollaborierenden
Robotersystems am Beispiel der Endmontage einer BLDC-Elektronik**

Gutachter/ Betreuer: **Dipl.-Ing. Thomas Günther**
Gutachter (Studienakademie): **Prof. Dr. Heiko Enge**

Ausgabe des Themas: **27.05.2019**

Abgabe der Arbeit an den SG am: **26.08.2019, bis 14:00 Uhr**



Prof. Ingolf Tiator
Vorsitzender des Prüfungsausschusses
Technik



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Formelverzeichnis	VIII
Formelzeichenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 HKR Automotive GmbH.....	1
1.2 Motivation	2
1.3 Zielstellung	2
1.4 Aufbau der Arbeit.....	3
2 Industrie 4.0.....	4
2.1 Automatisierung.....	6
2.2 Technisierung	7
2.3 Digitalisierung	8
2.4 Fazit.....	9
3 Robotersysteme.....	11
3.1 Industrieroboter.....	13
3.2 Kollaborierende Robotersysteme.....	16
3.2.1 Vorteile gegenüber herkömmlichen Industrierobotern	17
3.2.2 Sicherheitsbestimmungen	17
3.2.3 Stand der Technik.....	20
3.3 Fazit.....	24
4 Planungsprojekte.....	26
4.1 Auswahl eines geeigneten Roboterherstellers.....	26
4.2 Linienenerweiterung BLDC	29



4.2.1	Produkt	29
4.2.2	Konzept	31
4.2.3	Konzeptbewertung.....	33
4.3	Linienbeschaffung BLDC Gen5	37
4.3.1	Produkt	37
4.3.2	Konzept	38
4.3.3	Konzeptbewertung.....	40
4.4	Roboterbeschaffung	47
4.5	Fazit.....	48
5	Zusammenfassung.....	49
6	Ausblick.....	50
	Quellenverzeichnis.....	51
	Anhangsverzeichnis.....	55
	Ehrenwörtliche Erklärung	
	Erklärung zur Prüfung wissenschaftlicher Arbeiten	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Die vier Stufen der industriellen Revolution	5
Abbildung 2	Unterstützungssysteme für das Berufsleben.....	8
Abbildung 3	Einordnung der hybriden Montage in der industriellen Produktion .	12
Abbildung 4	Roboterinstallation im verarbeitenden Gewerbe, 1994–2010	13
Abbildung 5	Überblick über die wichtigsten Roboterkinematiken.....	14
Abbildung 6	Soft Cover an einem kollaborierenden Roboter der Firma Fanuc ..	20
Abbildung 7	KUKA „LBR iiwa“ / Yuanda Robot.....	21
Abbildung 8	Universal Robots „UR Serie“ / ABB „YuMi – IRB 14000“	21
Abbildung 9	Bionic Robotics GmbH „Biorob“	22
Abbildung 10	Nahbereich Bosch „APAS assistant“	23
Abbildung 11	Detektion Kollaborationsbereich Bosch „APAS assistant“	23
Abbildung 12	Bosch „APAS assistant“	24
Abbildung 13	BLDC-Regler	29
Abbildung 14	Neue Varianten des BLDC-Reglers	30
Abbildung 15	Layoutkonzept Linienenerweiterung BLDC	31
Abbildung 16	Prozessablauf Cobot.....	32
Abbildung 17	Gen5-Steuergerät beide Varianten	37
Abbildung 18	Layoutkonzept Gen5	39
Abbildung 19	Projektlebenszyklus von industriellen Roboteranlagen	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Kreuztabelle zum Paarweisen Vergleich.....	27
Tabelle 2	Nutzwertberechnung	28
Tabelle 3	Risikobeurteilung Cobot-Applikation BLDC-Linienerweiterung	34
Tabelle 4	Zeiten manueller Tätigkeiten der BLDC-Linie.....	35
Tabelle 5	Prozesszeiten BLDC-Linie	36
Tabelle 6	Risikobeurteilung Cobot-Applikation Gen5-Linie	40



Formelverzeichnis

Formel 1	Lohnkostenberechnung.....	43
Formel 2	Maschinenstundensatz	45
Formel 3	Kosten Cobot	46
Formel 4	Kosten Werker	46
Formel 5	Amortisationszeit.....	46

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen:	Bezeichnung:	Einheit:
LK	Lohnkosten	€
S _{MK}	Stundensatz Maschinenkosten	€/h
S _{LK}	Stundensatz Lohnkosten	€/h
t _A	Arbeitszeit	h
t _{Am}	Amortisationszeit	h
t _B	Betriebsdauer	a



Abkürzungsverzeichnis

BG	Berufsgenossenschaft
BLDC	Brushless direct current
Cobot	Kollaborierender Roboter
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EOL	End of Line
Gen 5	Fünfte Generation
ICT	In-Circuit-Test
IFA	Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung
MTM	Methods-Time Measurement
RI	Risikoindex
SCARA	(auch SCARA-Roboter) Selective Compliance Assembly Robot Arm
SMT	Surface-Mounting Technology
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
THT	Through-Hole Technology

1 Einleitung

Der schnelle technologische Fortschritt und der Wandel der Gesellschaft sowie deren Verständnis von Arbeit prägen den industriellen Sektor. Der Vormarsch von hochautomatisierten Massenfertigungen und die ständigen Veränderungen von Konsumgütern machen es gerade für kleine und mittelständische Unternehmen schwer, konkurrenzfähig gegenüber Großkonzernen zu bleiben. Da mittelständische Firmen den Großteil der deutschen Wirtschaft ausmachen, sind technologische Entwicklungen gerade für eine Industrienation wie Deutschland mit großen Risiken, aber auch Potenzialen verbunden. Um im Wettbewerb zu überstehen, müssen Unternehmen mit der Zeit gehen. Im Bereich der Produktion bedeutet dies, immer auf dem neusten Stand der Technik zu sein. Das frühzeitige Integrieren vielversprechender Technologien, die sich als bewährt herausgestellt haben, ist unabdingbar um seitens Produktivität, Qualität und Lieferzeit wettbewerbsfähig zu bleiben. Der sich seit Beginn des 21. Jahrhunderts vollziehende industrielle Wandel, welcher einer neuen industriellen Revolution gleichkommt, und demografischen Erscheinungen, wie alternde Belegschaften und Fachkräftemangel machen eine Neuausrichtung und Neuaufstellung vieler Firmen unabdingbar.

1.1 HKR Automotive GmbH

Das Unternehmen HKR Automotive GmbH ist ein mittelständischer Automobilzulieferer. Die Kernkompetenz ist das Entwickeln und Herstellen von Leistungselektronik. Diese elektronischen Bauteile werden in Fahrzeugen unterschiedlicher Hersteller als Steuergeräte für verschiedene Einsatzgebiete verwendet. Das Haupteinsatzgebiet ist das Ansteuern von Gleichstrommotoren zum Antreiben von Kühlerlüftern oder Klimagebläsen. Weitere Einsatzgebiete sind das Betreiben von Zusatzölpumpen oder die Steuerung der Glühzeiten von Glühkerzen in Dieselmotoren. Grundsätzlich ist die Entwicklung und Produktion von Steuergeräten für alle elektronischen Einsatzbereiche im PKW, die hohe Ströme erfordern, denkbar. Dabei findet die Produktentwicklung am Entwicklungsstandort in Kupferzell und die Fertigung am Produktionsstandort in Bitterfeld-Wolfen statt.

Die Produktion der Bauteile beginnt mit dem Bestücken der Leiterplatten mit elektronischen Bauelementen der Surface-Mounting Technology (im Folgenden durch SMT abgekürzt). Die sogenannten SMT-Bauteile¹ werden über ein Reflow-Verfahren auf der Leiterplatte verlötet. Im nächsten Schritt wird die Leiterplatte mit Bauelementen der

¹ SMT-Bauteile sind elektronische Komponenten, die mit der Leiterplatte durch, an der Ober- oder Unterseite befindlichen, Löt pads verlötet werden.

Through-Hole Technology (im Folgenden durch THT abgekürzt) bestückt. Die sogenannten THT-Bauteile² werden über ein Wellenlötverfahren mit der Leiterplatte verlötet. Weitere Produktionsschritte können je nach Produkt abweichen. Bei den meisten Varianten folgen verschiedene optische und elektrische Prüfverfahren, sowie die Montage von Gehäusen und der Prüfung konstruktiver Prüfmerkmale.

Die Erweiterung der Auftragslage und das dadurch größer werdende Produktportfolio sorgen für eine ständige Veränderung der Produktionspalette. Diese Veränderungen spiegeln sich am Produktionsstandort Bitterfeld-Wolfen der HKR Automotive wieder. Das Beschaffen neuer Anlagen, um neue Produkte zu fertigen und die damit verbundenen Aufgaben, wie der Umgang mit knappen Ressourcen, sind Teil der technischen Planung des Unternehmens.

1.2 Motivation

Auf Grund der industriellen Situation und der ständigen Weiterentwicklung von Technologien ist es für die HKR Automotive an der Zeit, sich an modernen technologischen Trends zu orientieren. Ein vielversprechender Bereich ist die Verwendung von Robotersystemen. Neue Entwicklungen wie kollaborierende Roboter ermöglichen komplett neue Einsatzgebiete für Industrieroboter. Gerade bei der Fertigung von elektronischen Bauteilen in großen Stückzahlen können Potenziale zur Produktivitätssteigerung durch Automatisierung vorhanden sein. Da bereits viele Prozesse hochautomatisiert stattfinden, ist es durchaus denkbar den Automationsgrad durch die Verwendung von Roboterapplikationen weiter zu steigern. Bisher schwer automatisierbare Aufgaben wie Bauteilhandling, Bauteil- und Anlagenbestückung könnten durch Roboter effizienter und stabiler gestaltet werden. Ob die Integration neuer Maschinen sinnvoll ist, muss dabei projekt- und produktbezogen geprüft werden.

1.3 Zielstellung

Roboterapplikationen können für verschiedene Anwendungsgebiete sinnvoll eingesetzt werden. Ziel dieser Arbeit ist die Sinnhaftigkeit der Implementierung einer Roboterapplikation für momentane Planungsprojekte zu überprüfen. Um dies zu beurteilen, muss ein Überblick über den Stand der Technik und daraus resultierend, mögliche Lösungen zur Realisierung der Projekte gegeben werden. Dementsprechend müssen Konzepte erstellt und beurteilt werden. Weiterhin sind Roboterhersteller zu sichten, um eine engere Auswahl an Lieferanten zu erstellen.

² THT-Bauteile sind elektronische Komponenten, die durch Bohrungen in der Leiterplatte gesteckt und verlötet werden.

Im weitesten Sinn soll diese Arbeit eine Entscheidungsgrundlage für die momentanen, aber auch für zukünftige Projekte darstellen. Dabei kann das Ergebnis einer projektbezogenen Betrachtung nicht eins zu eins auf andere Anwendungsgebiete übertragen werden, jedoch trotzdem Aufschluss über die allgemeine Zweckmäßigkeit der Integration neuer Technologien geben.

1.4 Aufbau der Arbeit

Zur Erarbeitung eines Konzeptes für die Einführung eines kollaborierenden Robotersystems am Beispiel der Endmontage einer BLDC-Elektronik muss zunächst das entsprechende Hintergrundwissen vermittelt werden. Da es sich bei kollaborierenden Robotern Stand 2019 um eine sehr neue Technologie handelt wird in Kapitel 2 die Bedeutung neuer Technologien auf die industrielle Fertigung und die damit verbundenen Erwartungen erläutert. Im darauffolgenden Abschnitt werden die technischen Hintergründe zu Robotersystemen vermittelt. Dabei werden die Besonderheiten und Vorteile von kollaborierenden Robotern dargelegt. Die praktische Umsetzung wird im Kapitel 4 beschrieben. Beginnend mit der Auswahl eines geeigneten Roboterherstellers und der Beschreibung der Projekte, über die Erarbeitung von Konzepten, bis zur Beurteilung der Zweckmäßigkeit werden die planerischen Aufgaben in diesem Abschnitt abgehandelt. Abschließend wird eine zusammenfassende Beurteilung mit Sicht auf zukünftige Projekte gegeben.

2 Industrie 4.0

Der Begriff „Industrie 4.0“, welcher mittlerweile auch in der Wissenschaft etabliert ist, bezeichnet ursprünglich ein Zukunftsprojekt der deutschen Bundesregierung. Ziel war die zunehmende Modernisierung von fertigungs- und informationstechnischen Prozessen. Die ursprünglich als Marketingbegriff eingeführte Bezeichnung steht allgemeingültig für die vierte industrielle Revolution. Auch wenn dies in der Wissenschaft anerkannt wird, fällt es nicht einfach, dem Begriff „Industrie 4.0“ eine wissenschaftliche Präzisierung zuzuordnen, da gerade in der heutigen Zeit unzählige neue und zunehmend vielschichtige Industriezweige entstehen. Neben der klassisch fertigenden Industrie haben Bereiche wie Gesundheit, Klima, Mobilität und Energie an großer Bedeutung gewonnen. Somit ist es Auslegungssache, was zum Begriff Industrie gezählt wird.³

Die erste industrielle Revolution begann bereits Mitte des 18. Jahrhunderts und wurde durch die Salonfähigkeit der Dampfmaschine eingeleitet. Dadurch zeigt sich, dass die Entwicklung der Industrie stark vom technologischen Fortschritt abhängt. Dass jedoch Technologie nicht der einzige Faktor für die Transformation der Industrie ist, zeigt sich ca. ein Jahrhundert später während der zweiten industriellen Revolution. Neben der zunehmenden Nutzung von elektrischer Energie und den dadurch gewonnenen technischen Möglichkeiten, wie z.B. Transportbändern, übten Veränderungen in Bereichen der Arbeits- und Betriebsorganisation starken Einfluss auf die damaligen Produktionen aus. Das Konzept der Arbeitsteilung im Zusammenspiel mit der neu gewonnenen Fördertechnik ermöglichte die Einführung der Fließbandfertigung, woraus die ersten Massenproduktionen gewachsen sind. Durch die immer größere Bedeutung der Informationstechnologie und der damit zunehmenden Digitalisierung begann Ende des 20. Jahrhunderts die dritte industrielle Revolution. Im Fokus standen dabei die Automation und die Rationalisierung der Fertigung. Dies wurde ermöglicht durch neue Technologien wie speicherprogrammierbare Steuerungen (im Folgenden als SPS abgekürzt) und betriebswissenschaftliche Analysen von Verschwendungsarten und deren Ursachen. Die vierte industrielle Revolution ist durch ähnliche Ziele geprägt wie die vorhergehenden industriellen Revolutionen. Da der Begriff „Industrie 4.0“ im Jahr 2011 aufkam, kann sie zeitlich zum Anfang des 20. Jahrhunderts eingeordnet werden. Im Jahr 2019 steht die vierte industrielle Revolution noch in den Anfängen. Somit können zu diesem Zeitpunkt noch keine finalen Aussagen darüber getroffen werden, durch welche Technologien und Entwicklungen die Industrie 4.0 in ihrer Gesamtheit geprägt wird. Eine zeitliche Übersicht der vier Stufen der industriellen Revolution und deren Technologien ist in Abbildung 1 ersichtlich.⁴

³ Vgl. BENDEL, 2019, S. 125 - 126

⁴ Vgl. ROTH, 2016, S. 19

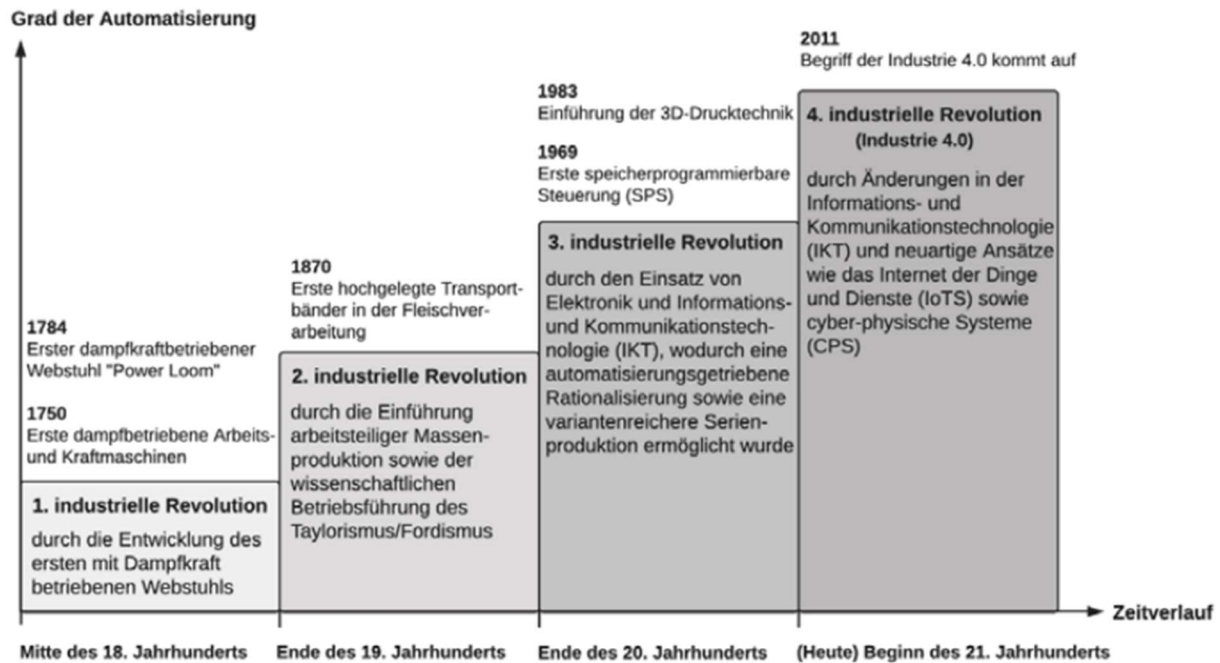


Abbildung 1: Die vier Stufen der industriellen Revolution (ROTH, 2016, S. 19)

Auffallend sind die kürzer werdenden Zeiträume zwischen dem Aufkommen innovativer Entwicklungen. Dies zeigt, dass die industrielle Wandlung immer schnellerlebig wird. Gerade für Industrienationen ist es dabei wichtig, den Einstieg in neue Technologien nicht zu verpassen, da jede industrielle Revolution einen Anstieg des Wohlstandes der früh eingestiegenen Nationen mit sich brachte. Im Umkehrschluss kann ein zu später Einstieg zu wirtschaftlichen Nachteilen gegenüber Konkurrenten führen.⁵

Vielversprechende Technologien, die während des Voranschreitens der Industrie 4.0 von Bedeutung sein können, sind die immer weiterentwickelten Robotersysteme, Kommunikationssysteme zum Informationsaustausch und digitale Dienstleistungen, z.B. zur automatischen Informationsverarbeitung. Somit werden Prozesse zunehmend durch einen starken Automatisationsgrad und die Verlagerung der menschlichen Arbeit von körperlichen zu geistigen Tätigkeiten geprägt. Gerade im Bereich der Produktion sind die Ziele der Industrie 4.0 Automatisierung, Technisierung und Digitalisierung. Da die drei Bereiche zusammenhängen, kann durch die Verwendung neuer Technologien, eine Verbesserung in allen Bereichen erzielt werden. Die Vernetzung von Produktionsanlagen, die automatische Auswertung von Produktionskennzahlen und die steigende Zahl an Robotersystemen mit zunehmender Erweiterung der Einsatzgebiete zeigt schon im Jahr 2019 die Potenziale neuer Technologien auf.⁶

⁵ Vgl. HUBER, 2016, S. 4

⁶ Vgl. BENDEL, 2019, S. 126

2.1 Automatisierung

Laut DIN IEC 60050-351:2014-09 ist der Begriff „automatisch“ für „einen Prozess oder eine Einrichtung bezeichnend, der oder die unter festgelegten Bedingungen ohne menschliches Eingreifen abläuft oder arbeitet.“⁷

Demnach ist Automatisierung die Verknüpfung von autonom gestalteten Prozessen und Prozessschritten, um einen ganzheitlichen Ablauf zu realisieren, der mit einem Mindestmaß von menschlicher Einflussnahme funktioniert. Ziel ist dabei die Notwendigkeit von menschlichen Tätigkeiten zu minimieren.

Automatisierung ist besonders im Bereich der Fertigung von hoher Relevanz. Bei der Herstellung von physischen Produkten sind in erster Linie Bearbeitungs- und Montagevorgänge notwendig. Durch die technologischen Entwicklungen seit Mitte des 18. Jahrhunderts können Bearbeitungs- und Montageprozesse durch Maschinen autonom durchgeführt werden. Gerade die Integration von Robotersystemen mit informationsverarbeitender Steuerungssoftware macht es möglich, fast jeden Fertigungsschritt automatisch durchzuführen. Um einen noch höheren Grad an Automatisierung zu erreichen, können die autonomen Prozesse mittels Kommunikationssystemen miteinander verknüpft werden. Lediglich die Kontrolle der Prozesse durch Auswertung von Kennzahlen und die Instandhaltung der Maschinen machen menschliche Einflussnahme notwendig. Jedoch werden auch im Bereich der Prozessüberwachung und Steuerung zunehmend autonome Systeme genutzt, da diese zuverlässiger und flexibler werden.⁸

Durch den steigenden Automatisierungsgrad, nimmt die Notwendigkeit manueller Arbeit ab. Erste Erscheinungen sind die Verlagerung menschlicher Arbeit vom körperlichen auf den geistigen Bereich, da körperliche Tätigkeiten seit Beginn der industriellen Revolution in immer größerem Maße durch Maschinen durchgeführt werden können.⁹

Durch die wachsende Bedeutung der Informationstechnik entstehen seit Anfang des 21. Jahrhunderts immer bessere Systeme zur Informationsverarbeitung. Da geistige Tätigkeiten in erster Linie durch Informationsverarbeitung geprägt sind, können immer mehr planerische und steuernde Aufgaben durch Computersysteme durchgeführt werden. Dies führt zu einem noch höheren Grad an Automatisierung und stellt die Notwendigkeit menschlicher Arbeit im geistigen Bereich in Frage.

Auf der einen Seite führt ein steigender Automationsgrad zu einer Reduzierung von Arbeitsplätzen. Andererseits wirkt er sich, durch die Korrelation aus Automatisierungsgrad und Produktivitätssteigerung, positiv auf die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens aus.

⁷ Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch, 2014, Teil 351: Leittechnik

⁸ Vgl. HEINRICH; LINKE; GLÖCKLER, 2017, S. 3

⁹ Vgl. GERDENTSCHE; KORUNKA, 2019, S. 5

Die Produktivitätssteigerung durch Automation kommt dadurch zu Stande, da die Einführung autonomer Systeme häufig Teil der Rationalisierung von Prozessen ist. Ziele dieser Rationalisierung sind z.B. Erhöhung der Qualität, Senkung von Kosten und die Verkürzung von Fertigungszeiten.¹⁰

2.2 Technisierung

Zwischen Arbeit und Technik besteht ein großer Zusammenhang. Dabei ist die Technisierung eine gesellschaftlich-historische Entwicklung und bedeutet: „[den] ständig wachsende[n] Einsatz von technischen Hilfsmitteln [...]“.¹¹ Die drei zentralen Ziele der Verwendung von Technik sind:

- 1) Arbeitersparnis,
- 2) Effektivitätssteigerung,
- 3) Prozesskontrolle.

Durch die Verfolgung dieser Ziele wirkt sich Technisierung ersetzend oder verändernd auf lebendige Arbeit aus. Arbeitsabläufe werden feiner zergliedert, um durch den Einsatz von Technologien einen zuverlässig wiederholbaren und gleichzeitig rational gestalteten Prozess zu schaffen. Grundlage vieler Rationalisierungsstrategien ist dabei die Annahme, dass menschliche Arbeit vollkommen ersetzbar ist.¹²

Große Potenziale zur Technisierung bestehen in der industriellen Produktion, da dort häufig sich wiederholende Prozesse vorkommen. Der Einsatz technischer Lösungen muss dabei vor allem einen wirtschaftlichen Nutzen haben, kann allerdings auch Vorteile durch veränderte Arbeitsabläufe und Tätigkeitsinhalte mit sich bringen. Durch die steigende Bedeutung der Informationstechnik werden auch Dienstleistungsbereiche zunehmend technisiert. Dabei wird die fortlaufende Technisierung als nie abgeschlossen angesehen, da immer mit der Erfindung neuer Technologien gerechnet werden muss.¹³

Die zunehmende Technisierung hat die industrielle Fertigung stark gewandelt. Die zunächst durch die Verwendung von Werkzeugen realisierten Arbeitsschritte wurden Stück für Stück durch technische Systeme, wie automatisierte Roboter, vereinfacht. Dadurch wird ein großer Zusammenhang zwischen Technisierung und Automatisierung deutlich. Im nächsten Schritt wurden die Robotersysteme zunehmend mit Sensorik ausgestattet, wodurch sich die technische Intelligenz verbessert. Weiterhin werden

¹⁰ Vgl. HEINRICH; LINKE; GLÖCKLER, 2017, S. 5 - 6

¹¹ Online: VOIGT, Gabler Wirtschaftslexikon, Technisierung (29.07.2019)

¹² Vgl. BÖHLE; VOß; WACHTLER, 2018, S. 321 - 323

¹³ Vgl. MATUSCHEK, 2016, S. 12 - 14

Unterstützungssysteme immer angepasster an Person und Aufgabe. Die verwendeten technischen Systeme können in zwei Arten eingeteilt werden.:

- Substituierend – Systeme, die menschliche Arbeit ersetzen
- Unterstützend – Systeme, die den Menschen bei seiner Tätigkeit unterstützen

Eine Einordnung ausgewählter Unterstützungssysteme nach substituierenden und unterstützenden Systemen ist in Abbildung 2 ersichtlich.¹⁴

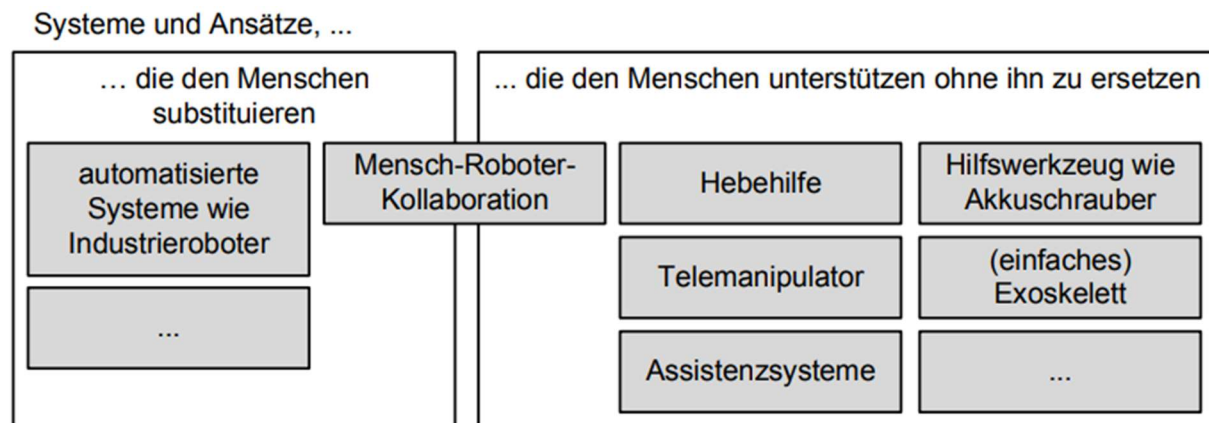


Abbildung 2: Unterstützungssysteme für das Berufsleben
(WEIDNER; REDLICH; WULFSBERG, 2015, S. 14)

2.3 Digitalisierung

Der Begriff Digitalisierung ist wissenschaftlich nicht eindeutig definiert. Im weitesten Sinn kann die Erscheinung der Digitalen Revolution darunter verstanden werden. Dabei handelt es sich um die steigende Bedeutung der Informationstechnologie und der damit verbundenen Verbreitung von digitalen Systemen. Ziel der Digitalisierung für die Industrie 4.0 ist die Autonomisierung und Individualisierung flexibel gestalteter Prozesse.¹⁵

Die zunehmende Bedeutung digitaler Medien zeigt sich bei der Zahl vernetzter Geräte. 2012 waren über 7 Mrd. Geräte weltweit über das Internet miteinander verknüpft. Schätzungen zufolge soll diese Zahl bis 2020 auf 50 Mrd. ansteigen. Durch die starke Vernetzung werden, gerade im Bereich der Produktion, Prozesse zunehmend selbst organisierend. Die steigenden Kundenanforderungen nach individuellen Produkten mit möglichst kurzen Lieferzeiten machen eine autonome Organisation der Fertigung immer notwendiger. Um einen hohen Digitalisierungsgrad der Produktion wirtschaftlich

¹⁴ Vgl. WEIDNER; REDLICH; WULFSBERG, 2015, S. 13

¹⁵ Vgl. BENDEL, 2019, S. 72

zu realisieren, muss das Produktionssystem richtig dimensioniert, sämtliche Störeinflüsse kontrollierbar, alle Varianten bedacht und jeder Prozess an die digitalen Wettbewerbsfaktoren angepasst sein. Wenn diese Bedingungen nicht erfüllt sind, wird die durch Digitalisierung angestrebte Autonomie der Produktion, auf Grund von Störungen, nicht erreicht.¹⁶ Eine Neuausrichtung des kompletten Wertschöpfungsprozesses kann dabei die Folge sein¹⁷.

Neben der Vernetzung von Fertigungsanlagen und dem damit verbundenen Informationsaustausch, spielt die Verarbeitung der Informationen eine wichtige Rolle. So etablieren sich in der industriellen Fertigung vermehrt Robotersysteme mit kognitiven Fähigkeiten. Kognition bedeutet die Aufnahme von Informationen, dessen Verarbeitung und das darauf angepasste Handeln.¹⁸

Digitalisierung bringt nicht nur Vorteile mit sich. Ein entscheidender Nachteil ist der zunehmend notwendige Fokus auf IT-Sicherheit und Datenschutz. Häufig wird das Potenzial von Datenmissbrauch durch dritte unterschätzt. In Unternehmen entstehen durch die Digitalisierung häufig zentrale IT-Sicherheitslücken. Wenn diesen nicht frühzeitig Beachtung geschenkt wird, kann dies zu einer erheblichen Schwächung der Datensicherheit führen.¹⁹

2.4 Fazit

Die Zentralen Ziele der Industrie 4.0, aus Sicht der Fertigungsoptimierung, sind die Automatisierung, Technisierung und Digitalisierung der Produktion. Verbesserungen in diesen Bereichen sind notwendig um zukünftig die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens zu gewährleisten. Die Integration neuer Technologien bietet ein großes Potenzial, um Prozesse effizienter und autonomer zu gestalten. Grundlage für die sinnvolle Nutzung von Technologie ist die Anwendung arbeitswissenschaftlicher Methoden um das komplette Produktionssystem an die Anforderungen neuer Technologien anzupassen. Dabei hängt die Wirtschaftlichkeit einer Produktion stark von der Organisationsstruktur ab. Somit müssen zunächst Arbeits- und Prozessabläufe zweckmäßig gestaltet werden. Wenn diese Bedingung erfüllt ist, kann der Einsatz technischer Neuerungen mit einer Effizienzsteigerung verbunden sein.

Durch die steigenden Kundenanforderungen nach individualisierten Produkten mit immer kürzeren Lieferzeiten müssen Produktionsanlagen flexibler und autonomer gestaltet werden. Vielversprechend ist dabei die Verwendung von Robotersystemen, da diese für eine Vielzahl an Fertigungsschritten angepasst werden können. Dabei hilft

¹⁶ Vgl. WIEGAND, 2018, S. 2 - 3

¹⁷ Vgl. WIEGAND, 2018, S. 7

¹⁸ Vgl. NEUGEBAUER, 2018, S. 245

¹⁹ Vgl. WITTPAHL, 2017, S. 28

die Entwicklung von autonomen Steuerungssystemen und anderen Informationsverarbeitenden Programmen die flexibel einsetzbaren Maschinen noch autonomer zu gestalten. Ein höherer Automationsgrad ist die Folge.

Für den Menschen bedeutet dies zunächst, dass körperlich schwere und monotone Tätigkeiten zunehmend automatisiert durchgeführt werden. Eine physische und psychische Entlastung der menschlichen Arbeit ist dabei mit der Verlagerung zu organisierenden und überwachenden Tätigkeiten verbunden. Doch auch in diesen Bereichen wird durch die Nutzung digitaler Produkte ein zunehmender Automatisierungsgrad erreicht.

3 **Robotersysteme**

Unter dem Begriff Roboter versteht man eine sensomotorische Maschine, welche die menschliche Handlungsfähigkeit erweitert. Dabei sind Roboter deutlich komplexer als andere Maschinen. Durch die häufig hohe Anzahl von Achsen und den dadurch realisierten Freiheitsgraden, können Roboterarme sehr flexibel für eine Vielzahl von Anwendungsgebieten verwendet werden.²⁰

Ein Robotersystem besteht aus verschiedenen Komponenten. Im Kern steht dabei der Roboter selbst. Dieser wird durch einen Endeffektor²¹ und der entsprechenden Steuerungstechnik erweitert. Weiterhin wird Sicherheitstechnik wie z.B. Zäune, Türen und Lichtschranken benötigt, um das Eindringen von Menschen in den Arbeitsbereich des Roboters zu verhindern oder zu überwachen. In den meisten Fällen werden die Abläufe durch eine SPS koordiniert.²²

In der Industrie werden Roboter verwendet um die Automatisierung der Fließproduktion voran zu bringen. Die Ziele sind dabei die Realisierung kurzer Taktzeiten und eine hohe Wiederholgenauigkeit der Prozesse, bei einer sehr hohen Verfügbarkeit des Roboters.²³

Die Vorteile von Robotersystemen gegenüber dem Menschen liegen in der Prozessstabilität, da menschliche Fehler vermieden werden. Weiterhin muss die physische Belastung, durch z.B. körperlich anstrengende Tätigkeiten, und die psychische Belastung, durch z.B. monotone Abläufe, bei einem Roboter nicht berücksichtigt werden, da keine menschlichen Erschöpfungserscheinungen auftreten. Der für die Industrie relevanteste Vorteil ist jedoch die Wirtschaftlichkeit. Durch die sinkenden Anschaffungskosten von Robotersystemen um 40 – 50 % seit 1990 und die im gleichen Zeitraum um ca. 40 % gestiegenen Lohnkosten, werden Roboter zunehmend wirtschaftlicher²⁴. So kann die Produktivität eines Unternehmens durch die Senkung der jährlichen Kosten und gleichzeitig durch die Steigerung von Produktionszahlen stark verbessert werden. Die Wirtschaftlichkeit hängt dabei von den Gegebenheiten der Prozesse ab. Ein Roboter ist im Vergleich zu einem Menschen, wie in Abbildung 3 dargestellt, unflexibler. Somit sollte ein Prozess, der durch ein Robotersystem automatisiert werden soll, keine hohe Variantenvielfalt aufweisen. Weiterhin sollte eine ausreichend große Stückzahl gefertigt werden, um die Produktivität des Roboters auszuschöpfen. Gerade im Schichtbetrieb ist die hohe Verfügbarkeit eines Robotersystems von großer Bedeutung, da dieses durchgehend schichtübergreifend produzieren kann. Durch die Nach-

²⁰ Vgl. BENDEL, 2019, S. 244 - 245

²¹ Bei einem Endeffektor handelt es sich um ein am Roboterflansch fixiertes Werkzeug.

²² Vgl. POTT; DIETZ, 2019, S. 7 - 8

²³ Vgl. STEIL; MAIER, 2019, S. 2

²⁴ Vgl. POTT; DIETZ, 2019, S. 5

frage nach immer individuelleren Produkten gewinnt die Mensch-Roboter-Kollaboration an Bedeutung. Dabei lassen sich die Vorteile von Mensch und Roboter, wie in Abbildung 3 dargestellt, verbinden, was ungeahnte Potenziale für die industrielle Produktion schafft.

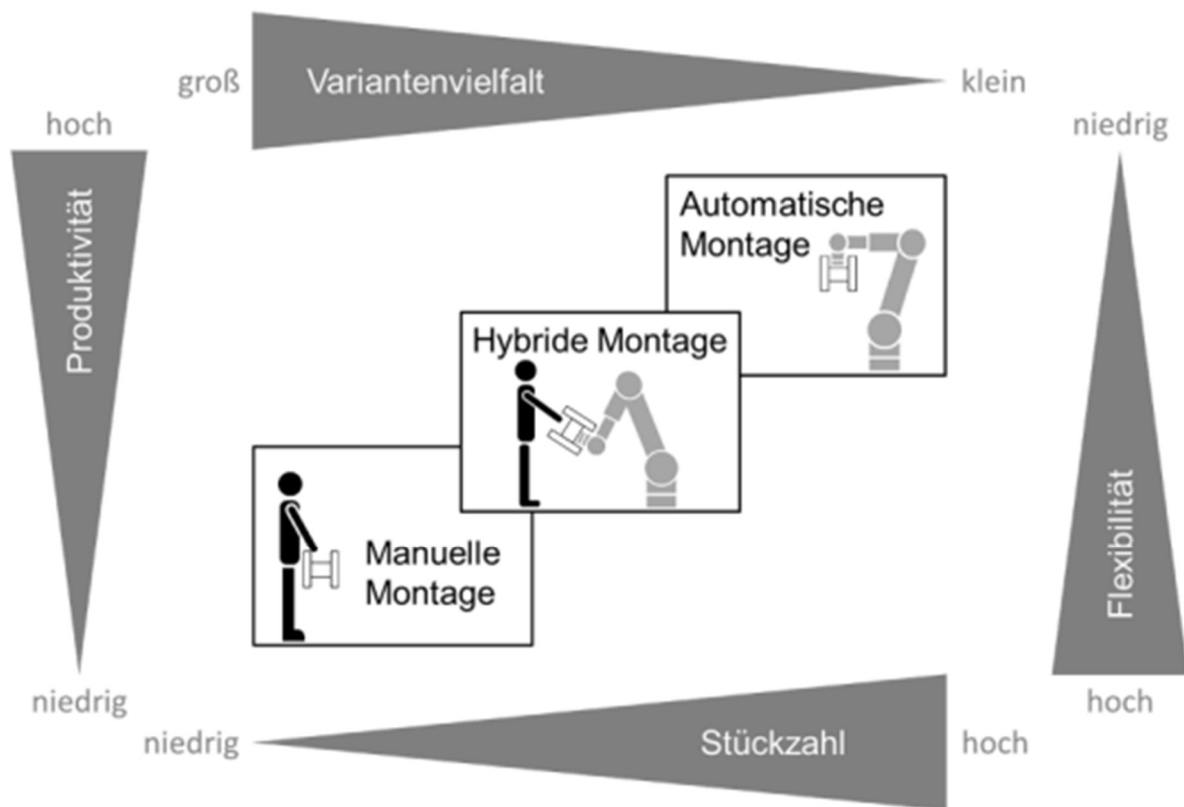


Abbildung 3: Einordnung der hybriden Montage in der industriellen Produktion (WEIDNER; REDLICH; WULFSBERG, 2015, S. 160)

Die Zahl an Robotersystemen weltweit steigt. Der Anstieg an Robotern in Deutschland, gesamt Europa und den USA im Zeitraum von 1994 bis 2010 kann aus Abbildung 4 entnommen werden. Da die Integration eines Robotersystems im Schnitt zwei Arbeitsplätze in der Industrie ersetzt, wird der steigende Trend der Roboteranzahl kritisch gesehen. Jedoch gibt es bisher keine wissenschaftliche Evidenz für die Verringerung von Arbeitsplätzen durch die steigenden Zahlen von Robotersystemen. Das häufig befürchtete Wegfallen von Beschäftigungsstellen wird gesamtwirtschaftlich durch die Entstehung neuer Arbeitsplätze kompensiert. Stand 2019 haben Roboter keinen Einfluss auf die Zahl der Beschäftigungsstellen, jedoch auf die Art der Beschäftigung. So verändern Roboter die Beschäftigungsstrukturen und Tätigkeitsfelder zunehmend in Richtung geistiger Tätigkeiten im administrativen und planerischen Bereich. Allerdings gibt es keine Auswirkung auf die Gesamtzahl an Arbeitsplätzen.²⁵

²⁵ Vgl. BEYER; NAUMER, 2018, S. 95

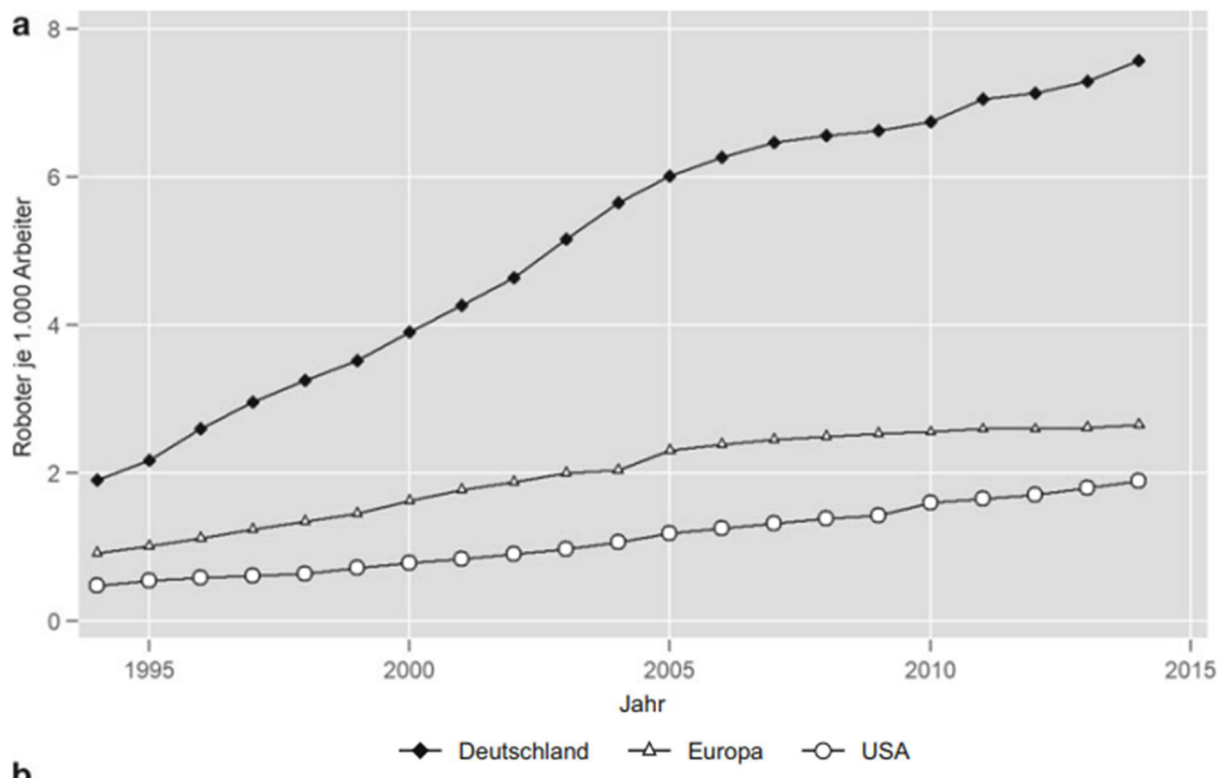


Abbildung 4: Roboterinstallation im verarbeitenden Gewerbe, 1994–2010
(BEYER; NAUMER, 2018, S. 93)

3.1 Industrieroboter

Bei einem Industrieroboter handelt es sich um einen universell einsetzbaren Manipulator, der in der Industrie Anwendung findet. Technisch besitzt er mindestens drei Freiheitsgrade und ist in seiner Bewegungsfolge frei programmierbar.²⁶

Bei einer hochautomatisierten Maschine wie einem Roboter muss gewährleistet werden, dass Menschen während des Betriebs keiner Gefährdung ausgesetzt sind. Der klassische Industrieroboter besitzt einen Schutzkäfig, um das Eindringen von Menschen in den Arbeitsbereich des Roboters zu verhindern. Neuere Systeme basieren auf einer Kombination aus Lichtschranken und Sensoren, die das Eindringen von Personen in den Arbeitsbereich registrieren und den Roboter entsprechend darauf reagieren lassen. Mehr zu Sensorgesteuerten Robotersystemen im Kapitel 3.1.²⁷

Auf Grund der Produktion großer Stückzahlen sind die Preise für Roboter von Robotersystemen stark gesunken. Die größten Anteile der Kosten machen mittlerweile die Erweiterungen, wie z.B. Endeffektoren, Sicherheitseinrichtungen, Programmierung

²⁶ Vgl. POTT; DIETZ, 2019, S. 2; GROTE; BENDER; GÖHLICH, 2018, S. T 107

²⁷ Vgl. BENDEL, 2019, S. 127

und Sensoren, aus. Obwohl die Anschaffungskosten für Industrieroboter kontinuierlich sinken, haben sich die Leistungsdaten stark verbessert. Eine Ursache ist hierbei die Verwendung deutlich leistungsfähigerer Computertechnik. Dadurch wurden Verbesserungen im Bereich der Genauigkeit, Energieeffizienz und Arbeitsgeschwindigkeit erzielt. Eine weitere Neuerung ist die Integrationsmöglichkeit von Sensoren. Wodurch sich die Diagnose- und Anpassungsfähigkeit der Robotersysteme stark verbessert.²⁸

Industrieroboter können nach ihrer Kinematik, wie in Abbildung 5 dargestellt, in serielle und parallele Roboter eingeteilt werden. Bei seriellen Robotern sind die kinematischen Ketten in Reihe angeordnet. Dies hat den Vorteil, dass eine hohe Flexibilität an Bewegungen erreicht wird. Nachteil ist dabei, dass die Antriebe der einzelnen Achsen mit bewegt werden müssen, was das Verhältnis aus Nutzlast zu Eigengewicht verschlechtert. Das Verhältnis aus Nutzlast und Eigengewicht ist wiederum ein Vorteil von parallelen Robotern. Bei dieser Bauform verlaufen die kinematischen Ketten des Roboters parallel. Dadurch wird eine hohe Steifigkeit der Achsen generiert. Dies führt zu einer guten Wiederholgenauigkeit der Bewegung, wodurch Positionen selbst bei gewissen Nutzlasten sehr exakt und mit wenig Toleranz angefahren werden können. Der entscheidende Nachteil von parallelen Robotern ist der verhältnismäßig kleine Arbeitsraum²⁹, trotz großer Roboterkonstruktionen.³⁰

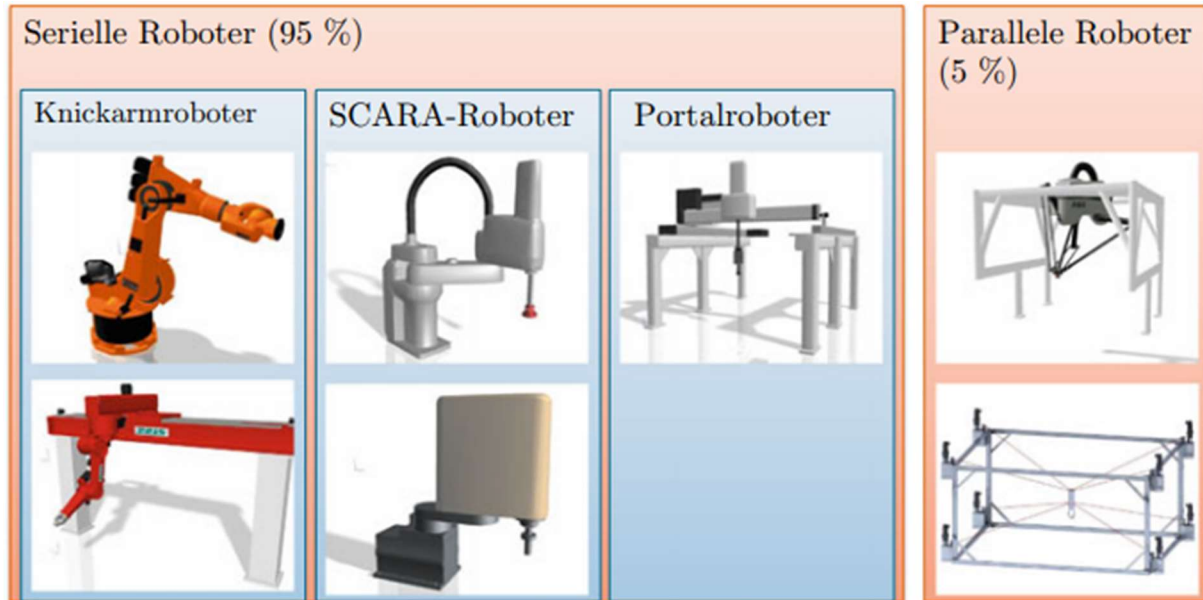


Abbildung 5: Überblick über die wichtigsten Roboterkinematiken (POTT; DIETZ, 2019, S. 18)

²⁸ Vgl. POTT; DIETZ, 2019, S. 5 - 7

²⁹ „Der Arbeitsraum eines Roboters [...] umfasst alle Positionen und Orientierungen, die der Roboter mit seinem Werkzeugmittelpunkt [...] erreichen kann.“ POTT; DIETZ, 2019, S. 26

³⁰ Vgl. GROTE; BENDER; GÖHLICH, 2018, S. T 107

Serielle Roboter, welche den Großteil an Industrierobotern ausmachen, gibt es in verschiedenen Bauformen, von denen Jede spezifische Vor- und Nachteile aufweist. Der Selective Compliance Assembly Robot Arm (im Folgenden mit SCARA abgekürzt und im deutschsprachigen Raum auch als SCARA-Roboter bezeichnet) besitzt drei bis vier Freiheitsgrade. Er eignet sich besonders gut um laterale Kräfte aufzunehmen und lateral gerichtete Bewegungen sanft auszuführen. Portalroboter besitzen, ähnlich wie Werkzeugmaschinen, drei Achsen, die senkrecht zueinander verfahrbar sind. Dadurch wird ein Quaderförmiger Arbeitsraum realisiert, in dem verhältnismäßig große Bauteile bearbeitet werden können. 62 % aller Industrieroboter sind Knickarmroboter. Sie besitzen im Schnitt sechs Achsen und können dadurch eine Vielzahl von Bewegungen realisieren. Bei der Konzeption dieser Roboter wurde sich an der menschlichen Anatomie orientiert. Dies zeigt sich auch in den Bezeichnungen der Roboterelemente, wie z.B. Gelenk, Arm und Handgelenk. Durch die große Flexibilität in der Bewegungsausführung, können Knickarmroboter für eine Vielzahl verschiedener Aufgaben programmiert werden und sind dadurch für viele Industriezweige relevant. Eine detaillierte Übersicht über die Eigenschaften der einzelnen Bauformen im Vergleich ist im Anhang 1 ersichtlich.³¹

Die Steuerung der Roboter erfolgt in der Regel durch herstellerspezifische Software. Da bisher noch keine standardisierte Programmiersprache verwendet wird, macht es Sinn alle Roboterapplikationen nur von einem Hersteller zu beschaffen. Dies verringert den Schulungsaufwand von Mitarbeitern, da sonst Kenntnisse in verschiedener Steuerungssoftware notwendig sind. Die Programmierung eines Roboters kann über die Eingabe von Positionen, durch das Bestimmen von Fahrwegen oder durch die Verwendung der Teach-in Technik erfolgen. Bei Letzterem wird der Roboter zunächst manuell bewegt, wobei das Steuerungssystem die Bewegungen speichert und diese erneut selbstständig ausführen kann. Durch die verschiedenen Möglichkeiten der Programmierung und die benutzerfreundlichen Oberflächen der Steuerungssoftware ist die Implementierung von Robotersystemen auch in Betrieben ohne fundierte Vorkenntnisse möglich.³²

Industrieroboter werden in vielen Branchen verwendet. Am stärksten verbreitet sind sie in der Automobilfertigung und Zulieferindustrie. Weiterhin sind die Bereiche Elektronikfertigung, die Metallbranche und die Kunststoff- und Chemieproduktion stark durch Roboter automatisiert. In den verschiedenen Branchen gibt es auch verschiedene Einsatzgebiete für Roboter.³³

Der verbreitetste Prozess zur Roboterintegration ist der Materialtransport und die damit verbundenen Handlingsaktivitäten. Dazu zählen Bestück-, Be- und Entlade-, sowie

³¹ Vgl. WINKLER, 2006, S. 46 – 47; POTT; DIETZ, 2019, S. 18 – 19

³² Vgl. POTT; DIETZ, 2019, S. 24

³³ Vgl. POTT; DIETZ, 2019, S. 10

Sortierprozesse. Das zweitgrößte Einsatzgebiet für Roboter sind Schweißprozesse, gefolgt von Montageprozessen. Weiterhin gibt es Lackier-, Klebe- und Bearbeitungsroboter, diese machen allerdings nur einen kleinen Anteil der gesamten Industrieroboter aus.³⁴

3.2 Kollaborierende Robotersysteme

Kollaborierende Roboter (im Folgenden mit Cobot abgekürzt) bilden eine neue Stufe der Industrieroboter. Sie sind konzipiert um die Mensch-Roboter-Kollaboration zu verbessern³⁵. Dies wird ermöglicht durch die Verwendung neuer Sicherheitssysteme, welche auf der Überwachung des Arbeitsbereichs durch Sensoren basieren. Dadurch wird ein Wegfallen der Schutzumhausung realisiert. Somit können Menschen in unmittelbarer Nähe zum Roboter arbeiten. Auf die Minimierung der damit verbundenen Kollisionsgefahr und der daraus resultierenden Schäden wird der größte Fokus gelegt. Um diese Gefahrenminimierung zu erreichen, handelt es sich bei Cobots in den meisten Fällen um Leichtbauroboter.³⁶

Der Begriff kollaborierend leitet sich aus den lateinischen Wörtern con (= mit) und labore (= arbeiten) ab. Somit bedeutet die Mensch-Roboter-Kollaboration die direkte Zusammenarbeit von Mensch und Roboter in einem bestimmten Arbeits- / Kollaborationsraum.³⁷

Ziel der Mensch-Roboter-Kollaboration ist die Reduzierung von Belastungen für Mitarbeiter und dadurch die Verhinderung von Berufskrankheiten. Weiterhin können Prozesse, die kein vollständiges Automatisierungspotenzial bieten, zu einem hybriden Fertigungssystem umgewandelt werden und dennoch kompakt an einer Station erfolgen.³⁸

Gründe für die zunehmende Verbreitung von Cobots sind die steigenden Kundenanforderungen nach individuellen kostengünstigen Produkten mit kurzen Lieferzeiten. Der demografische Wandel von Belegschaften macht die technische Unterstützung von Mitarbeitern mit altersbedingter Leistungseinschränkung unabdingbar. Weiterhin können Arbeitsplätze durch die Verwendung von Cobots attraktiver gestaltet werden, was in Zeiten des Fachkräftemangels helfen kann Personal zu finden.³⁹

³⁴ Vgl. POTT; DIETZ, 2019, S. 22 - 24

³⁵ Vgl. Online: SCHLUND; MAYRHOFER; RUPPRECHT, 2018, S. 280 (13.08.2019)

³⁶ Vgl. KÜPPERS, 2018, S. 322

³⁷ Vgl. WEIDNER; REDLICH; WULFSBERG, 2015, S. 159

³⁸ Vgl. WEIDNER; REDLICH; WULFSBERG, 2015, S. 161

³⁹ Vgl. WEIDNER; REDLICH; WULFSBERG, 2015, S. 161

3.2.1 Vorteile gegenüber herkömmlichen Industrierobotern

Cobots weisen viele Vorteile im Vergleich zu herkömmlichen Industrierobotern auf. Die sicherheitsrelevante Leichtbauweise der Roboter bedingt einen geringeren Energieverbrauch als bei herkömmlichen Industrierobotern, da geringere Lasten bewegt werden. Weiterhin können Cobots mit wenig Aufwand umpositioniert werden, wodurch sie eine hohe Flexibilität aufweisen. Außerdem wird die Flexibilität durch das hohe Input der durch die Sensorik aufgenommenen Informationen erhöht. Spezielle Steuerungssoftware kann diese Informationen verarbeiten und den Roboter eigenständig und flexibel handeln lassen. Die Vielzahl an Sensoren eröffnet neue Möglichkeiten der Programmierung von Bewegungen und Verfahrenswegen, wodurch sich der Zeitaufwand zur Einrichtung solcher Robotersysteme deutlich verkleinert.⁴⁰

Cobots ermöglichen die Realisierung hybrider Produktionssysteme. Vorteile sind dabei die Kombination menschlicher Stärken, wie z.B. kognitive Fähigkeiten, mit den Stärken von Maschinen, wie z.B. hohe Präzision und Unermüdlichkeit. Dadurch verbessert sich die Flexibilität und Produktivität. Hybride Produktionssysteme sind ein Zwischenglied zwischen rein manuellen und komplett automatisierten Fertigungssystemen und können somit auch als Übergangslösung eingesetzt werden.⁴¹

3.2.2 Sicherheitsbestimmungen

Auf Grund der direkten Arbeitsnähe zum Menschen gelten für Cobots strenge Sicherheitsbestimmungen. Um diesen in der grundlegenden Roboterkonstruktion gerecht zu werden, besitzen Cobots neben ihrer Leichtbauweise weniger gefährliche Gehäusekanten und Sensoren, die sicher den Arbeitsbereich des Roboters detektieren können. Die Robotersteuerung soll Kollisionen verhindern und falls es doch zu einem Zusammenstoß kommt, sollen die Folgen möglichst gering ausfallen.⁴²

Die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (im Folgenden durch DGUV abgekürzt) gibt die Normen DIN EN ISO 10218, Teil 1 und Teil 2 als Grundlage der Sicherheitsrichtlinien für kollaborierende Roboter an. Den Geltungsbereich beschreibt die DGUV in einer Empfehlung für die Berufsgenossenschaft (im Folgenden durch BG abgekürzt) und dem Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (im Folgenden durch IFA abgekürzt) wie folgt an:

„Für den Bereich der Industrieroboter werden in den Normen DIN EN ISO 10218, Teil 1 und Teil 2, die sicherheitstechnischen Anforderungen für das Anwendungsgebiet

⁴⁰ Vgl. HUBER, 2016, S. 51; KÜPPERS, 2018, S. 323 – 324

⁴¹ Vgl. WEIDNER; REDLICH; WULFSBERG, 2015, S. 159

⁴² Vgl. BOTTHOF; HARTMANN, 2015, S. 61 - 62

„Kollaborierende Roboter (Collaborative Robots)“ definiert. Betroffen sind Arbeitstätigkeiten, bei denen es zu direktem [...] Kontakt zwischen dem kollaborierenden Roboter und arbeitenden Personen kommt. Der in diesen BG/[IFA]-Empfehlungen verwendete Begriff „Kollaborierender Roboter“ schließt neben dem Roboter selbst den Endeffektor – das Werkzeug, das am Roboterarm adaptiert wird und mit dem der Roboter Tätigkeiten durchführt – sowie die damit bewegten Gegenstände ein.“⁴³

Inhalte der DIN EN ISO 10218 sind z.B. die Kraftbegrenzung bei 150 N für kraftbegrenzte Roboter, eine Geschwindigkeitsbegrenzung bei 250 mm/s und Kantenradien von mindestens 5 mm für kraft- / momentbegrenzte Roboter.⁴⁴

Die Inhalte der DIN-Normen wurden um medizinische Grenzwerte durch die DGUV erweitert. Diese Grenzwerte beziehen sich auf die Flächenpressung, die bei einer Kollision entsteht und wurden durch Drucktests an verschiedenen Körperstellen ermittelt. Eine Übersicht über die Grenzwerte an den einzelnen Körperstellen des menschlichen Körpers kann in Anhang 2 eingesehen werden. Dabei wurde der menschliche Körper in 29 einzelne Bereiche unterteilt und jedem dieser Bereiche ein Spitzendruckwert zugeordnet. Die Grenzwerte für die verschiedenen Körperpartien gewährleisten, dass im Falle einer unerwarteten Kollision kein tiefes Durchdringen der Haut oder andere bleibende Schäden entstehen können. Die Verletzungskriterien, die bei sachgemäßer Bedienung nicht zu schwerwiegenden Verletzungen führen dürfen, sind Klemm-/Quetschkräfte, Stoßkräfte und die Druck- und Flächenpressung. Weiterhin ist der maximale Kompressionsweg und die damit verbundene Kompressionskonstante relevant. Diese beschreibt die Kompression von Körperbereichen bis zum Erreichen der Grenzwerte der Verletzungskriterien. In Verbindung mit den Verletzungskriterien stehen die gesundheitlichen Anforderungen an das Arbeiten mit einem kollaborativen Roboter.⁴⁵

Die Anforderungen an den Arbeitsraum sind die Kennzeichnung von Kollisionsflächen, das Vermeiden scharfer und spitzer Kanten, sowie rauer Oberflächen und ausreichend Platz um die Körperbeweglichkeit des Mitarbeiters nicht einzuschränken. Weiterhin darf die Wahrnehmung und Konzentrationsfähigkeit des Mitarbeiters nicht gestört sein, um unerwartete Kollisionen zu vermeiden. Falls es doch zu einer Kollision kommt, dürfen Menschen nicht durch weitere Belastungen wie z.B. elektrische Ströme gefährdet werden.⁴⁶

Aus arbeitsorganisatorischer Sicht muss das Bedienpersonal der Roboterapplikation auf alle möglichen Gefahren hingewiesen werden. Eine Zutrittsbeschränkung kann verhindern, dass ungeschultes Personal versehentlich in den Kollisionsbereich gerät.⁴⁷

⁴³ KÜPPERS, 2018, S. 328

⁴⁴ Vgl. Online: OTTERSBACH; UMBREIT, DGUV, 2009 (15.08.2019)

⁴⁵ Vgl. Online: DGUV, 2017 (15.08.2019); KÜPPERS, 2018, S. 229 - 331

⁴⁶ Vgl. KÜPPERS, 2018, S. 330 - 331

⁴⁷ Vgl. KÜPPERS, 2018, S. 331

Um ein sicheres Arbeiten im Kollaborationsbereich zu gewährleisten, gibt es vier Ansätze um Mitarbeiter vor Schäden zu bewahren:

- Die erste Methode ist der **sicherheitsbewerte überwachte Halt**. Dabei dürfen sich Mensch und Roboter nicht gleichzeitig im Arbeitsraum bewegen. Der Roboter kann autonom Arbeiten durchführen. Betritt der Mitarbeiter jedoch den Arbeitsbereich, muss der Roboter stoppen und kann seine Tätigkeiten erst wieder aufnehmen, wenn sich kein Personal mehr in der Gefahrenzone befindet.⁴⁸
- Eine weniger autonome Vorgehensweise ist die **Handführung**. Bei dieser Methode wird der Roboter mittels einer Steuerungseinheit durch den Menschen manuell gesteuert. Dies eignet sich in erster Linie zur Kraftunterstützung von Bewegungen oder zum Verrichten von sehr gefährlichen und komplexen Tätigkeiten. Wenn sich der Mitarbeiter nicht permanent im Kollaborationsraum befindet, kann für diese Zeit eine andere Methode gewählt werden.⁴⁹
- Eine deutlich autonomere Variante ist die **Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung**. Roboter und Mensch können sich gleichzeitig im Arbeitsbereich bewegen, jedoch nicht eng zusammenarbeiten. Es muss ein permanenter Sicherheitsabstand zwischen Werker und Maschine bestehen. Dieser kann je nach Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters variieren. Sollte es zu einer Unterschreitung des Sicherheitsabstands kommen, kann der Roboter entweder seine Bewegung stoppen oder dem Werker ausweichen. Um dies zu realisieren, müssen die Positionen und Bewegungsgeschwindigkeiten aller sich im Arbeitsbereich befindlichen Personen erkannt werden.⁵⁰
- Die Methode, welche dem Begriff Mensch-Roboter-Kollaboration am nächsten kommt, ist die **Leistungs- und Kraftbegrenzung**. Bei dieser Arbeitsweise können Mensch und Roboter so eng zusammenarbeiten, dass Kollisionen nicht ausgeschlossen sind. Falls es zu einem Zusammenstoß kommt, wird die dabei wirkende Kraft durch die Robotersteuerung begrenzt, sodass es zu keinen schwerwiegenden Verletzungen der Mitarbeiter kommen kann.⁵¹

Da jeweils verschiedene technische Funktionen notwendig sind um die vier Methoden einzusetzen, sollte vor der Implementierung des Robotersystems eine geeignete Methode, in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich, gewählt werden. Dies verhindert unnötige Kosten bei der Realisierung unzureichender Methoden, da Sensoren oder Steuerungskontrollen notwendig sein können.

⁴⁸ Vgl. KÜPPERS, 2018, S. 332

⁴⁹ Vgl. KÜPPERS, 2018, S. 332 - 333

⁵⁰ Vgl. KÜPPERS, 2018, S. 333

⁵¹ Vgl. KÜPPERS, 2018, S. 333

3.2.3 Stand der Technik

Um die vier Methoden der Mensch-Roboter-Kollaboration umzusetzen, gibt es neben den Anforderungen an das Robotersystem, wie der Überwachung des Kollaborationsraums, auch sicherheitstechnische Anforderungen an den Roboter selbst. Dabei gibt es verschiedene technische Ansätze, um die Sicherheitsanforderungen, die an einen kollaborierenden Roboter gestellt werden, zu erfüllen.

Ein einfacher Ansatz ist das Überziehen des Robotergehäuses mit einem sogenannten Soft Cover. Dabei handelt es sich um eine weiche Kunststoffhaut, wie in Abbildung 6 ersichtlich. Diese Ummantelung ist verformbar und gibt bei Krafteinwirkung nach. Dies dämpft Stöße und kann Verletzungen bei Kollisionen mit Mitarbeitern verhindern. Hersteller wie z.B. Fanuc oder ABB verwenden Kunststoffummantelungen als zusätzliche Sicherheitsmaßnahme.⁵²



Abbildung 6: Soft Cover an einem kollaborierenden Roboter der Firma Fanuc
(Online: FANUC, Broschüre: CR Serie, S. 4 / 7) (19.08.2019)

Um die Krafteinwirkung bei einer Kollision zu reduzieren, muss der Roboter einen Zusammenprall identifizieren können. Dazu können Kraft-Moment-Sensoren in die einzelnen Gelenke des Roboters implementiert werden, wie es bei den „LBR iiwa“ Modellen von Kuka oder bei den Robotern von Yuanda Robotics der Fall ist. Beide Roboter sind in Abbildung 7 dargestellt. Die Kraftüberwachung durch Sensoren nutzt auch der Hersteller Fanuc in seiner „CR Serie“. Jedoch wird ein patentierter Kraftsensor in der Roboterbasis verbaut. Neben der Möglichkeit Kollisionen zu erkennen, kann eine Kraft-Moment-Begrenzung realisiert werden. Dabei werden Grenzwerte für Kräfte und Momente festgelegt. Da die Sensoren diese Größen direkt detektieren, stoppt der Roboter sehr zuverlässig und sicher seine Bewegung beim Erreichen dieser Grenzwerte. Auf Grund von kurzen Verzögerungszeiten, kann es beim Zusammenprall von Mensch

⁵² Vgl. Online: FANUC, Broschüre: CR Serie, S. 4 (19.08.2019)

und Roboter dennoch zu Verletzungen kommen. Somit kann diese Art der Sicherheits-einrichtung nicht ohne andere Sicherheitsvorkehrungen verwendet werden.⁵³



Abbildung 7: KUKA „LBR iiwa“ / Yuanda Robot
(Online: KUKA, Einleger: LBR iiwa, S. 1 / YUANDA, Broschüre: Yuanda Robot, S. 1)
(19.08.2019)

Eine weitere zuverlässige Methode der Kraft-Moment-Begrenzung ist das Überwa-chen der Motorströme. Dabei wird die Motorleistung und somit auch die von den Mo-toren aufgebrachte Kraft begrenzt. Eine Kollision wird durch das Erreichen der Motor-leistungsgrenzwerte erkannt und der Roboter gerät in Stillstand. Beispiele für diese Art der indirekten Kraftüberwachung sind die „UR“-Modelle von Universal Robots oder die „YuMi“-Modelle von ABB. Beide Roboter sind in Abbildung 8 abgebildet.⁵⁴



Abbildung 8: Universal Robots „UR Serie“ / ABB „YuMi – IRB 14000“
(online: UR, Whitpaper: Kollaborative Robotik, s. 2 / ABB, Datenblatt: YuMi, S. 1)
(19.08.2019)

⁵³ Vgl. STEIL; MAIER, 2019, S. 5; Online: YUANDA, Broschüre: Yuanda Robot, S. 4 (19.08.2019)

⁵⁴ Vgl. STEIL; MAIER, 2019, S. 5

Eine andere Möglichkeit die wirkenden Kräfte bei einem Zusammenprall mit dem Roboter zu begrenzen, ist die Verwendung passiver mechanischer Federn, die bei einer Kollision Kräfte aufnehmen und den Roboter zurückweichen lassen. Mechanische Federn finden häufig bei bionischen Robotern Verwendung. So auch beim „Biorob“ von Bionic Robotics, welcher in Abbildung 9 dargestellt ist. Beim „Biorob“ befinden sich die Federn in den Achsen und sind zur Kraftaufnahme, beziehungsweise zum Realisieren von Bewegungen konzipiert.⁵⁵



Abbildung 9: Bionic Robotics GmbH „Biorob“
(Online: BIONIC ROBOTICS, Biorob product folder, S. 3) (20.08.2019)

Wenn komplett auf die Detektion eines bestimmten Arbeitsbereichs verzichtet werden soll, kann das von Bosch entwickelte „APAS“ Robotersystem verwendet werden. Dabei wird die Sicherheit durch Sensoren an der Roboter Oberfläche gewährleistet. Die unter der Roboterhaut befindlichen 120 kapazitiven Näherungssensoren detektieren das Umfeld des Roboterarms bis zu einem Abstand von 50 mm. Kommt ein Mensch innerhalb dieses Nahbereiches stoppt der Roboter seine Bewegung und steht so lange still, bis der Mitarbeiter den Nahbereich wieder verlässt. Nach Gewährleistung eines Abstandes von mehr als 50 mm nimmt der Roboter selbstständig seine Arbeit an der Stelle wieder auf, an der der Stopp erfolgte. Durch diesen permanent überwachten Nahbereich von 50 mm, welcher in Abbildung 10 schematisch dargestellt ist, und eine maximale Bahngeschwindigkeit von 0,5 m/s kann es zu keiner durch den Roboter verursachten Kollision kommen.⁵⁶

⁵⁵ Vgl. STEIL; MAIER, 2019, S. 5

⁵⁶ Vgl. STEIL; MAIER, 2019, S. 5; Online: BOSCH, APAS assistant Broschüre, S. 8 (20.08.2019)

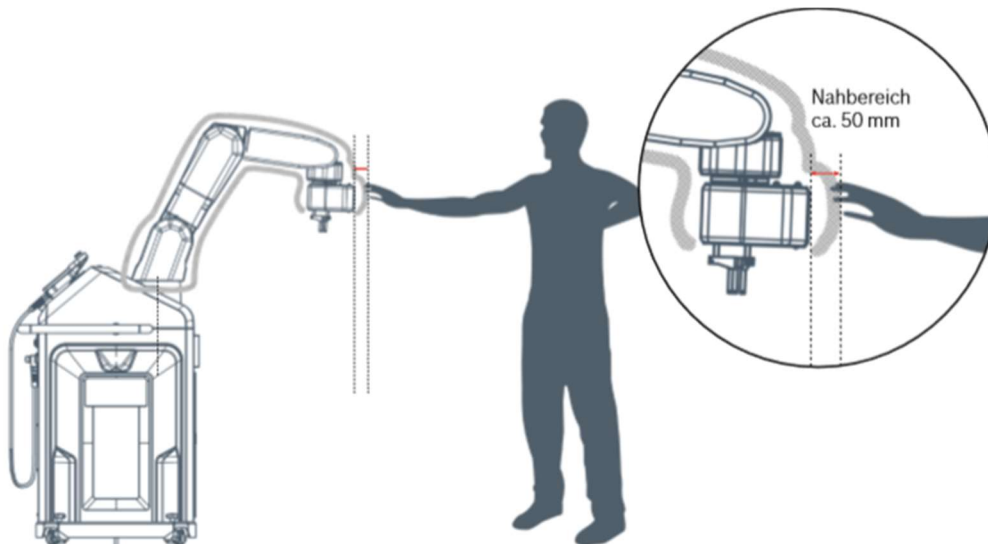


Abbildung 10: Nahbereich Bosch „APAS assistant“
(Online: BOSCH, APAS assistant Broschüre, S. 8) (20.08.2019)

Das „APAS assistant“ Robotersystem kann jedoch, wenn gewünscht, seinen Arbeitsradius von 930 mm zuzüglich eines flexibel einstellbaren Sicherheitsabstandes selbst überwachen und somit einen komplett detektierten Kollaborationsbereich gewährleisten. Dadurch kann der Roboter eine Bahngeschwindigkeit von 2,3 m/s realisieren, welche nur dann auf 0,5 m/s reduziert wird, wenn ein Mitarbeiter den Kollaborationsraum betritt. Die Überwachung des Arbeitsbereiches wird durch die Verwendung zweier Laserscanner umgesetzt. Eine schematische Darstellung dieser Detektion ist in Abbildung 11 und eine Darstellung des „APAS assistant“ ist in Abbildung 12 dargestellt.⁵⁷

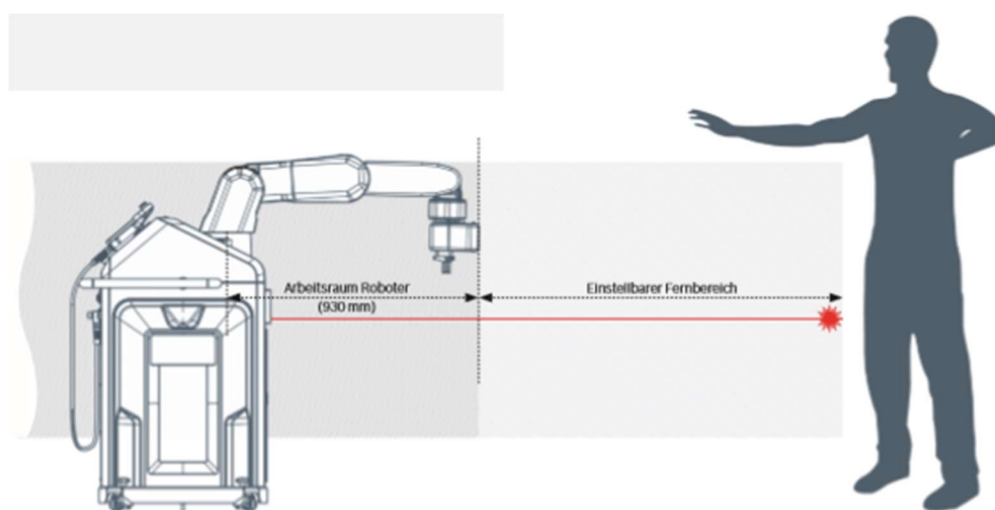


Abbildung 11: Detektion Kollaborationsbereich Bosch „APAS assistant“
(Online: BOSCH, APAS assistant Broschüre, S. 10) (20.08.2019)

⁵⁷ Vgl. Online: BOSCH, APAS assistant Broschüre, S. 11 (20.08.2019)



Abbildung 12: Bosch „APAS assistant“
(Online: BOSCH, APAS Broschüre, S. 9) (20.08.2019)

3.3 Fazit

Als Mittel zur Automatisierung der Fertigung haben Roboter stark an Bedeutung gewonnen. Gründe dafür sind die sinkenden Anschaffungskosten von Robotersystemen und die im Gegensatz dazu steigenden Lohnkosten. Weiterhin werden Industrieroboter zunehmend leistungsfähiger, flexibler und effizienter. Sie realisieren kurze Taktzeiten und generieren eine hohe Wiederholgenauigkeit, was die Produktivität der industriellen Fertigung maßgebend verbessert.

Auf Grund der steigenden Nachfrage nach individualisierten Produkten und der Forderung von immer schnelleren Lieferzeiten, hat das Gebiet der Mensch-Roboter-Kollaboration starkes Interesse bei vielen produzierenden Unternehmen geweckt. Neue Technologien wie kollaborierende Roboter bieten große Potenziale zur Optimierung von Produktionskennzahlen. An Hybriden Arbeitsplätzen können die Stärken von Mensch und Maschine sinnvoll kombiniert werden. Cobots gewährleisten dabei eine enge und somit platzsparende Zusammenarbeit mit dem menschlichen Personal.

Neben den Vorteilen, die Roboterapplikationen durch ihre Integration mit sich bringen, entstehen neue Herausforderungen und Kompetenzbereiche für planerische und pro-

zessüberwachende Bereiche in Unternehmen. So sind entsprechende Sicherheitsanforderungen zu beachten. Gerade bei Arbeitsplätzen, an denen Cobots eingesetzt werden, gelten besonders strenge Richtlinien an die Sicherheitsvorkehrungen für die Mensch-Roboter-Kollaboration.

Durch die verschiedenen technischen Ansätze gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Robotersystemen mit unterschiedlich konzeptionierten Sicherheitsvorkehrungen. Aus der großen Auswahl an Robotersystemen muss das passende ausgewählt werden, um eine Überdimensionierung der Applikation und deren sicherheitstechnischer Merkmale zu verhindern. Jedoch muss die Zweckmäßigkeit für den Anwendungsfall und dessen Sicherheitsrichtlinien gewährleistet werden.

4 Planungsprojekte

Bei der HKR Automotive gibt es momentan zwei Projekte, für die eine Einführung eines kollaborierenden Robotersystems in Frage kommt. Dabei handelt es sich einmal um die Linienenerweiterung einer bestehenden Fertigungslinie. Diese Linienenerweiterung wird bedingt durch die Steigerung des Produktionsvolumens und durch die Fertigung neuer Produktvarianten, welche nicht komplett über Anlagenkomponenten der bestehenden Linie produziert werden können. Bei dem Produkt handelt es sich um einen Regler für bürstenlose Gleichstrommotoren. Da bereits die Nachfrage für eine neuere Variante dieser Steuergeräte besteht, soll außerdem eine Linie zum Fertigen der fünften Generation der Regler für bürstenlose Gleichstrommotoren beschafft werden. In beiden Projekten ist es denkbar ein kollaborierendes Robotersystem zu integrieren, um Handlingsaufgaben zu automatisieren. Bevor eine detaillierte Konzeptplanung angegangen werden kann, müssen zunächst geeignete Cobots gesichtet werden. Da es sinnvoll ist, sich auf einen Roboterlieferanten zu beschränken, sollten die Hersteller für Robotersysteme gegenübergestellt und verglichen werden. Dabei ist das Ziel den passendsten Lieferanten auszuwählen, um bei der Projektplanung und bei zukünftigen Projekten einen festen Ansprechpartner zu haben, der ein geeignetes Sortiment an Roboterlösungen bietet.

4.1 Auswahl eines geeigneten Roboterherstellers

Bei der Wahl eines geeigneten Cobot-Lieferanten wurden die Hersteller ABB, Bosch, Fanuc, KUKA, Rethink Robotics, Universal Robots und Yuanda Robotics berücksichtigt. Da ABB als kollaborierenden Roboter nur den „YuMi – IRB 14000“ anbietet und dieser eine maximale Reichweite von 559 mm aufweist, fällt ABB als Lieferant raus⁵⁸. Bei den werksinternen Handlingprozessen müssen häufig größere Distanzen überbrückt werden. Cobots des Herstellers KUKA sind nach unverbindlichen Preisauskünften erheblich teurer in der Anschaffung als vergleichbare Applikationen konkurrierender Hersteller. Somit kommt auch KUKA nicht in die engere Auswahl. Der erst seit Februar 2017 bestehende deutsche Hersteller Yuanda Robotics möchte sich mit einem Kampfprijs von 24.500 € für eine komplett einsatzbereite kollaborierende Roboterapplikation auf dem Markt behaupten. Um einen dieser vorerst auf 60 Stück limitierten Roboter zu erwerben musste eine Bestellfrist bis zum 31.07.2019 eingehalten werden⁵⁹. Da dieser Zeitraum zu kurzfristig für die Umsetzung bestehender Projekte war und vorerst keine weiteren Roboter verkauft werden, scheidet Yuanda Robotics auch aus der engeren Auswahl aus.

⁵⁸ Vgl. Online: ABB, Datenblatt: YuMi, S. 2

⁵⁹ Vgl. Online: DIE DEUTSCHE WIRTSCHAFT, Robotik: vom Newcomer zum Branchenstar in nur zwei Jahren (26.08.2019)

Um aus den übrig gebliebenen Herstellern eine Priorisierung zu bilden, kann die Methode der Nutzwertanalyse verwendet werden.

Eine Nutzwertanalyse dient der strukturierten Aufschlüsselung komplexer Sachverhalte. Ziel ist dabei eine für alle Parteien nachvollziehbare Entscheidungsfindung. Dabei soll keine Vereinfachung oder Pauschalisierung stattfinden, sondern jeder Einflussfaktor für sich betrachtet und berücksichtigt werden.⁶⁰

Die bei der Nutzwertanalyse berücksichtigten Einflussfaktoren zur Bestimmung einer Reihenfolge der Cobot-Lieferanten sind die Preise, das Produktportfolio, die verwendeten Technologien und die Distanz bis zum Service- und Vertriebsstandort der einzelnen Hersteller. Um eine Wichtung der Kriterien vorzunehmen können diese, wie in Tabelle 1 ersichtlich, mittels paarweisen Vergleich in einer Kreuztabelle gegenübergestellt werden. Dabei werden alle Kriterien nacheinander miteinander verglichen und die Wichtigkeit im direkten Vergleich durch die Vergabe von Punkten festgelegt. Die anteilige Wichtung eines Merkmals errechnet sich durch den Quotienten aus dessen Punktzahl und der gesamten Anzahl an vergebenen Punkten.⁶¹

	Preise / Anschaffungskosten	Produktportfolio	Distanz Vertrieb und Service	Verwendeten Technologien	Summe	Gewichtung
Preise / Anschaffungskosten	X	1	1	2	4	0,33
Produktportfolio	1	X	1	1	3	0,25
Distanz Vertrieb und Service	1	1	X	1	3	0,25
Verwendeten Technologien	0	1	1	X	2	0,17
					12	1,00

BEWERTUNG 0 ist **weniger** wichtig als ...
 1 ist **gleich** wichtig wie ...
 2 ist **wichtiger** als ...
 (von Zeile nach Spalte gelesen)

Tabelle 1: Kreuztabelle zum paarweisen Vergleich

Nachdem den Bewertungskriterien eine Wichtung zugeordnet wurde, können jedem Hersteller in allen Kategorien Punkte gegeben werden. Diese Punktzahl wird, wie in

⁶⁰ Vgl. KÜHNAPFEL, 2019, S. 1

⁶¹ Vgl. GLATTE, 2014, S. 141 - 142

Tabelle 2 dargestellt, mit der Wichtung multipliziert und ergibt eine Gesamtpunktzahl, welche den Nutzwert der einzelnen Variante darstellt. Zur objektiven Nachvollziehbarkeit der Punktzahlhöhe, können Bemerkungen genutzt werden.⁶²

Gewichtung	Bewertungspunkte	Rethink Robotics			Fanuc		
		Bemerkungen	Punkte		Bemerkungen	Punkte	
0,33	Preise / Anschaffungskosten	ca. 35.000 € mit Greifer	6	1,98	ca. 35.000 €	6	1,98
0,25	Produktportfolio	1 vielseitig einsetzbarer Roboter	5	1,25	große Auswahl an Robotern	8	2,00
0,25	Distanz Vertrieb / Service	500 km	2	0,50	150 km	8	2,00
0,17	Verwendete Technologien	Momentsensoren in Achsen	6	1,02	Sensor in Basis + Kunststoffmantel	7	1,19
Gesamtpunkte			19	4,75		29	7,17

Gewichtung	Bewertungspunkte	Universal Robots			Bosch		
		Bemerkungen	Punkte		Bemerkungen	Punkte	
0,33	Preise / Anschaffungskosten	ca. 25.000 €	8	2,64	ca. 45.000 €	5	1,65
0,25	Produktportfolio	unterschiedliche Größen + Varianten	7	1,75	1 vielseitig einsetzbarer Roboter	5	1,25
0,25	Distanz Vertrieb / Service	120 km	8	2,00	190 km	7	1,75
0,17	Verwendete Technologien	Überwachung Motorströme	6	1,02	120 Näherungssensoren	9	1,53
Gesamtpunkte			29	7,41		26	6,18

Punkte:	10 (sehr gut)	4 (ausreichend)
	8 (gut)	2 (mangelhaft)
	6 (befriedigend)	0 (ungenügend)

Tabelle 2: Nutzwertberechnung

Aus der Nutzwertberechnung in Tabelle 2 geht hervor, dass der Hersteller Universal Robots zu favorisieren ist. Als mögliche Alternative kann der Roboterbauer Fanuc gesehen werden. Rethink Robotics schneidet aufgrund seines weit entfernt gelegenen Standortes und Bosch aufgrund seiner hohen Preise verhältnismäßig schlecht ab.

⁶² Vgl. KÜHNAPFEL, 2019, S. 19

4.2 Linienenerweiterung BLDC

Bei der Linienenerweiterung zur Herstellung der Steuergeräte für bürstenlose Gleichstrommotoren (englisch brushless direct current und im Folgenden durch BLDC abgekürzt) handelt es sich um eine Maßnahme zur Steigerung der Produktionskapazität und Variantenvielfalt. Es sollen jährlich 480.000 Baugruppen zum Kunden geliefert werden. Zuzüglich 15 % Schwankung und 6,15 % Nacharbeitsrate, muss die Anlage eine Produktionskapazität von rund 586.000 Teilen pro Jahr gewährleisten. Weiterhin muss die erweiterte Linie in der Lage sein, drei unterschiedliche Varianten zu fertigen. Um diese Ziele zu erreichen wird eine neue Station zur Durchführung des In-Circuit-Tests (im Folgenden durch ICT abgekürzt) und eine weitere Station zur Durchführung der End of Line Prüfung (im Folgenden durch EOL abgekürzt) beschafft. Um Variantenverwechslungen zu vermeiden und Zeiten bei manuellen Tätigkeiten zu sparen, kann ein kollaborierendes Robotersystem zum Bauteilhandling eingesetzt werden.

4.2.1 Produkt

Bei dem BLDC-Steuergerät, welches in Abbildung 13 dargestellt ist, handelt es sich um einen Innenraumgebläseregler. Dieser steuert die Drehzahl des Gebläsemotors. Bei dem Gebläsemotor handelt es sich um einen bürstenlosen Gleichstrommotor, welcher mit einem Lüfterrad verbunden ist. Das Gebläse dient der Luftmengenerzeugung und somit der Belüftung des PKW-Innenraums.⁶³

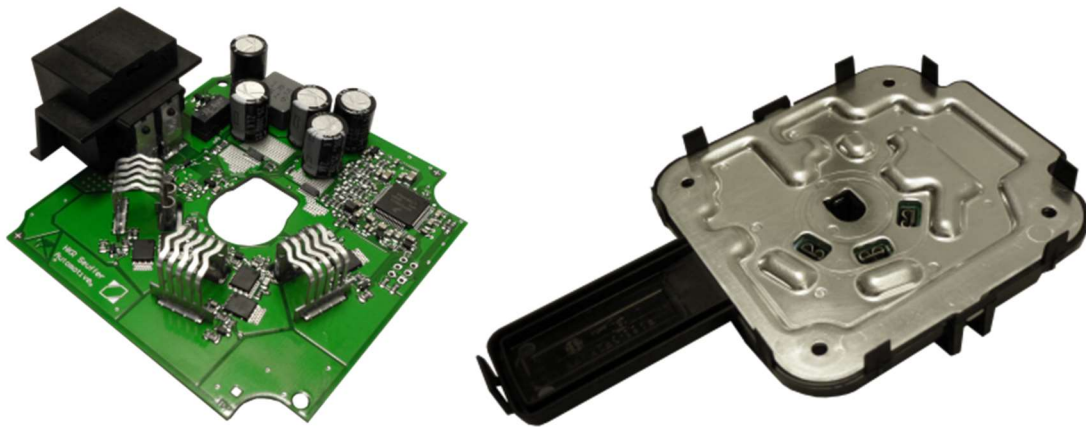


Abbildung 13: BLDC-Regler

Die Nennspannung des BLDC-Reglers beträgt 13 V und der Betriebsspannungsbereich liegt zwischen 9 V und 16 V bei einer Toleranz von $\pm 0,5$ V. Innerhalb dieses Bereichs dürfen Betriebsspannungsänderungen keinen Einfluss auf die Motordrehzahl

⁶³ Vgl. Betriebsinterne Unterlagen: C-140006-Pflichtenheft_Specification, S. 6 (26.08.2019)

haben. Die minimale Betriebstemperatur liegt bei $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und die maximale Betriebstemperatur bei $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Toleranz beträgt dabei $\pm 3\text{ K}$.⁶⁴

Durch die Überwachung der Motorströme ist das Abschalten des Motors bei Schwergängigkeit, Blockierung oder Kurzschlüssen gewährleistet. Die Begrenzung des Motorstroms verhindert, dass das Steuergerät oder der Motor innerhalb des Betriebstemperatur- und Betriebsspannungsbereichs Schäden erleiden kann. Es können lediglich reversible Überlastungen auftreten. Weiterhin ist die Überhitzung durch die Verwendung einer Thermosicherung, welche als zweiter Abschaltpfad dient, ausgeschlossen.⁶⁵

Die Anforderungen an die Lebensdauer des BLDC-Reglers liegen bei 15 Jahren beziehungsweise bei einer Laufleistung von 200.000 Meilen des PKW.⁶⁶

Das Steuergerät besteht aus einer Leiterplatte, welche mit SMT- und THT-Bauteilen bestückt wurde, einem Kunststoffgehäuse, einem Kühlblech und Wärmeleitpaste, welche mittels einer Vergussanlage aufgebracht wird.

Vom BLDC Regler sollen ab Mitte 2020 zwei weitere Varianten, zu der momentan bestehenden, produziert werden. Die Varianten unterscheiden sich konstruktiv lediglich im verwendeten Gehäuse, da die neuen Varianten ein jeweils leicht verändertes Kunststoffgehäuse benötigen. Der Unterschied besteht in der Form und Größe des länglichen Lufteinlasses, welcher in Abbildung 14 anhand von Modellen dargestellt und beschriftet ist.⁶⁷

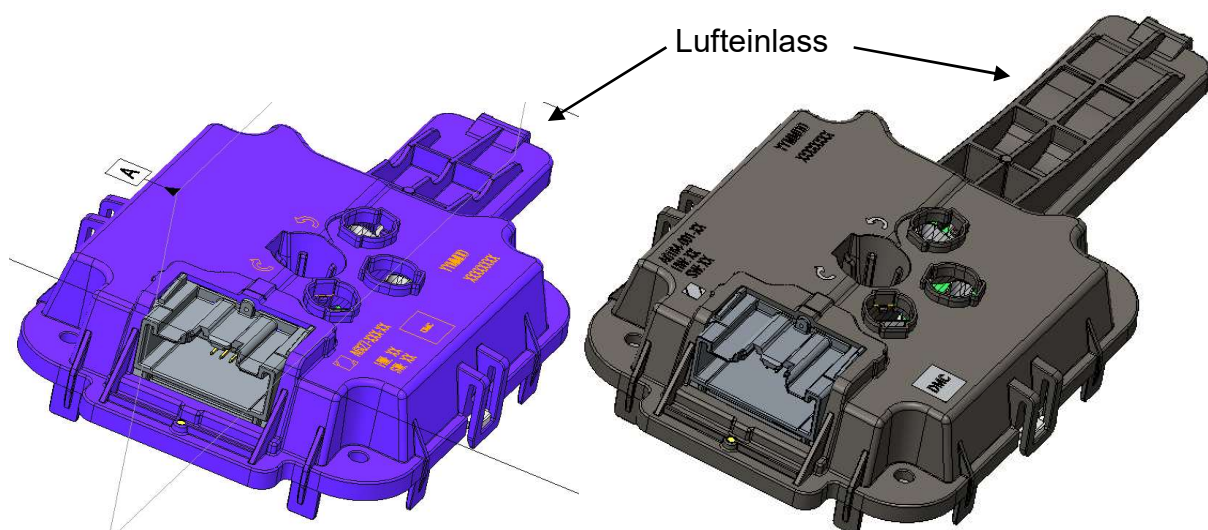


Abbildung 14: Neue Varianten des BLDC-Reglers
(Betriebsinterne Unterlagen: Vergleich A2XX-WL-Paccar) (26.08.2019)

⁶⁴ Vgl. Betriebsinterne Unterlagen: C-140006-Pflichtenheft_Specification, S. 9 / 12 / 27 (26.08.2019)

⁶⁵ Vgl. Betriebsinterne Unterlagen: C-140006-Pflichtenheft_Specification, S. 6 / 11 (26.08.2019)

⁶⁶ Vgl. Betriebsinterne Unterlagen: C-140006-Pflichtenheft_Specification, S. 28 (26.08.2019)

⁶⁷ Vgl. Betriebsinterne Unterlagen: Vergleich A2XX-WL-Paccar (26.08.2018)

4.2.2 Konzept

Die erweiterte Produktionslinie soll eine Stückzahl von 586.000 Baugruppen jährlich fertigen können. Bei einer Verfügbarkeit von 90 % und den bei HKR vorherrschenden Produktionszeiten muss ein entsprechendes Linienkonzept eine Taktzeit von 30 s realisieren. Die Erweiterung der BLDC-Linie bezieht sich in erster Linie auf die Endmontage der Produkte, da die Vormontage seit Beginn der Fertigung des BLDC-Produkts für ein höheres Produktionsvolumen ausgelegt wurde. Da es sich um eine Linienenerweiterung handelt und sich die neuen Varianten lediglich in der Gehäuseform unterscheiden, ändert sich an den bestehenden Prozessen und dessen Ablauf nichts. Der Prozessablauf, welcher im Anhang 3 eingesehen werden kann, unterscheidet sich nur darin, dass ein automatisches Bauteilhandling durch einen Cobot stattfindet. Die Position des Roboters kann aus dem Layoutkonzept, welches in Abbildung 15 dargestellt ist, entnommen werden. Im Layout wurden eine zweite Station für den ICT sowie ein weiterer Rundtisch für den EOL-Test berücksichtigt. Weiterhin sind Regale für Materialzuführung und der Cobot eingeplant wurden.

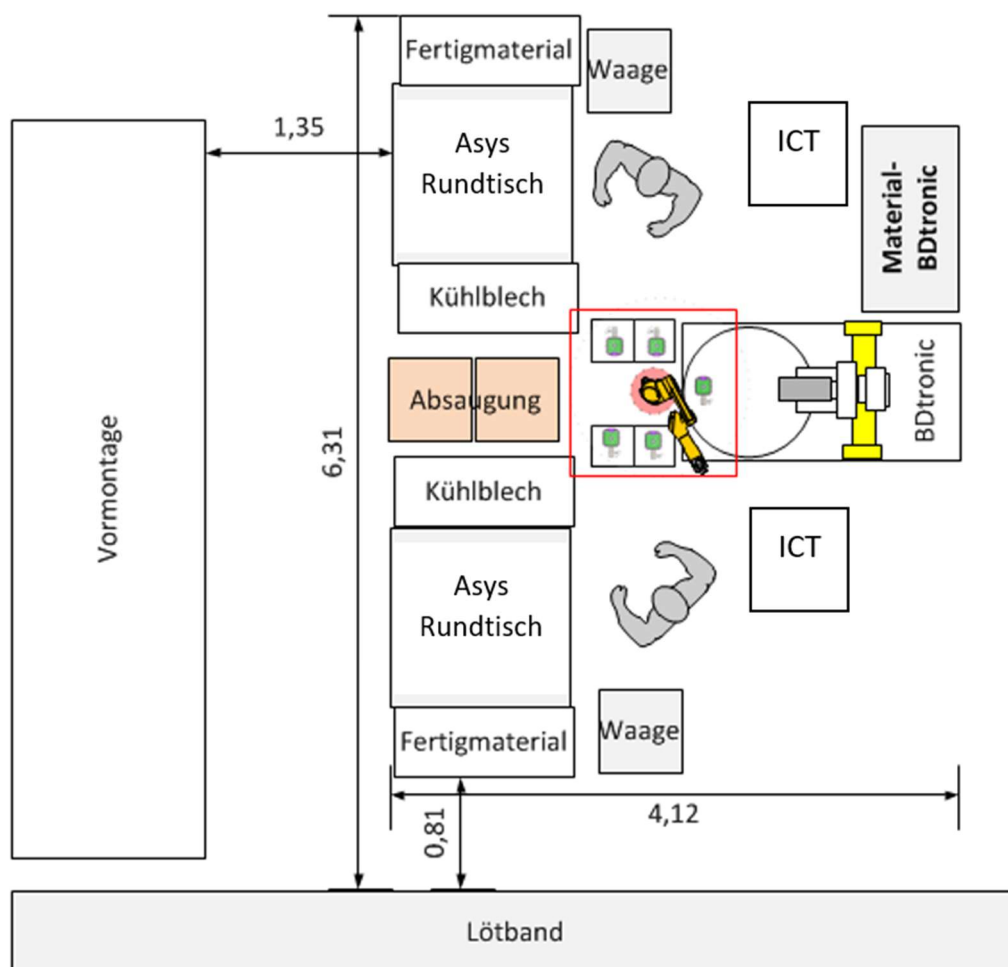
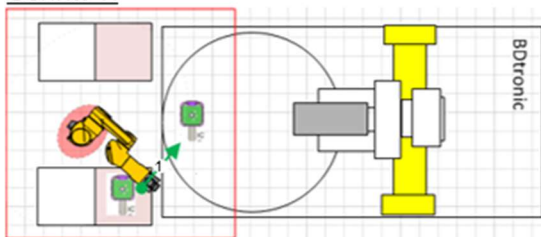


Abbildung 15: Layoutkonzept Linienenerweiterung BLDC

Der Cobot übernimmt die Aufgabe des Bauteilhandlings zur Bestückung der BDtronic Vergussanlage. In dieser wird Wärmeleitpaste auf die Bauteile aufgetragen, welche später einen wärmeleitenden Kontakt zwischen Leiterplatte und Kühlblech herstellt. Besonderheit ist dabei die gute thermische, bei gleichzeitig schlechter elektrischer Leitfähigkeit. Auf Grund verschiedener Varianten, von denen mitunter simultan zwei gleichzeitig gefertigt werden sollen, muss der Roboter eine Baugruppe immer zu der Anlagenseite zurück transportieren, von der er diese entnommen hat. Ein Konzept für den Prozessablauf des Roboters, in der die Fertigung zweier unterschiedlicher Varianten berücksichtigt wurde, liefert Abbildung 16. Die Technische Umsetzung des Variantenhandlings stellt somit kein Problem dar.

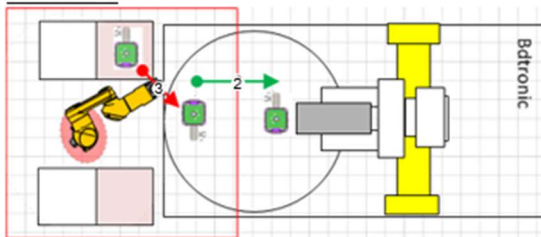
Schritt 1:



Zu bearbeitende Baugruppe wird auf Bearbeitungsposition 1.1 bereitgelegt.

1: Cobot setzt Baugruppe in Aufnahme auf Rundtischseite 1.

Schritt 2:

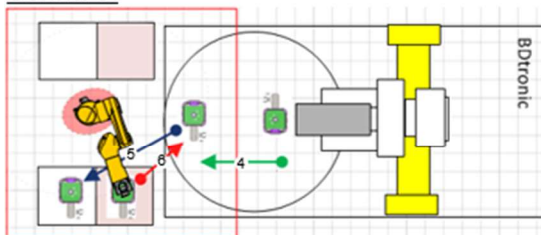


2: Rundtisch dreht

Zu bearbeitende Baugruppe wird auf Bearbeitungsposition 2.1 bereitgelegt.

3: Cobot setzt Baugruppe in Aufnahme auf Rundtischseite 2.

Schritt 3:



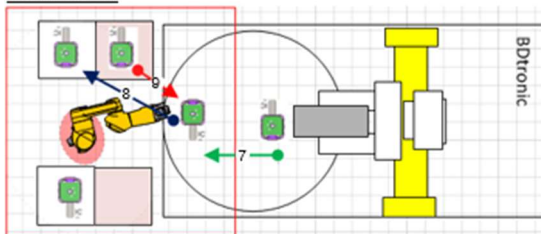
4: Rundtisch dreht

5: Cobot setzt bearbeitete Baugruppe auf Fertigposition 1.2

Zu bearbeitende Baugruppe wird auf Bearbeitungsposition 1.1 bereitgelegt.

6: Cobot setzt Baugruppe in Aufnahme auf Rundtischseite 1.

Schritt 4:



7: Rundtisch dreht

8: Cobot setzt bearbeitete Baugruppe auf Fertigposition 2.2

Zu bearbeitende Baugruppe wird auf Bearbeitungsposition 2.1 bereitgelegt.

9: Cobot setzt Baugruppe in Aufnahme auf Rundtischseite 2.

Abbildung 16: Prozessablauf Cobot

Das Konzept kann prinzipiell auch ohne die Integration eines Robotersystems umgesetzt werden. Die Vor- und Nachteile, sowie die Sinnhaftigkeit eines Cobots müssen in einer Konzeptbewertung erörtert werden.

4.2.3 Konzeptbewertung

Da es sich bei der Linienenerweiterung um die gespiegelte Version der bereits bestehenden Linie handelt, ist die Roboterapplikation die einzige wirkliche Neuerung. Somit werden vordergründig die Vor- und Nachteile des Cobots behandelt. Dieser eignet sich gut, um für einen störungsfreien Ablauf der BDtronic Vergussanlage zu sorgen, was die Einhaltung der Taktzeit gewährleistet. Weiterhin können Bauteile nicht von Mitarbeitern verwechselt werden, was die Gefahr der Auslieferung falscher Baugruppen verringert. Ein weiterer Vorteil ist die Verkürzung von Laufwegen, wodurch eine ergonomische Verbesserung für die Mitarbeiter erreicht wird. Ein Roboterarm ist sehr flexibel einsetzbar. Somit kann der Cobot auch für andere Anwendungsbereiche angepasst und genutzt werden.

Die grundlegende Voraussetzung für den Einsatz eines Robotersystems ist die technische Machbarkeit des Konzepts⁶⁸. Grundsätzlich ist die Implementierung eines Cobots technisch umsetzbar. In dem genannten Konzept müsste der Roboter jedoch eine Anbindung an das interne ITAC-System erhalten. Dies erschwert die Programmierung, wodurch entweder externe Hilfe benötigt wird oder ein erhöhter Schulungsaufwand notwendig ist. Ein weiterer Aspekt der Machbarkeitsbetrachtung ist die Einhaltung der Sicherheitsrichtlinien. Um diese zu erfüllen muss eine Betriebsmethode des Roboters gewählt werden. In diesem Konzept bietet sich die Methode der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung an, da Mitarbeiter regelmäßig in den Kollaborationsraum eindringen um dort Bauteile abzulegen oder zu entnehmen. Bei dieser Variante reduziert der Roboter seine Geschwindigkeit häufig von 1 m/s auf 0,5 m/s. Die geforderte Taktzeit von 30 s wäre dennoch realisierbar.

Bei einer Risikobewertung der Roboterapplikation innerhalb des Konzepts müssen zwei potenzielle Gefährdungen berücksichtigt werden:

- Kollision mit dem Roboter
- Kollision mit umhergeschleuderten Baugruppen

Nach dem Risikographen der DIN ISO/TR 14121-2, welcher im Anhang 4 eingesehen werden kann, müssen zur Risikobeurteilung „die Verletzungsschwere (S1, S2), die Expositionshäufigkeit (F1, F2), die Eintrittswahrscheinlichkeit (O1, O2, O3), und [die] Möglichkeit zur Vermeidung (P1, P2)“⁶⁹ berücksichtigt werden. Wenn diese Kategorien bewertet wurden, kann aus dem Graphen der Risikoindex (im Folgenden durch RI abgekürzt) abgelesen werden. RI wird in Werten von eins bis sechs vergeben, wobei die Risikobewertung je besser ist, desto kleiner der Zahlenwert ausfällt. Eine Risikobewertung des Konzepts der BLDC Linienenerweiterung ist in Tabelle 3 ersichtlich.⁷⁰

⁶⁸ Vgl. POTT; DIETZ, 2019, S. 94

⁶⁹ POTT; DIETZ, 2019, S. 127

⁷⁰ Vgl. POTT; DIETZ, 2019, S. 127



Gefährdung	Gefährdungsereignis	S	F	O	P	RI
Kollision mit Roboter	Bedienpersonal befindet sich im Kollaborationsraum und wird vom Roboterarm getroffen	S1	F2	O3	P1	2
Kollision mit umhergeschleuderten Baugruppen	Roboter verliert während einer schnellen Bewegung ein Bauteil und trifft damit das Bedienpersonal	S1	F1	O1	P2	1

Tabelle 3: Risikobeurteilung Cobot-Applikation BLDC-Linienerweiterung

Aus der Risikobeurteilung ist ersichtlich, dass die Gefahr, die von dem kollaborierenden Roboter ausgeht, sehr überschaubar ist. Um die Gefahr von Verletzungen zu reduzieren, sollte der Roboter nicht Oberhalb einer Höhe von 1,3 m arbeiten. Dies verhindert Gefährdungen des Gesichts, welche unzulässig sind. Für die Einschätzung der Verletzungsschwere müssen Druck- und Flächenpressungsmessungen durchgeführt werden. Es kann jedoch von einem geringen Verletzungspotenzial ausgegangen werden, da der Roboter selbst eine Kraft-Moment-Begrenzung besitzt und die bewegten Bauteile, mit einem Gewicht von ca. 200 g und einem Kunststoffgehäuse ohne scharfe Kanten, keine große Gefahr darstellen. Die Wahrscheinlichkeit einer Kollision mit dem Roboter selbst ist deutlich größer, als die Wahrscheinlichkeit von herumfliegenden Bauteilen getroffen zu werden. Dies kommt durch die häufigen Aufenthalte der Mitarbeiter im Kollisionsbereich zu Stande. Mit den Risikoindexwerten eins und zwei, kann von einer zumutbaren Gefahr des Robotersystems ausgegangen werden. Dennoch müssen Mitarbeiter entsprechende Schulungen durchlaufen und darauf hingewiesen werden, dass sie auf eventuellen Kollisionen achten müssen und diesen ausweichen können.

Wenn die technische Machbarkeit geprüft wurde, ist die Wirtschaftlichkeit der ausschlaggebende Faktor zur Umsetzung von Automatisierungsanlagen⁷¹. In diesem Konzept ist der wirtschaftliche Nutzen eine Taktzeiterparnis, da dem Bedienpersonal manuelle Tätigkeiten durch den Roboter abgenommen werden. Die Taktzeiterparnis würde für ein höheres Output der Produktionsanlage sorgen. Damit würden sich die fixen Kosten der Linie auf eine größere Ausbringung aufteilen. Dies würde sich in den Kosten pro Bauteil widerspiegeln. Um die Amortisation des Roboters zu errechnen müssen die Bauteilkosten mit und ohne Roboterapplikation verglichen werden. Dann kann eine Stückzahl errechnet werden, ab der sich die Integration des Cobots rentiert. Dazu muss zunächst die Taktzeiterparnis ermittelt werden. Da es sich um eine Linienerweiterung handelt, können die Prozesszeiten der bestehenden Linie verwendet

⁷¹ Vgl. POTT; DIETZ, 2019, S. 94

werden. Zur Ermittlung der Zeiten aller Tätigkeiten, die der Werker ausführt, kann eine Analyse nach dem Methods-Time Measurement (im Folgenden durch MTM abgekürzt) durchgeführt werden. Bei einer MTM-Analyse werden alle manuellen Tätigkeiten in Grundbewegungen untergliedert und diesen ein festgelegter Zeitwert zugeordnet. Der Vorteil ist dabei, dass dadurch auch Vorgabezeiten ermittelt werden können. Somit eignet sich diese Methode zur Ermittlung der Taktzeiten der Linienenerweiterung, da die Tätigkeiten der bestehenden Linie an die Anforderungen der Linienenerweiterung angepasst werden können. Die MTM Analyse der bestehenden BLDC-Linie kann im Anhang 5 eingesehen werden. Die errechnete Taktzeitersparnis durch den Cobot ist in Tabelle 4 dargestellt.

Manuelle Tätigkeiten BLDC				
Prozesse (Manuelle Tätigkeiten)	Zeiten in s	Anzahl Bauteile	Zeit pro Bauteil in s	Zeitersparnis durch Kobot in s
ICT	13,67	1	13,67	0,00
Verguss	5,10	1	5,10	1,76
EOL + Presse	22,81	1	22,81	0,00
Karton Gehäuse wechseln	12,00	108	0,11	0,00
Kiste Kühlblech wechseln	10,00	200	0,05	0,00
Karton auf Palette	15,00	18	0,83	0,00
Taktzeit:			42,58	40,83

Tabelle 4: Zeiten manueller Tätigkeiten der BLDC-Linie

Durch die Integration eines kollaborierenden Roboters könnten 1,76 s an manuellen Tätigkeiten eingespart werden. Für den investigativen Aufwand eines Roboters ist eine solche Zeitersparnis sehr gering. Dies kommt insbesondere zustande, da durch die Implementierung des Cobots weitere Handlungsschritte notwendig sind. Somit generiert der Roboter selber Verschwendung. Weiterhin sind bei der Durchführung der MTM Analyse Bereiche innerhalb der Linie aufgefallen, die Optimierungspotenzial bieten. So könnte eine ähnliche Taktzeitersparnis auch durch eine verbesserte Materialzuführung und die damit verbundene Verkürzung von Greifwegen erzielt werden. Optimierungen im Bereich der Materialbereitstellung würden sich zu dem positiv auf die Ergonomie des Arbeitsplatzes auswirken. Weiterhin gibt es Ablaufbedingte Wartezeiten des Mitarbeiters. Diese können durch einen veränderten Arbeitsablauf besser genutzt werden und auch zu einer Verkürzung der Taktzeit führen.

Maßnahmen zur Einsparung manueller Tätigkeiten sind nur zweckmäßig, wenn die anderen Prozesse schnell genug sind. Dazu muss die Taktzeit des Werkers mit den Prozesszeiten anderer Schritte verglichen werden. Da bei der Linienenerweiterung die

Anzahl einiger Stationen verdoppelt wird und somit Prozesse zur gleichen Zeit an zwei Stationen durchgeführt werden können, muss die Taktzeit dieser Prozesse für die Betrachtung halbiert werden. Ein entsprechender Vergleich der einzelnen Prozesszeiten ist in Tabelle 5 abgebildet.

Prozesse	Zeiten in s	Anzahl Stationen nach Erweiterung	Taktzeit
ICT	15,00	2	7,50
Verguss	21,00	1	21,00
Rundtisch verpressen	13,00	2	6,50
Rundtisch EOL	26,00	2	13,00
Rundtisch Laser	18,00	2	9,00
Tätigkeiten Werker ohne Kobot	42,58	2	21,29
Tätigkeiten Werker mit Kobot	40,83	2	20,42

Tabelle 5: Prozesszeiten BLDC-Linie

Aus den Zeiten der einzelnen Prozesse wird deutlich, dass durch die bloße Integration des Roboters lediglich eine Taktzeiterparnis von 0,29 s an zwei parallelen Linien realisiert werden kann. Die Ursache dafür ist die 21 s lange Prozesszeit der Vergussanlage, von welcher keine Zweite beschafft wird. Somit müsste die Prozesszeit beim Verguss optimiert werden. Aus Gründen der Taktzeit macht die Integration eines kollaborierenden Robotersystems somit wenig Sinn. Hinzu kommt, dass nicht alle Tätigkeiten, die der Roboter ausführt, auch wirklich eine Ersparnis für den Werker darstellen.

Der wirtschaftliche Nutzen eines störungsfreien Ablaufs kann schwer eingeschätzt werden. Das es einen wirtschaftlichen Nutzen gibt, steht außer Frage. Jedoch kann ein störungsfreier Ablauf auch durch einen eindeutig strukturierten Arbeitsablauf und die Schulung des Bedienpersonals erzielt werden. Die Integration eines Roboters ist an dieser Stelle somit nicht zwingend notwendig, um den Ablauf störungsfrei zu gestalten. Sinnvollere Maßnahmen wären z.B. farbliche Markierungen der Rundtischseiten an der Vergussstation oder unterschiedliche Gehäusefarben der Bauteile. Denkbar wäre auch ein System aus Meldeleuchten, welches die Mitarbeiter auf die Zugehörigkeit der Bauteile hinweist. Falls es dennoch zu Verwechslungen kommt müssen die nachfolgenden Prozesse so abgeriegelt sein, dass falsche Bauteile nicht weiterverarbeitet werden können. Mit einem gewissen Taktzeitverlust bei Bauteilverwechslungen muss jedoch gerechnet werden.

Die Wirtschaftlichkeit der Integration des Cobots ist nicht gegeben, da mit kostengünstigeren und einfacher umzusetzenden Maßnahmen ein gleicher Nutzen erzielt werden kann. Somit entfällt eine Amortisationsrechnung.

4.3 Linienbeschaffung BLDC Gen5

Zur Fertigung der fünften Generation der BLDC-Steuergeräte (intern als Gen5 bezeichnet und im Folgenden dadurch abgekürzt) wird eine komplett neue Fertigungslinie beschafft. Da die Nachfrage in den ersten Jahren bei lediglich rund 200.000 Stück jährlich liegt, allerdings auf bis zu 1.000.000 Stück pro Jahr ansteigen kann und die genaue Absatzmenge noch ungeklärt ist, muss ein erweiterbares Linienkonzept geplant werden. Die Erweiterungsmöglichkeit verhindert Verschwendungen in den ersten Jahren, gewährleistet jedoch trotzdem eine hohe Produktionskapazität. Um ein günstiges erweiterbares Konzept zu planen, kann nicht direkt von einer hochautomatisierten Fertigungslinie ausgegangen werden. Somit werden viele Handlingsprozesse zwischen den einzelnen Anlagenkomponenten notwendig sein. Dieses Handling kann durch die Implementierung eines Robotersystems automatisiert werden.

4.3.1 Produkt

Bei dem Gen5-Steuergerät, welches in Abbildung 17 dargestellt ist, handelt es sich um die fünfte Generation des BLDC-Reglers. Somit ist es für den gleichen Einsatzzweck konzipiert. Unterschiede bestehen hauptsächlich bei den verbauten elektronischen Komponenten. Diese wurden in ihrer Größe und Anzahl reduziert um Kosten zu senken. Weiterhin wird statt eines Kunststoffgehäuses ein Gehäuse aus Aluminium-Druckguss verwendet. Dies wirkt abschirmend und verbessert somit die elektromagnetische Verträglichkeit (im Folgenden durch EMV abgekürzt) und die Geräuschbelastung. Zu dem ist die thermische Leitfähigkeit von Aluminium erheblich besser als von Kunststoff, was zu einer deutlichen Verbesserung der Kühlung des Bauteils führt.⁷²



Abbildung 17: Gen5-Steuergerät beide Varianten

⁷² Vgl. Betriebsinterne Unterlagen: 041618A_smkim_GEN5 Review_ENG_v1, S. 2 (26.08.2019)

Das neue Gehäuse wird von dem Hersteller der angesteuerten Elektromotoren hergestellt. Somit wird bei der Fertigung im Hause HKR kein Gehäuse und Kühlblech mehr montiert. Das Bauteil besteht nun lediglich aus einer mit SMT- und THT-Bauteilen bestückten Leiterplatte. Dennoch gibt es zwei Varianten des Gen5-Steuergeräts, die sich in der Form des verlöteten Steckers und in der Anzahl der Kondensatoren unterscheiden.

4.3.2 Konzept

Der Anspruch an ein Linienkonzept für die Fertigung des Gen5-Steuergeräts ist die Erweiterbarkeit. Es müssen keine unterschiedlichen Varianten simultan gefertigt werden. Dennoch ist bei der Vormontage zu berücksichtigen, dass es zwei Produktvarianten gibt, die sich in Art und Anzahl der bestückten THT-Bauteile unterscheiden. Die grundlegenden Prozesse, welche im Anhang 6 in einem Prozessablauf abgebildet sind, unterscheiden sich nur geringfügig von den Prozessen der BLDC-Linie. Für die Konzeptplanung relevant sind alle Prozessschritte nach der SMT-Fertigung. Diese sind das Trennen der Leiterplatten aus dem Nutzen, die THT-Bestückung der Leiterplatten, deren Verlötung, der ICT der gelöteten Baugruppen und die Programmierung. Weiterhin relevant sind Handlingsschritte und das Verpacken der fertigen Bauteile.

Die Vormontage soll über einen bereits bestehenden und nicht komplett ausgelasteten Fräsnutzentrenner der Firma Asys stattfinden. Wenn die Stückzahlen über die Kapazität des Nutzentrenners steigen, muss ein weiterer Nutzentrenner eigens für die Gen5-Linie beschafft werden. Die Bestückung der THT-Bauteile kann zunächst von Hand erfolgen, ab einer Stückzahl von ca. 430.000 Stück jährlich sollte auf ein automatisches Bestücksystem umgestiegen werden. Die Lötung erfolgt über eine Hochkapazitive Wellenlötanlage der Firma Ersa, welche im Hause HKR bereits zur Verfügung steht.

Die geschätzte Prozesszeit für den ICT und die Programmierung beträgt 50 s. Somit bietet eine Station zur Durchführung dieser Prozesse ein Produktionsvolumen von 400.000 Stück pro Jahr. Demnach müssen je nach Absatzmenge zusätzliche Stationen beschafft werden. In einem automatischen linearen Konzept müsste somit Platz für eventuelle Lift-, Transportsysteme und weitere Stationen vorgehalten werden. Da jedoch nicht geklärt ist, ob die Nachfrage jenseits der 400.000 Stück jährlich liegt, kann es zu einer nicht Nutzung entsprechend verbauter Systeme kommen. Um diese Verschwendung zu vermeiden, wird ein Konzept mit einzelnen Teststationen geplant. Das Handling zwischen den einzelnen Stationen kann durch einen Werker oder einen kollaborierenden Roboter erfolgen. Ein mögliches Layoutkonzept der Endmontage, in welchem ein Cobot eingeplant wurde, ist in Abbildung 18 ersichtlich.

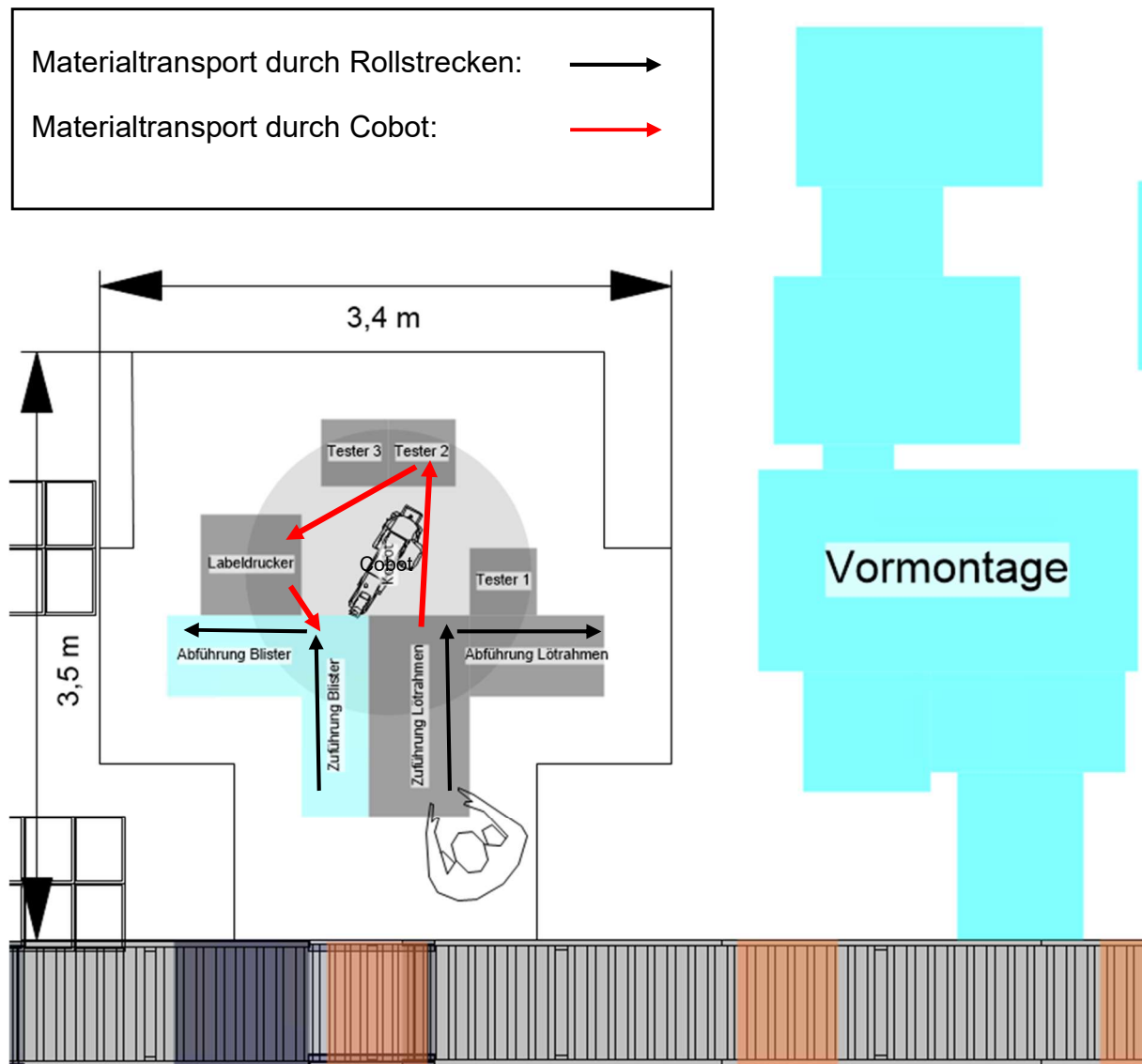


Abbildung 18: Layoutkonzept Gen5

In dem Layoutkonzept aus Abbildung 18 ist ersichtlich, dass die einzelnen Maschinenparts räumlich getrennt voneinander positioniert sind. Der Roboterarm übernimmt den Materialtransport und die Anlagenbestückung. Das Handling der Bauteile erfolgt vom Lötrahmen in die Teststation, nach dieser wird ein Label aufgeklebt und die Bauteile werden in ihre Endverpackung (Blister) abgesetzt. Da diese Tätigkeiten von einem Werker oder einem Cobot ausgeübt werden können, ist zur Bewertung ein Vergleich zwischen Mensch und Maschine anzustreben. Die Blister werden dann händisch in einen Karton gelegt und dieser wird auf eine Palette gestellt.

4.3.3 Konzeptbewertung

Der große Vorteil des Konzepts ist die flexible Erweiterbarkeit. Die Linie kann beliebig um weitere Teststationen ergänzt werden um eine höhere Produktionskapazität zu generieren. Somit kann schnell auf steigende Stückzahlen reagiert werden. Weiterhin ist die Durchführung der Vor- und Endmontage mit einem Werker möglich, im Falle das eine Roboterapplikation eingesetzt wird.

Die technische Machbarkeit kann sowohl mit dem Einsatz eines Cobots, als auch mit einem Werker als gegeben angesehen werden. Zur technischen Umsetzung eines Robotersystems kann der Roboter mit der Methode des sicherheitsbewerten überwachten Halts betrieben werden. Dies erhöht die Sicherheit des Systems und führt dennoch selten zu einem Stillstand, da sich der Werker zum Betrieb der Anlage nicht im Kollaborationsraum aufhalten muss. Durch die seltenen Aufenthalte von Personen im Arbeitsbereich des Roboters, kann eine fast permanente Verfahrensgeschwindigkeit von 1 m/s realisiert werden.

In diesem Konzept müssen wie bei der BLDC-Linienerweiterung zur Risikobewertung der Roboterapplikation die beiden Gefährdungen:

- Kollision mit dem Roboter
- Kollision mit umhergeschleuderten Baugruppen

berücksichtigt werden. Eine Risikobeurteilung nach dem Risikographen der DIN ISO/TR 14121-2 aus Anhang 4 ist in Tabelle 6 ersichtlich.

Gefährdung	Gefährdungsereignis	S	F	O	P	RI
Kollision mit Roboter	Bedienpersonal befindet sich im Kollaborationsraum und wird vom Roboterarm getroffen	S2	F1	O1	P1	2
Kollision mit umhergeschleuderten Baugruppen	Roboter verliert während einer schnellen Bewegung ein Bauteil und trifft damit das Bedienpersonal	S1	F1	O2	P2	1

Tabelle 6: Risikobeurteilung Cobot-Applikation Gen5-Linie

Um die Gefahr von Verletzungen zu reduzieren, sollte der Roboter nicht oberhalb einer Höhe von 1,3 m arbeiten. Dies verhindert Gefährdungen des Gesichts, welche unzulässig sind. Da der Roboter ausgefräste Leiterplatten transportiert, welche durchaus leicht scharfe Kanten besitzen können, müsste eine entsprechende Druck- und Flächenpressungsmessung durchgeführt werden. Um eine einfache Risikobeurteilung

vorzunehmen, wird sicherheitshalber von einer starken Verletzungsschwere bei Zusammenprall mit dem im Greifer befindlichen Bauteil ausgegangen. Dennoch ist der RI bei zwei. Dies ist möglich durch die Verwendung der Methode des sicherheitsbewerten überwachten Halts. Denn wenn der Roboter immer seine Bewegung stoppt, wenn ein Mensch den Kollaborationsraum betritt, ist die Wahrscheinlichkeit einer Kollision sehr gering. Weiterhin ist der Betrieb der Anlage möglich ohne in den Kollisionsbereich einzudringen, was die Häufigkeit der Gefährdung stark reduziert. Auf Grund der permanent hohen Verfahrgeschwindigkeit des Roboters ist die Chance von umherfliegenden Bauteilen getroffen zu werden höher als beim BLDC-Konzept, dennoch nicht besonders groß. Die Verletzungsschwere durch umherfliegende Bauteile kann als gering eingestuft werden, da die Leiterplatten zwar leicht scharfe Kanten besitzen können, jedoch nur ein Gewicht von 54 g aufweisen. Mit den Risikoindexwerten eins und zwei, kann von einer zumutbaren Gefahr des Robotersystems ausgegangen werden. Dennoch müssen Mitarbeiter entsprechende Schulungen durchlaufen und darauf hingewiesen werden, dass sie auf eventuellen Kollisionen achten müssen und diesen ausweichen können.

Nachdem die technische Machbarkeit nachgewiesen wurde, muss die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Aufschluss über die Sinnhaftigkeit des Roboters geben. Bei dieser wird berücksichtigt, dass die Tätigkeiten durch einen Werker oder einen Cobot verrichtet werden können. Wenn ein Werker zum Bauteilhandling eingesetzt wird, wäre dieser mit den manuellen Tätigkeiten nicht komplett ausgelastet. Er könnte jedoch keine weiteren Arbeiten in räumlicher Entfernung verrichten, da alle 50 s eine Teststation versorgt werden muss. Somit würden für den Werker ständige kurze Wartezeiten auftreten, was nicht gerade wirtschaftlich ist. Der wirtschaftliche Nutzen der Roboterapplikation ist das Ersetzen dieses Werkers. Zur Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Cobots kann eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt werden. Dabei werden die Kosten des Roboters mit denen eines Werkers verglichen. Rechengrundlage ist dazu der komplette Lebenszyklus des Roboters⁷³. Die Kosten anderer Anlagenbestandteile werden nicht berücksichtigt, da diese in beiden Varianten anfallen und für die Wirtschaftlichkeitsberechnung des Cobots unzweckmäßig sind.

Die Kosten des Roboters unterteilen sich in fixe Kosten, wozu Anschaffungskosten der Hardware und Personalkosten zum Aufbau und zur Programmierung zählen, und in variable Kosten, worunter Energie-, Instandhaltungskosten und der Raumbedarf fallen. Bei der Integration eines Roboters entstehen bei vielen Projekten Kosten durch Anlagenstillstände und Probematerial während der Inbetriebnahme⁷⁴. Da es sich bei der Gen5-Linie um eine Neubeschaffung handelt, entfallen diese Kosten bei diesem Projekt.

⁷³ Vgl. POTT; DIETZ, 2019, S. 107

⁷⁴ Vgl. POTT; DIETZ, 2019, S. 106

**Hardwarekosten:**

Bei den Hardwarekosten müssen der Roboterarm selbst (Steuerung und Bedienpanel inbegriffen), ein Cobot-Standfuß, ein Endeffektor und zusätzliche elektrische Komponenten berücksichtigt werden. Weiterhin wird Sensorik zur Überwachung des Kollaborationsraums benötigt. Hierzu können Radarsensoren, Lichtschranken oder laserbasierte Flächenscanner verwendet werden. In der folgenden Berechnung wurde von dem Einsatz von laserbasierten Flächenscannern ausgegangen, da diese als zuverlässig gelten und einen großen Bereich abdecken können. Da laserbasierte Sensoren Probleme bei Verschmutzung aufweisen, gewinnen Radarsensoren an Bedeutung. Im Hause HKR handelt es sich um eine Elektronikfertigung, welche die Reinheitsklasse 8.1 nach DIN EN ISO 14644-1:2016 erfüllt⁷⁵. Somit sollte die Verschmutzung von Sensoren kein Problem darstellen. Die Kosten für die Hardware können wie folgt aufgeschlüsselt werden:

- **UR5 Roboter**⁷⁶
 - 23.900 €
- **Keyence Flächenscanner mit zugehörigen Anschlusskabeln**⁷⁷
 - 5.200 €
- **Cobot-Standfuß höhenverstellbar**
 - 1.000 €
- **Schunk Greifer**⁷⁸
 - 1.870 €
- **Zusätzliche elektrische Komponenten (Anschlusskabel, Signallampe)**
 - 600 €

In Summe: 32.570 €

Programmierung und Aufbau:

Die Programmierung des Roboters muss nicht durch externe Dienstleister erfolgen. Die Bedienoberfläche der Programmierungssoftware ist so angelegt, dass mit einem verhältnismäßig geringen Schulungsaufwand, die flexible Programmierung des Cobots selbstständig im entsprechenden Unternehmen durchgeführt werden kann. Für die Kosten der Programmierung müssen Personal- und Schulungskosten berücksichtigt werden. Für die erste Applikation bietet es sich an, zwei Mitarbeiter der Prozesstechnik und einen Mitarbeiter der Wartung für die Programmierung zu schulen.

⁷⁵ Vgl. Betriebsinterne Unterlagen: Prüfbericht zur Partikelmessung vom 18.07.2017 (26.08.2019)

⁷⁶ Vgl. Betriebsinterne Unterlagen: Angebot UR5 und UR5e (26.08.2019)

⁷⁷ Vgl. Betriebsinterne Unterlagen: Keyence Sicherheits Laserscanner (26.08.2019)

⁷⁸ Vgl. Online: SCHUNK, Co-act EGP-C 40-N-N-URID und Zubehör (26.08.2019)

Dies schafft eine gewisse Redundanz, die Möglichkeit der gegenseitigen Unterstützung und stellt sicher, dass bei der Schulung alle Bereiche berücksichtigt werden. Der Vertrieb von Universal Robots empfiehlt zunächst, einen kostenlosen Onlinelehrgang mit anschließender Experimentierphase abzuschließen. Fragen, die dabei entstehen, können dann bei der notwendigen Grundschulung gestellt werden. Mit diesem Schulungsumfang kann dann der Roboter selbstständig für viele Bereiche programmiert werden. Für den Einbau und Anschluss des Roboters werden zwei Mitarbeiter der Wartung benötigt. Nach dem die Roboterapplikation integriert wurde, kann die Programmierung für das Gen5 Projekt durch die beiden Mitarbeiter der Prozesstechnik im Team durchgeführt werden. Die Zeitaufwände der einzelnen Schulungs- und Programmierschritte können wie folgt aufgelistet werden:

- **Onlinelehrgang UR-Academy**
 - 1,5 h => ein Mitarbeiter Wartung, zwei Mitarbeiter Prozesstechnik
- **Experimentierphase**
 - 2,5 h => ein Mitarbeiter Wartung, zwei Mitarbeiter Prozesstechnik
- **Grundschulung**
 - 2,5 d => ein Mitarbeiter Wartung, zwei Mitarbeiter Prozesstechnik
- **Fahrzeit Schulung (Hin- und Rückfahrt)**
 - 3 h => ein Mitarbeiter Wartung, zwei Mitarbeiter Prozesstechnik
- **Integration in Linie**
 - 3 h => zwei Mitarbeiter Wartung
- **Programmierung des Cobots**
 - 6 h => zwei Mitarbeiter Prozesstechnik

Für die Lohnkosten der Mitarbeiter aus dem Bereich Wartung wird ein Stundesatz von 32,08 €/h und für die Mitarbeiter der Prozesstechnik ein Stundesatz von 39,62 €/h veranschlagt. Diese ergeben sich aus dem Gehalt, einem Zuschlag für Sozialabgaben und Personalführung, aus der realen Anwesenheitszeit und dem Produktivitätsanteil dieser Zeit. Die Lohnkosten ergeben sich, wie in Formel 1 ersichtlich, aus der Gesamtarbeitszeit für das Projekt und dem Stundensatz der Lohnkosten.

$$LK = t_A * S_{LK}$$

Formel 1 Lohnkostenberechnung

LK – Lohnkosten [€]

t_A – Arbeitszeit [h]

S_{LK} – Stundesatz Lohnkosten [€/h]

Somit ergibt sich für die Lohnkosten des Wartungspersonals bei einer Gesamtstundenzahl von 33 h ein Wert von 1.058,64 € und für die Lohnkosten der Prozesstechnik bei einer Gesamtstundenzahl von 66 h ein Wert von 2.614,92 €.



Zu den Lohnkosten kommen pro Person die Kosten für die Schulung. Diese beinhalten eine Teilnahmegebühr von 1.380 €, zwei Übernachtungen je 60 € und eine Verpflegungspauschale von 48 €. Fahrtkosten von 0,3 €/km bei rund 250 km fallen einmalig an.

Die gesamten Kosten für Programmierung und Aufbau des Roboters belaufen sich auf 8.392,56 €. Dieser Anteil wäre bei der Beschaffung weiterer Roboterapplikationen deutlich geringer, da kein Schulungsaufwand notwendig wäre.

Energiekosten:

Die Energiekosten des Robotersystems können wie folgt aufgeschlüsselt werden:

- **UR5 Roboter⁷⁹**
 - 150 W
- **Schaltschrank**
 - 100 W
- **Zwei Laserscanner⁸⁰**
 - 110 W
- **Andere elektrische Komponenten (Greifer, Meldeleuchte)**
 - 100 W

In Summe: 460 W

Bei einem Strompreis von 0,1 € pro kWh⁸¹ ergeben sich Stromkosten von 0,046 €/h. Da von einer jährlichen Produktionszeit von 6.912 h ausgegangen wird, belaufen sich die jährlichen Stromkosten auf 317,95 €.

Raumbedarfskosten:

Der Raumbedarf des Roboters errechnet sich aus seinem Arbeitsbereich abzüglich der Maschinen, die darin platziert sind. Aus der maßstabsgetreuen Layoutzeichnung in Abbildung 18 kann abgeschätzt werden, dass rund die Hälfte des Arbeitsbereichs des Roboters durch andere Maschinen besetzt sein wird. Bei einem Arbeitsradius von 850 mm⁸² ergibt sich ein Flächenbedarf von 1,135 m². Bei 10 € monatlichen Quadratmeterkosten der Produktionshalle, ergeben sich jährliche Raumkosten von 136,2 €.

⁷⁹ Vgl. Online: JUGARD & KÜNSTNER, Die Cobots von Universal Robots im Vergleich (26.08.2019)

⁸⁰ Vgl. Betriebsinterne Unterlagen: Keyence Sicherheits Laserscanner (26.08.2019)

⁸¹ Vgl. Betriebsinterne Unterlagen: Maschinenstundensatzberechnung (26.08.2019)

⁸² Online: JUGARD & KÜNSTNER, Die Cobots von Universal Robots im Vergleich (26.08.2019)



Instandhaltungskosten:

Die Instandhaltungskosten für ein Robotersystem sind schwer zu kalkulieren, da nicht auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden kann. Aus diesem Grund werden pauschal jährlich 3 %⁸³ der Anschaffungskosten kalkuliert. Somit belaufen sich die Wartungskosten auf 977,1 €/a.

Die Kosten der Roboterapplikation können wie folgt zusammengetragen werden:

Fixkosten:

- Hardwarekosten
 - 32.570,00 €
- Kosten Programmierung und Aufbau
 - 8.392,56 €

Variable Kosten:

- Energiekosten (Strom)
 - 317,95 €/a
- Instandhaltungskosten
 - 977,10 €/a
- Raumbedarfskosten
 - 136,20 €/a

Zur Berechnung der Maschinenstundenkosten wird die Nutzungsdauer der Roboteranlage benötigt. Laut Angaben Vertrieb des Herstellers sind die Roboter von Universal Robots für eine Nutzungsdauer von fünf Jahren im Vierschichtbetrieb ausgelegt. Die jährlichen Stunden werden aufgrund einer angenommenen Anlagenverfügbarkeit von 90 % mit 6220 h/a kalkuliert. Der Maschinenstundensatz für ein Robotersystem errechnet sich nach Formel 2.

$$S_{MK} = \frac{\frac{\text{Fixkosten}}{t_B} + \text{Variable Kosten}}{\text{Jahresstund}} = \frac{\frac{40.962,56\text{€}}{5a} + 1.431,25\text{€/a}}{6.220\text{h/a}} = 1,55\text{€/h}$$

S_{MK} – Stundensatz Maschinenkosten [€/h]
 t_B – Betriebsdauer [a]

Formel 2 Maschinenstundensatz

⁸³ Vgl. Betriebsinterne Unterlagen: Maschinenstundensatzberechnung (26.08.2019)

Für einen Cobot würden stündlich Kosten von 1,55 € anfallen. Vergleicht man dies mit dem Lohnkostensatz für einen Produktionsmitarbeiter von 28,41 € pro Stunde, wird die Wirtschaftlichkeit von Robotern deutlich. Die absoluten Kosten über den gesamten Lebenszyklus des Roboters errechnen sich nach Formel 3.

$$\begin{aligned} \text{Absolute Kosten} &= \text{Fixkosten} + \text{Variable Kosten} * t_B & \textbf{Formel 3 Kosten Cobot} \\ \text{Absolute Kosten} &= 40.962,56€ + 1.431,25€/a * 5a = 48.118,81€ \end{aligned}$$

Wenn das Handling der Gen5-Linie durch einen Werker realisiert werden soll, würden sich die Kosten wie nach Formel 4 berechnen.

$$\begin{aligned} \text{Absolute Kosten} &= t_B * \text{Jahresstunden} * S_{LK} & \textbf{Formel 4 Kosten Werker} \\ \text{Absolute Kosten} &= 5a * 6220h/a * 28,41€/h = 883.551,00€ \end{aligned}$$

Bei den absoluten Kosten über einen Zeitraum von fünf Jahren sind die Kosten für einen kollaborierenden Roboter erheblich günstiger als die Lohnkosten für Produktionsmitarbeiter. Somit ist die Wirtschaftlichkeit der Automatisierung bei der Gen5-Linie nachgewiesen. Ein Nachteil des Roboters sind die hohen Kosten die bei der Beschaffung anfallen. Aus diesem Grund ist der Break-Even-Point der Investition interessant. Dieser gibt an, ab welchem Zeitraum sich die Kosten zweier Varianten decken und beschreibt somit die Amortisationszeit. Diese kann wie in Formel 5 errechnet oder, wie im Anhang 7 dargestellt, aus einem Chart abgelesen werden.

$$t_{Am} = \frac{\text{Fixkosten}}{S_{LK} - S_{MK}} = \frac{40.962,56€}{28,41€/h - 1,55€/h} = 1.525,04h \quad \textbf{Formel 5 Amortisationszeit}$$

t_{Am} – Amortisationszeit

Der Break-Even-Point der Investition in einen kollaborierenden Roboter für die Gen5-Linie ist nach 1.525,04 Stunden erreicht. Dies entspricht einem Zeitraum von rund 13 Wochen. Somit ist es zur Umsetzung des Bauteilhandlings zwischen den einzelnen Teststationen sehr lukrativ einen Mitarbeiter durch Automatisierungsmaßnahmen einzusparen.

4.4 Roboterbeschaffung

Die Beschaffung eines kollaborierenden Robotersystems kann als Projekt geplant und durchgeführt werden. Dem Begriff Projekt liegen dabei eine Vielzahl an Definitionen zu Grunde. Eine treffende Definition ist die nach DIN 69901:

„Ein Projekt ist ein Vorhaben, das im Wesentlichen durch die Einmaligkeit der Bedingungen in ihrer Gesamtheit gekennzeichnet ist, wie z. B. Zielvorgabe, zeitliche, finanzielle, personelle [...] projektspezifische Organisation.“⁸⁴

In einem Projekt wird die eigentliche Problemstellung in kleine Arbeitsschritte zerlegt und einem Verantwortlichen innerhalb der Projektgruppe zugeordnet. Die Arbeitsschritte sollten nach Fachgebiet und chronologisch unterteilt werden.⁸⁵

Um eine möglichst sinnvolle Einteilung der Aufgaben vorzunehmen, kann sich grob an dem Projektlebenszyklus industrieller Roboter orientiert werden. Dieser ist in Abbildung 19 dargestellt.

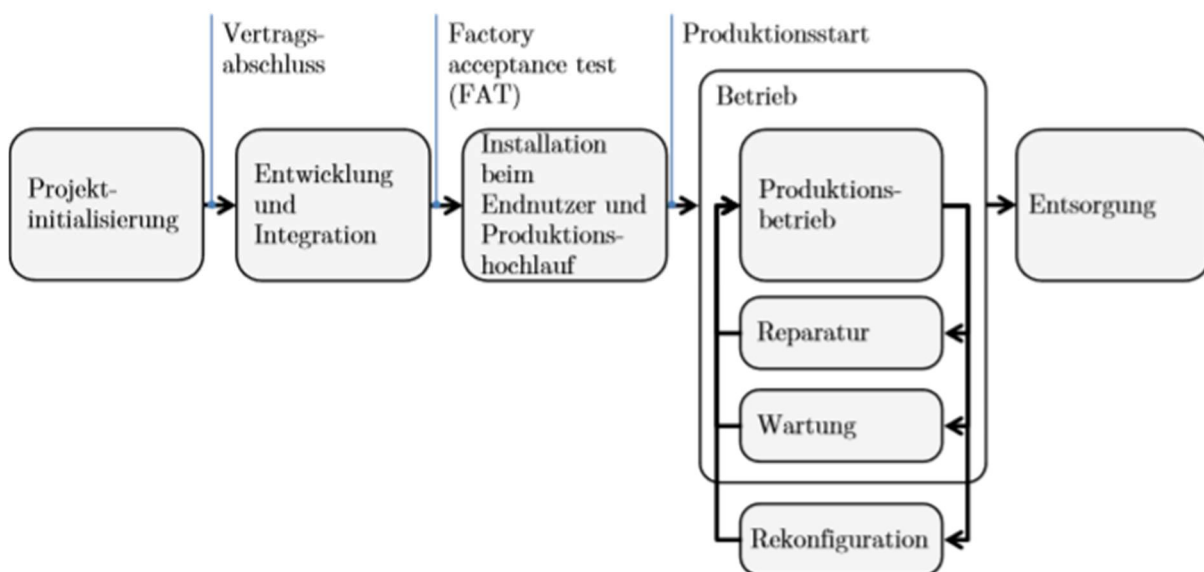


Abbildung 19: Projektlebenszyklus von industriellen Roboteranlagen (POTT; DIETZ, 2019, S. 81)

Die notwendigen Aufgaben des Endnutzers können feiner in Vorabnahme, Vorbereitung der Installation, Aufbau der Anlage beim Endnutzer, Inbetrieb- und Endabnahme der Roboterapplikation und begleitende Tätigkeiten unterteilt werden.⁸⁶

⁸⁴ BARTHELMES, 2013, S. 23

⁸⁵ Vgl. HEINTEL; KRAINZ, 2015, S. 63

⁸⁶ Vgl. POTT; DIETZ, 2019, S. 86 - 90

4.5 Fazit

Bei den Projekten der HKR Automotive ist die Integration eines Robotersystems technisch möglich und vom Anwendungsgebiet auch durchaus denkbar. Als Favorisierter Hersteller für kollaborierende Roboter wurde Universal Robots ausgewählt. Die Wahl eines Herstellers ist notwendig um detaillierte Konzepte auszuarbeiten, da die verschiedenen Hersteller sich stark in Punkto Preis und Technologieansatz unterscheiden. Je nach Branche und bestehender Fertigung müssen bei der Wahl des Roboterlieferanten unterschiedliche Kriterien berücksichtigt werden.

Die Wirtschaftlichkeit eines Cobots ist für jedes Projekt einzeln zu bewerten. Der Nutzen kann trotz gleicher Anwendungsgebiete stark unterschiedlich sein. Bei der Erweiterung der BLDC-Linie ist der wirtschaftliche Nutzen eines Roboters so trivial, dass sich der Aufwand für die Implementierung nicht rechtfertigen lässt. Andererseits bringt die Automatisierung des Bauteilhandlings bei der Neubeschaffung der Gen5-Linie eine große Kosteneinsparung mit sich. Obwohl der Einsatzzweck der gleiche wie bei der BLDC-Linienerweiterung ist. Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit sollte außerdem berücksichtigt werden, dass Kosten für die Schulungen zur Programmierung des Roboters nur einmalig anfallen. Demnach entstehen bei der Beschaffung weiterer Roboter eines Herstellers geringere Kosten als bei der ersten Applikation.

Die Unterschiede der beiden Projekte haben gezeigt, dass sich die Implementierung eines kollaborierenden Roboters in erster Linie zur Automatisierung simpler Tätigkeiten und einer damit verbundenen Personaleinsparung lohnt. Gerade an Arbeitsplätzen, an denen Werker nicht ausgelastet sind, können die menschlichen Ressourcen für komplexere Tätigkeiten genutzt werden. Die langfristige Senkung der Lohnkosten steigert die Produktivität der Fertigung und rechtfertigt die Integration von kollaborierenden Robotern. Dabei ist trivial, ob es sich um eine bestehende oder neue Fertigungslinie handelt. Die Kosten unterscheiden sich nur geringfügig, somit kann sich eine Integration in beiden Fällen lohnen.

Ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit ist nicht wie viele Tätigkeiten der Roboter durchführt, sondern wie viele Tätigkeiten er dem Bedienpersonal abnimmt. So sollten durch den Roboter keine weiteren Arbeitsschritte entstehen, auch wenn er diese automatisiert durchführt. Zur wissenschaftlichen Einschätzung zukünftiger Projekte kann dieser Ansatz weiterverfolgt werden. Einen pauschalen und konkreten Zahlenwert zu ermitteln, ab welcher Einsparung an Tätigkeitsvolumen sich ein Roboter lohnt, wird nicht möglich sein. Dafür sind die Kosten von Roboterapplikationen zu variabel und der Einfluss anderer Faktoren, wie Prozessbedingte Wartezeiten und Möglichkeiten der Mehranlagenbedienung durch Mitarbeiter, zu groß. Dennoch kann der Nutzen eines Cobots anhand seiner Arbeitersparnis für den Mitarbeiter eingeschätzt werden.

5 Zusammenfassung

Diese Arbeit sollte, anhand der Erstellung von projektbezogenen Konzepten, Aufschluss über die Sinnhaftigkeit von Kollaborierenden Robotersystemen für die Produktion der HKR Automotive GmbH liefern.

Zur Nachvollziehbarkeit der aus den Projekten resultierenden Ergebnisse wurden die theoretischen Grundlagen zu Robotersystemen in den Kapiteln 1 und 2 abgehandelt. Dabei wurde zunächst auf die Bedeutung von Robotern für die Industrie und deren Entwicklung eingegangen und darauffolgend die technischen Grundlagen insbesondere von kollaborierenden Robotersystemen erläutert.

Die Bearbeitung der Projekte wurde im Kapitel 4 in vollem Umfang abgehandelt. Von der Auswahl geeigneter Roboterhersteller bis zur Erarbeitung von Konzepten und deren Bewertung wurden alle Schritte beschrieben. Die Ergebnisse und insbesondere die Schlussfolgerungen aus den Konzeptbewertungen wurden zusammengetragen und geben Aufschluss über die Hauptfragestellung nach der Sinnhaftigkeit von Cobots für die HKR Automotive. Somit kann die Arbeit eine Wissensgrundlage liefern und bei der Einschätzung zukünftiger Projekte behilflich sein.

Die Integration neuer Technologien bietet viele Potenziale, so auch kollaborierende Robotersysteme. Ihre Sinnhaftigkeit für ein produzierendes Unternehmen wird in erster Linie durch ihren Wirtschaftlichen Nutzen bestimmt. Technisch umsetzbar ist eine Vielzahl an Konzepten, dennoch muss jedes Konzept für sich auf seine Wirtschaftlichkeit überprüft werden. Grundlegend kann jedoch gesagt werden, je mehr Arbeitstätigkeiten ein Roboter dem Menschen abnehmen kann, desto größer ist sein wirtschaftlicher Nutzen.

6 **Ausblick**

Ein großer Vorteil bei der Integration neuer Technologien liegt im forschenden Bereich. Beim Betrieb eines Roboters würden Erfahrungen gesammelt werden, welche für zukünftige Entscheidungen genutzt werden können. Sollte die Komplexität der Fertigungsschritte bei zukünftigen Produkten abnehmen, kann der Nutzen eines Roboters entsprechend größer ausfallen. Wenn dann bereits Cobots betrieben werden, fallen entsprechend kleinere Aufwände bei der Beschaffung weiterer Applikationen an.

Bei Veränderungen der Produktionsbedingungen bestehender Anlagen, wie Absatzmenge, neue erforderliche oder wegfallende Prozesse und Erweiterung um neue Varianten kann die Integration eines Cobots lukrativ sein. Wenn ein Anlagenkonzept ohnehin überarbeitet werden muss, kann die Linie stärker auf den Einsatz von Robotern ausgelegt werden.

Bei zukünftigen Projekten kann die theoretische Betrachtung der bestehenden Projekte eine gute Entscheidungshilfe sein, jedoch ersetzt diese Betrachtung nicht die praktischen Erfahrungen, welche beim Betrieb einer Roboterapplikation gesammelt werden. Weiterhin sollte bedacht werden, dass eine Roboterapplikation flexibel für neue Einsatzbereiche programmiert werden kann und somit nicht an den momentanen Einsatzzweck gebunden ist.

Da ungewiss ist, wie sich Produkte und deren Anforderungen entwickeln, kann die Robotertechnik in Zukunft stark an Bedeutung gewinnen und einen großen Produktivitätszuwachs liefern. Dies ist nicht zuletzt von der Weiterentwicklung eingesetzter Technologien abhängig.

Quellenverzeichnis

ABB: Datenblatt: YuMi, In:

https://library.e.abb.com/public/f0402ca615a043428d8723399cc2cd82/Datenblatt%20YuMi_lowres.pdf (19.08.2019)

BARTHELMES, Hans: Handbuch Industrial Engineering: Vom Markt zum Produkt. Hainburg, 2013

BENDEL, Oliver: 400 Keywords Informationsethik: Grundwissen aus Computer-, Netz- und Neue-Medien-Ethik sowie Maschinenethik. 2. Auflage. Wiesbaden, 2019

Betriebsinterne Unterlagen: 041618A_smkim_GEN5_Review_ENG_v1, In: Firmennetzwerk HKR Automotive GmbH (26.08.2019)

Betriebsinterne Unterlagen: Angebot UR5 und UR5e, In: Firmennetzwerk HKR Automotive GmbH (26.08.2019)

Betriebsinterne Unterlagen: C-140006-Pflichtenheft_Specification, In: Firmennetzwerk HKR Automotive GmbH (26.08.2019)

Betriebsinterne Unterlagen: Keyence Sicherheits Laserscanner, In: Firmennetzwerk HKR Automotive GmbH (26.08.2019)

Betriebsinterne Unterlagen: Maschinenstundesatzberechnung, In: Firmennetzwerk HKR Automotive GmbH (26.08.2019)

Betriebsinterne Unterlagen: Prüfbericht zur Partikelmessung vom 18.07.2017, In: Firmennetzwerk HKR Automotive GmbH (26.08.2019)

Betriebsinterne Unterlagen: Vergleich A2XX-WL-Paccar, In: Firmennetzwerk HKR Automotive GmbH (26.08.2019)

BEYER, Heinrich; NAUMER, Hans-Jörg: CSR und Mitarbeiterbeteiligung: Die Kapitalbeteiligung im 21. Jahrhundert – Gerechte Teilhabe statt Umverteilung. Düsseldorf, 2018

BIONIC ROBOTICS: Biorob product folder, In: http://www.euroc-project.eu/fileadmin/ApplicationDocuments/TechnologyDeveloper/biorob_productfolder.pdf (20.08.2019)

BÖHLE, Fritz; VOß, G. Günter; WACHTLER, Günther: Handbuch Arbeitssoziologie: Band 1: Arbeit, Strukturen und Prozesse. 2. Auflage. Unter Mitarbeit von Anna Hoffmann. Wiesbaden, 2018

BOSCH: APAS assistant Broschüre, In: https://www.bosch-apas.com/media/de/apas/downloads/2017_12_01_apas_assistant_doppelseite_de.pdf (20.08.2019)

BOSCH: APAS Broschüre, In: https://www.bosch-apas.com/media/de/apas/downloads/apas_assistant_technische_unterlage_de.pdf (20.08.2019)

BOTTHOF, Alfons; HARTMANN, Ernst Andreas: Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg, 2015

DGUV: Arbeitssicherheit an Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern. 2009, In: <https://www.dguv.de/projektdatenbank/bgia5105/fachgesprach.pdf> (15.08.2019)

DGUV: Kollaborierende Robotersysteme: Planung von Anlagen mit Funktionen „Leistungs- und Kraftbegrenzung“. 2017, In: https://www.jugard-kuenstner.de/fileadmin/daten/Downloads/Datenblaetter_UR_und_Zubehoer/UR3_UR5_UR10/DGUV_Kollaborierende_Robotersystem_Stand_08.2017.pdf (15.08.2019)

DIE DEUTSCHE WIRTSCHAFT: Robotik: Vom Newcomer zum Branchenstar in nur zwei Jahren. 2019, In: <https://die-deutsche-wirtschaft.de/robotik-vom-newcomer-zum-branchenstar-in-nur-2-jahren/> (26.08.2019)

FANUC: Broschüre: CR Serie, In: <https://www.fanuc.eu/~media/files/pdf/products/robots/brochures/mbr-02361-ro-collaborative-robot-v3/collaborative-robot-brochure-de.pdf?la=de> (19.08.2019)

GERDENITSCH, Cornelia; KORUNKA, Christian: Digitale Transformation der Arbeitswelt: Psychologische Erkenntnisse zur Gestaltung von aktuellen und zukünftigen Arbeitswelten. Berlin, Heidelberg, 2019

GLATTE, Thomas: Entwicklung betrieblicher Immobilien: Beschaffung und Verwertung von Immobilien im Corporate Real Estate Management. Wiesbaden, 2014

GROTE, Karl-Heinrich; BENDER, Beate; GÖHLICH, Dietmar: Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau. 25. Auflage. Berlin, Heidelberg, 2018

HEINRICH, Berthold; LINKE, Petra; Glöckler Michael: Grundlagen Automatisierung: Sensorik, Regelung, Steuerung. Wiesbaden, 2017

HEINTEL, Peter; KRAINZ, Ewald E.: Projektmanagement: Hierarchiekrisis, Systemabwehr, Komplexitätsbewältigung. 6. Auflage. Klagenfurt, 2015

HUBER, Walter; Industrie 4.0 in der Automobilproduktion: Ein Praxisbuch. Wiesbaden 2016

Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch: DIN IEC 60050-351:2014-09, 2014

JUGARD & KÜNSTNER: Die Cobots von Universal Robots im Vergleich, In: <https://www.jugard-kuenstner.de/universal-robots/cobots-ur3-ur5-ur10/ur5/?L=0> (26.08.2019)

KÜHNAPFEL, Jörg B.: Nutzwertanalyse in Marketing und Vertrieb. 2.Auflage. Wiesbaden, 2019

KUKA: Einleger: LBR iiwa, In: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/9cb8e311bfd744b4b0eab25ca883f6d3/kuka_sensitiverobotik_lbriiwa_einleger_de.pdf?rev=be183daf104948239b9f7b314df4f6d7 (19.08.2019)

KÜPPERS, E. W. Udo: Die humanoide Herausforderung: Leben und Existenz in einer anthropozänen Zukunft. Bremen, 2018

MATUSCHEK, Ingo: Dissertation: Technisierung, Digitalisierung, Industrie 4.0. Expertise für die Kommission „Arbeit der Zukunft“. Universität Duisburg-Essen. Duisburg, Essen, 2016

NEUGEBAUER, Reimund: Digitalisierung: Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft. 1.Auflage. Berlin, Heidelberg, 2018

POTT, Andreas; Dietz, Thomas: Industrielle Robotersysteme: Entscheiderwissen für die Planung und Umsetzung wirtschaftlicher Roboterlösungen. Wiesbaden, 2019

ROTH, Armin: Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0: Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin, Heidelberg, 2016

SCHLUND, Sebastian; MAYRHOFER, Walter; RUPPRECHT, Patrick: Zeitschrift für Arbeitswissenschaften: Möglichkeiten der Gestaltung individualisierbarer Montagearbeitsplätze vor dem Hintergrund aktueller technologischer Entwicklungen. 2018, In: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs41449-018-0128-5> (13.08.2019)

SCHUNK: Co-act EGP-C 40-N-N-URID und Zubehör, In: https://schunk.com/shop/de/de/Greifsysteme/Roboterzubehoer/End-of-Arm-Baukasten/End-of-Arm-Baukasten-Universal-Robots/Co-act-EGP-C-40-N-N-URID/p/000000000001326455#technical_data (26.08.2019)

STEIL, Jochen J.; MAIER, Günter W.: Handbuch Gestaltung digitaler und vernetzter Arbeitswelten: Kollaborative Roboter universale Werkzeuge in der digitalisierten und vernetzten Arbeitswelt. Berlin, Heidelberg, 2019

UR: Whitpaper: Kollaborative Robotik, In: https://www.jugard-kuenstner.de/fileadmin/daten/Downloads/Datenblaetter UR_und_Zubehoer/UR3_UR5_UR10/Universal_Robots_Kollaborative_Robotik.pdf (19.08.2019)

VOIGT, Kai Ingo: Gabler Wirtschaftslexikon: Technisierung, In: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/technisierung-50345/version-273565> (29.07.2019)

WEIDNER, Robert; REDLICH, Tobias; WULFSBERG, Jens P.: Technische Unterstützungssysteme. Berlin, Heidelberg, 2015

WIEGAND, Bodo: Der Weg aus der Digitalisierungsfalle: Mit Lean Management erfolgreich in die Industrie 4.0. Wiesbaden, 2018

WINKLER, Alexander: Dissertation: Ein Beitrag zur kraftbasierten Mensch-Roboter-Interaktion. Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Chemnitz. Chemnitz, 2006

WITTPAHL, Volker: Digitalisierung: Bildung / Technik / Innovation. Berlin, Heidelberg, 2017

YUANDA: Broschüre: Yuanda Robot, In: <https://www.yuanda-robotics.de/wp-content/uploads/2019/03/yuanda-robot-brochure-en.pdf> (19.08.2019)



Anhangsverzeichnis

- Anhang 1** **Vergleich verschiedener Roboterkinematiken** [POTT, Andreas; DIETZ, Thomas: Industrielle Robotersysteme: Entscheiderwissen für die Planung und Umsetzung wirtschaftlicher Roboterlösungen, Wiesbaden, 2019, S. 20, Tab. 2.1 Überblick über die Stärken und Schwächen der verschiedenen Roboterkinematiken; S. 32, Tab. 2.2 Überblick über die Dynamik verschiedener Roboterkinematiken; S. 33, Tab. 2.3 Überblick über die Traglast der verschiedenen Roboterkinematiken]
- Anhang 2** **Biomechanische Grenzwerte** [DGUV, Kollaborierende Robotersysteme: Planung von Anlagen mit der Funktion „Leistungs- und Kraftbegrenzung“, 2017, In: https://www.jugard-kuenstner.de/fileadmin/daten/Downloads/Datenblaetter_UR_und_Zubehoer/UR3_UR5_UR10/DGUV_Kollaborierende_Robotersystem_Stand_08.2017.pdf (15.08.2019)]
- Anhang 3** **Prozessablauf BLDC**
- Anhang 4** **Risikograph** [POTT, Andreas; DIETZ, Thomas: Industrielle Robotersysteme: Entscheiderwissen für die Planung und Umsetzung wirtschaftlicher Roboterlösungen, Wiesbaden, 2019, S. 127, Abb.9.3 Beispiel eines Risikographen nach ISO 14121-2; S. 127, Text]
- Anhang 5** **MTM Analyse BLDC**
- Anhang 6** **Prozessablauf Gen5**
- Anhang 7** **Chart Vergleich Kosten Cobot und Werker**

Tab. 2.1 Überblick über die Stärken und Schwächen der verschiedenen Roboterkinematiken

Serielle Roboter			Parallele Roboter
Knickarm	SCARA	Portal	
• Gute Zugänglichkeit und Beweglichkeit • Mäßige Absolutgenauigkeit • Kleine bis große Nutzlasten • Typische Prozesse: Schweißen, Kleben, Handhaben	• Eingeschränkte Beweglichkeit mit 3 oder 4 Freiheitsgraden • Kleiner Arbeitsraum • Kleine Nutzlasten • Typische Prozesse: Montage, Pick-and-Place	• Sehr große Bewegungen • Hohe Nutzlasten • Maschinenbestücken, Pick-and-Place, Regalbediengerät, Kommissionieren	• Hohe Steifigkeit • Hohe Genauigkeit • Sehr hohe Dynamik • Einsatz: Pick-and-Place, Sondermaschinen

Tab. 2.2 Überblick über die Dynamik verschiedener Roboterkinematiken

Serielle Roboter			Parallele Roboter
Knickarm	SCARA	Portal	Delta
• Mittlere Geschwindigkeit und Beschleunigung	• Sehr große Geschwindigkeit und Beschleunigung möglich	• Kleine Portale: erreichen hohe Dynamik • Flächenportale: mittlere Geschwindigkeit, kleine Beschleunigung	• Sehr große Geschwindigkeit und Beschleunigung

Tab. 2.3 Überblick über die Traglast der verschiedenen Roboterkinematiken

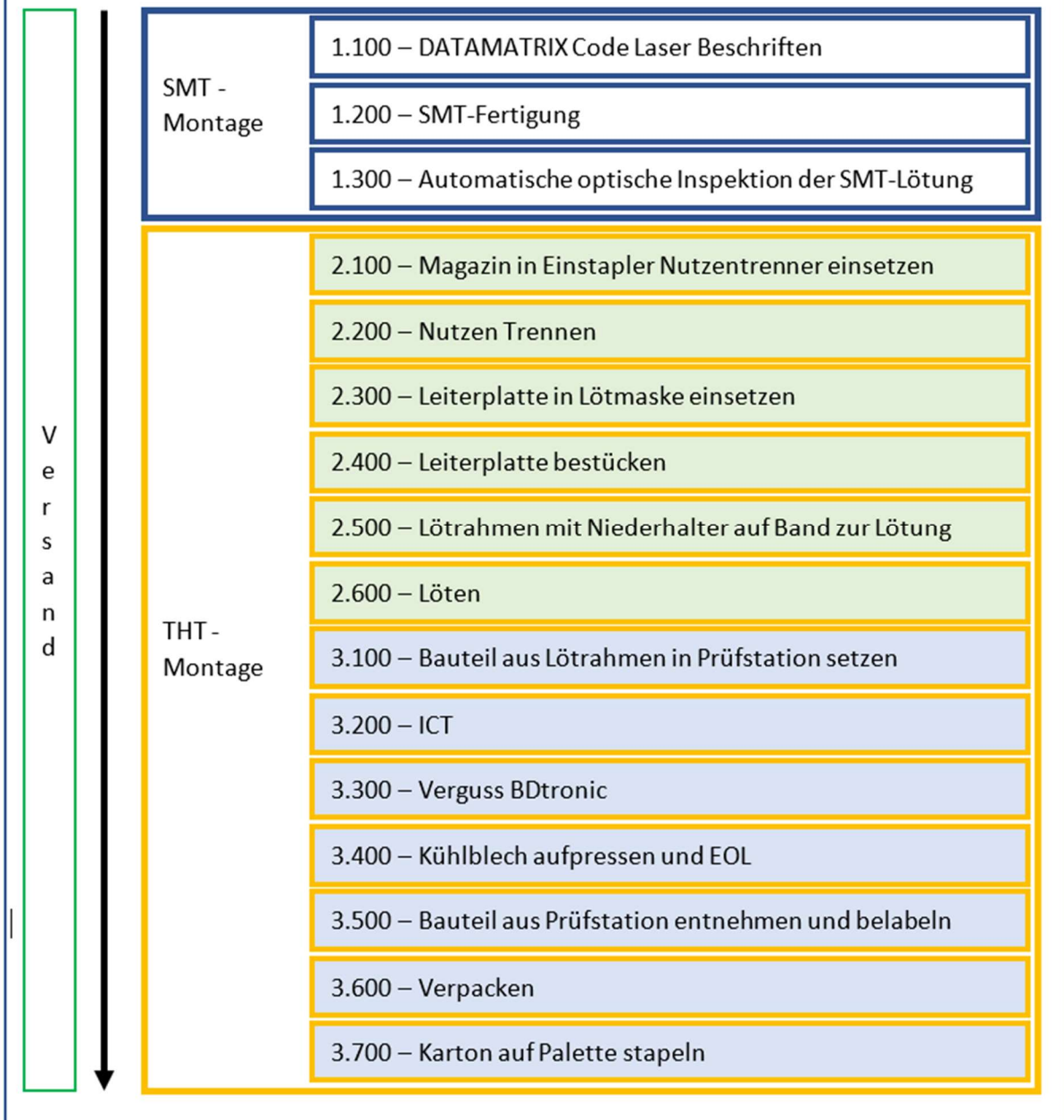
Serielle Roboter			Parallele Roboter
Knickarm	SCARA	Portal	
• Kleinroboter: 5 kg • Schwerlastroboter: 1000 kg	• Traglast: 0,5 kg bis 5 kg	• Traglast: 0,5 kg bis mehrere Tonnen	• Delta-Roboter: 0,5 kg • Sondermaschinen: mehrere Tonnen

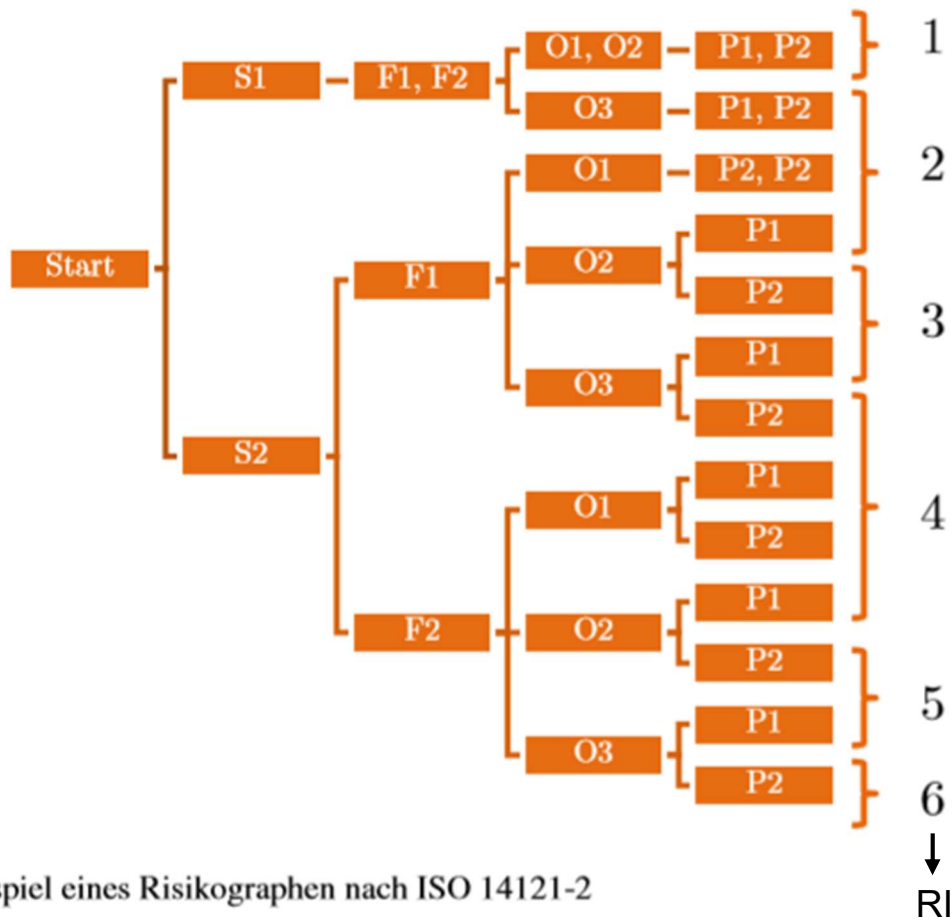
Körperlokalisierung			Quasi statischer Kontakt (Klemmen)		Transienter Kontakt (Freier Stoß)	
Spezifische Lokalisation		Körperregion	Spitzendruck p _s [N/cm²] (Anmerkung 1)	Kraft F _s [N] (Anmerkung 2)	Spitzendruck P _T Faktor (Anmerkung 3)	Kraft F _T Faktor (Anmerkung 3)
1	Stirnmitte	Schädel und Stirn	130	130	Kein	Kein
2	Schläfe					
3	Kaumuskel	Gesicht	110	65		
4	Halsmuskel	Nacken	140	150	2	2
5	Dornfortsatz 7. Halswirbel		210			
6	Schultergelenk	Rücken und Schultern	160	210		
7	Dornfortsatz 5. Lendenwirbel		210			
8	Brustbein	Brust	120	140		
9	Brustmuskel		170			
10	Bauchmuskel	Bauch	140	110		
11	Beckenknochen	Becken	210	180		
12	Deltamuskel	Oberarm und Ellenbogen	190	150		
13	Oberarmknochen		220			
14	Speichenknochen	Unterarm und Handgelenk	190	160		
15	Unterarmmuskel		180			
16	Armerv		180			
17	Zeigefingerbeere d	Hand und Finger	300	140		
18	Zeigefingerbeere nd		270			
19	Zeigefingerendgelenk d		280			
20	Zeigefingerendgelenk nd		220			
21	Daumenballen		200			
22	Handinnenfläche d		260			
23	Handinnenfläche nd		260			
24	Handrücken d		200			
25	Handrücken nd		190			
26	Oberschenkelmuskel	Oberschenkel und Knie	250	220		
27	Kniescheibe		220			
28	Schienbein	Unterschenkel	220	130		
29	Wadenmuskel		210			

Tabelle A.2 — Biomechanische Grenzwerte



1. Prozessablauf





Verletzungsschwere:

- S1 Geringfügige (reversible) Verletzungen
- S2 Starke (irreversible) Verletzungen

Expositions Häufigkeit:

- F1 Kurzzeitige oder seltene Gefährdung
- F2 Langzeitige oder häufige Gefährdung

Eintrittswahrscheinlichkeit:

- O1 Sehr unwahrscheinlicher Eintritt
- O2 Unwahrscheinlicher Eintritt
- O3 Wahrscheinlicher Eintritt

Möglichkeit zur Vermeidung:

- P1 Reaktionsmöglichkeit zur Vermeidung
- P2 Keine Reaktionsmöglichkeit zur Vermeidung

Postell-Nr. 003 © VTA-Institut

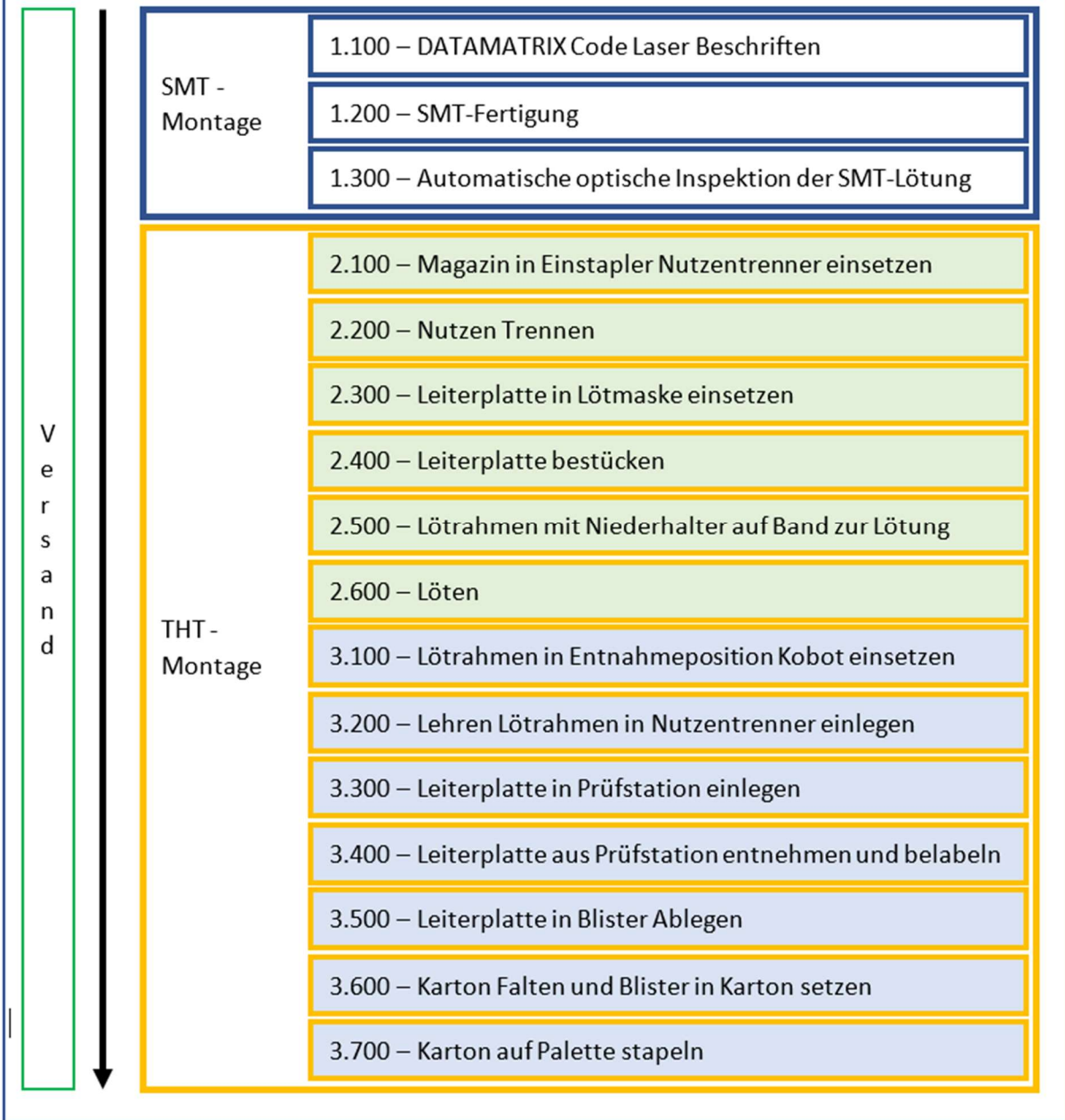
Bestell-Nr. 003 © MTA Institut

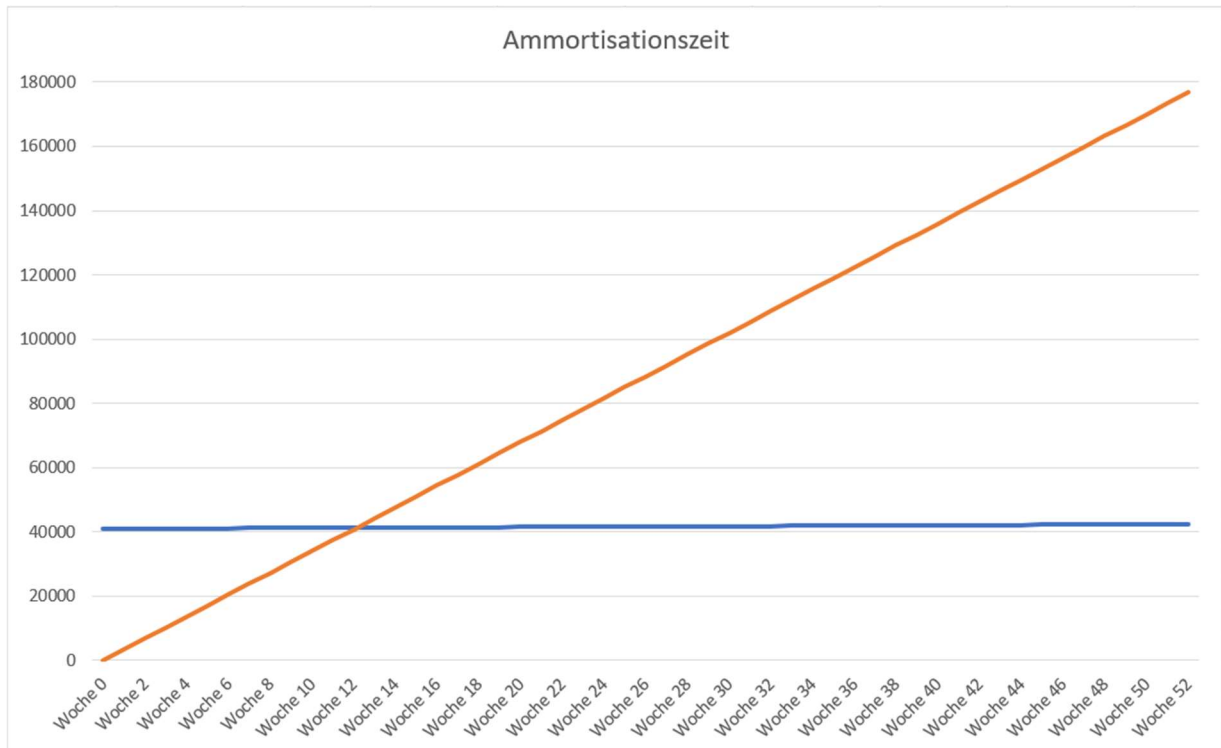
Nr.	Bezeichnung	A x H	Koste	TMU	Kode	A x H	Bezeichnung
			M70C 11	Y			
			P24SE 24	O			
			F(R30A)				
			S(81A)				
			ZO S M5SA				
			IO 6 APA				
			ZO S M5SA				
			Z O KL-1				
			B G K30-A				
			M4 A) S X				
			M10 A) V X				
		2X	E F T4 6				
		2X	T90S 10 8				
			T180S B 4				
			M80B 25 Z				
			E T 15 Z				
			E F Y 3				
			M4OC 18 5				
			M10A 6 O				
			KL-1 2 O				
			SZTBCZ				
			300 42P				
			6342				

MTM - Analyse		☐ Planungsanalyse ☐ Ausführungsanalyse		Ablage-Nr.	Blatt		
Kode	B	C	D	C	I		
Bezeichnung	EOL						
Beginn	Körperbohrung vom Vorgesess						
Inhalt	Alle notwendigen Tätigkeiten zur Durchführung EOL						
Ende	Vorgesess des Bankells						
Begrenzung							
Nr.	Bezeichnung	A x H	Kode	TMU	Kode	A x H	Bezeichnung
				18 6	TBC 1		
				15 5	RSC		
				3 5	S 13		
				2 0	MZA		
				14 3	M35A		
				46 1	SS60C2		
			M10C	7 9			
			P245E	21 0			
			KL 11	7 9	M10C		
			21 0	P245E			
			2 0	KL 1			
			15 0	WAP			
			8 4	K20D			
			0 0	S 5			
			10 6	APA			
			2 0	MZA			
			2 0	MZA			
			0 0	KL 2			
			55 6	WT			
			15 0	WAP			
			R20A	7 8			
			S 14	2 0			
			M14	3 1			
			M20A	9 6			
			34 2	TBC 2			
			34 1	SS62			



1. Prozessablauf





	Kosten Cobot	Kosten Werker				
Woche 0	40962,56	0,00			Kosten Cobot	Kosten Werker
Woche 1	40990,08	3398,27		Woche 27	41705,71	91753,37
Woche 2	41017,61	6796,55		Woche 28	41733,23	95151,64
Woche 3	41045,13	10194,82		Woche 29	41760,76	98549,92
Woche 4	41072,66	13593,09		Woche 30	41788,28	101948,19
Woche 5	41100,18	16991,37		Woche 31	41815,80	105346,46
Woche 6	41127,70	20389,64		Woche 32	41843,33	108744,74
Woche 7	41155,23	23787,91		Woche 33	41870,85	112143,01
Woche 8	41182,75	27186,18		Woche 34	41898,38	115541,28
Woche 9	41210,28	30584,46		Woche 35	41925,90	118939,56
Woche 10	41237,80	33982,73		Woche 36	41953,42	122337,83
Woche 11	41265,32	37381,00		Woche 37	41980,95	125736,10
Woche 12	41292,85	40779,28		Woche 38	42008,47	129134,37
Woche 13	41320,37	44177,55		Woche 39	42036,00	132532,65
Woche 14	41347,90	47575,82		Woche 40	42063,52	135930,92
Woche 15	41375,42	50974,10		Woche 41	42091,04	139329,19
Woche 16	41402,94	54372,37		Woche 42	42118,57	142727,47
Woche 17	41430,47	57770,64		Woche 43	42146,09	146125,74
Woche 18	41457,99	61168,91		Woche 44	42173,62	149524,01
Woche 19	41485,52	64567,19		Woche 45	42201,14	152922,29
Woche 20	41513,04	67965,46		Woche 46	42228,66	156320,56
Woche 21	41540,56	71363,73		Woche 47	42256,19	159718,83
Woche 22	41568,09	74762,01		Woche 48	42283,71	163117,10
Woche 23	41595,61	78160,28		Woche 49	42311,24	166515,38
Woche 24	41623,14	81558,55		Woche 50	42338,76	169913,65
Woche 25	41650,66	84956,83		Woche 51	42366,28	173311,92
Woche 26	41678,18	88355,10		Woche 52	42393,81	176710,20



Ehrenwörtliche Erklärung

„Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich“,

1. dass ich meine **Bachelorthesis** mit dem Thema:

**„Erarbeitung eines Konzeptes für die Einführung
eines kollaborierenden Robotersystems
am Beispiel der Endmontage einer BLDC-Elektronik“**

ohne fremde Hilfe angefertigt habe,

2. dass ich die Übernahme wörtlicher Zitate aus der Literatur sowie die Verwendung der Gedanken anderer Autoren an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit gekennzeichnet habe und
3. dass ich meine **Bachelorthesis** bei keiner anderen Prüfung vorgelegt habe.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Bitterfeld-Wolfen, 26.08.2019

Ort, Datum

Unterschrift

Dominik Berndt



Erklärung zur Prüfung wissenschaftlicher Arbeiten

Die Bewertung wissenschaftlicher Arbeiten erfordert die Prüfung auf Plagiate. Die hierzu von der Staatlichen Studienakademie Glauchau eingesetzte Prüfungskommission nutzt sowohl eigene Software als auch diesbezügliche Leistungen von Drittanbietern. Dies erfolgt gemäß § 7 des Gesetzes zum Schutz der informationellen Selbstbestimmung im Freistaat Sachsen (Sächsisches Datenschutzgesetz – SächsDSG) vom 25. August 2003 (Rechtsbereinigt mit Stand vom 31. Juli 2011) im Sinne einer Datenverarbeitung im Auftrag.

Der Studierende bevollmächtigt die Mitglieder der Prüfungskommission hiermit zur Inanspruchnahme o.g. Dienste. In begründeten Ausnahmefällen kann der Datenschutzbeauftragte der Staatlichen Studienakademie Glauchau sowohl vom Verfasser der wissenschaftlichen Arbeit als auch von der Prüfungskommission in den Entscheidungsprozess einbezogen werden.

Name:	Berndt
Vorname:	Dominik
Matrikelnummer:	4002477
Studiengang:	Industrielle Produktion / Produktionstechnik
Titel der Arbeit:	Erarbeitung eines Konzeptes für die Einführung eines kollaborierenden Robotersystems am Beispiel der Endmontage einer BLDC-Elektronik
Datum:	26.08.2019
Unterschrift:	