



Fakultät für Naturwissenschaften und Technik
Facoltà di Scienze e Tecnologie
Faculty of Science and Technology

Degree Course

**BACHELOR IN INDUSTRIE- UND
MASCHINENINGENIEURWESEN
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA
INDUSTRIALE MECCANICA
BACHELOR IN INDUSTRIAL
AND MECHANICAL ENGINEERING**

**Konzeptentwurf und digitale Modellierung einer
hybriden Montagelinie im Smart Mini Factory
Labor**

von / di / by

Armin Peer

Vor- und Nachname / Nome e Cognome / Name and Surname

Berichterstatter / Relatore / Supervisor

Erwin Rauch

Vor- und Nachname / Nome e Cognome / Name and Surname

Zweitbetreuer / Correlatore / Second Supervisor

/

Vor- und Nachname / Nome e Cognome / Name and Surname

Akademisches Jahr / Anno Accademico / Academic Year

2020/2021

Prüfungsdatum / Data dell'esame / Exam Date

16-17.03.2021



Dichiarazione - Erklärung

Il sottoscritto,
Hiermit erkläre ich,

Armin Peer

(Nome e Cognome / Vor- und Zuname)

Nato il **28.05.91**
geboren am

a
in

Bolzano/Bozen

dichiara di aver redatto l'elaborato finale in piena autonomia senza avvalersi
die vorliegende Abschlussarbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe (mit

della collaborazione di terzi (ad esclusione del relatore). Testi, Informazioni e
Ausnahme des Berichterstatters) angefertigt zu haben. Texte, Informationen

dati, che provengono da fonti esterne sono state debitamente evidenziate
und Daten, die fremden Quellen entstammen, sind als solche durch Zitat

con gli opportuni riferimenti bibliografici.
kenntlich gemacht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführung	1
1.2	Motivation und Zielsetzung.....	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Stand der Technik und der Forschung	4
2.1	Theoretische Grundlagen und Methoden zur Gestaltung von modernen Montagesystemen	4
2.1.1	Entstehung, Begriffserklärung und Funktionen der Montage	4
2.1.2	Aktuelle Anforderungen an Flexibilität und Anpassbarkeit von Montagesystemen.....	5
2.1.3	Methoden der Montageplanung	6
2.1.4	Entwicklungs- und Kreativitätsmethoden zum Entwurf von Montagearbeitsstationen	9
2.2	Stufen der Automatisierung in der Montage	11
2.2.1	Manuelle Montagesysteme	13
2.2.2	Teilautomatisierte (hybride) Montagesysteme.....	15
2.2.3	Vollautomatisierte Montagesysteme	17
2.3	Mensch-Maschine Kollaboration in der Montage.....	20
2.3.1	Technologien zur Mensch-Maschine Kollaboration in der Montage.	20
2.3.2	Anwendungsmöglichkeiten in hybriden Montagesystemen	22
2.3.3	Sicherheitsaspekte der Mensch-Maschine-Kollaboration.....	24
3	Digitale Modellierung der teilautomatisierten Montagelinie	26
3.1	Produkt- und Prozessanalyse.....	26
3.1.1	Produktanalyse	27
3.1.2	Analyse der derzeit manuellen Montageprozesse	31
3.1.3	Analyse der vorhandenen Hardwarekomponenten.....	34
3.1.4	Aufgabenbeschreibung und Zielsetzung	39
3.2	Detaillkonzept	39
3.2.1	Soll-Prozessablauf.....	39
3.2.2	Layout der teilautomatisierten Montagelinie.....	43
3.2.3	Spezifizierung der Hardwarekomponenten im Soll-Prozess.....	44
3.2.4	Notwendigkeiten einer Überprüfung mittels Digitalem Mock-Up	48
3.3	Digitale Modellierung der teilautomatisierten Montagelinie	49

3.3.1	Vorgehensweise bei der digitalen Modellierung	49
3.3.2	Digitales Modell der gesamten Montagelinie	51
4	Digitale und virtuelle Überprüfung.....	54
4.1	Überprüfung durch Simulation des Montageablaufs	54
4.2	Überprüfung in der Virtuellen Realität	56
4.3	Fazit der digitalen und virtuellen Prüfung	58
5	Bewertung und Nutzenanalyse	59
5.1	Qualitative Bewertung des Montagekonzepts.....	59
5.2	Quantitative Bewertung	60
5.3	Fazit der Bewertung und Handlungsempfehlungen	62
6	Zusammenfassung.....	64
6.1	Deutsche Fassung	64
6.2	Italienische Fassung	65
6.3	Englische Fassung	66
7	Begriffe, Definitionen und Abkürzungen.....	68
8	Literaturverzeichnis.....	69
9	Abbildungsverzeichnis.....	76

1 Einleitung

Diese Abschlussarbeit befasst sich mit der digitalen Planung und Auslegung einer hybriden Montagelinie im Smart Mini Factory Labor der Freien Universität Bozen. Dies beinhaltet eine Literaturrecherche über Montageplanung und CAD-Produktionslinienmodellierung, sowie die Konzeptausarbeitung und die digitale Modellierung der Montagelinie selbst. Das erste Kapitel dieser Arbeit beinhaltet eine kurze Einführung in die Thematik, die Motivation und Zielsetzung, um die Sinnhaftigkeit der Arbeit zu erläutern, sowie eine Übersicht des Aufbaus.

1.1 Einführung

Seit auf der Hannovermesse im Jahr 2011 das erste Mal der Begriff Industrie 4.0 gefallen ist, hat sich ein regelrechter Hype um diesen Terminus gebildet. Die Vierte Industrielle Revolution verspricht die Produktion mit IT- und Kommunikationstechnik zu verzahnen, um so durch kundenspezifische Personalisierung der Produkte in der Massenproduktion („Mass Customization“) die Wertschöpfung zu maximieren.

Voraussetzung für die Implementierung von Industrie 4.0 in bestehenden Produktionssystemen ist die Ausrüstung sämtlicher prozessrelevanter Objekte mit passender Sensorik, Rechenkapazität und Kommunikationstechnologie. Die so entstandenen intelligenten Verbunde, sogenannte Cyber-Physische Systeme (CPS) sind in der Lage, mit anderen CPS, Produkten sowie Mitarbeitern zu kommunizieren, um den Produktionsablauf zu optimieren. Auf dieser Basis können neue Technologien eingreifen wie das Internet der Dinge und Dienste, Cloud Computing und Big Data (Kagermann et al., 2013).

Für die Umsetzung ist aber vor allem qualifiziertes Personal vonnöten, welches mehr denn je Mangelware ist. Um dem entgegenzuwirken, wurden die ersten Lernfabriken gegründet. Definitionsgemäß muss eine Lernfabrik eine Reihe von Voraussetzungen erfüllen (Abele et al., 2019):

- Die Ausrüstung der Lernfabrik sollte sowohl technisch als auch informatisch auf dem neuesten Stand sein
- Der Prozessablauf muss realitätsnah sein, mehr als eine Station enthalten und möglichst alle prozessrelevanten Aspekte sowohl im realen als auch im digitalen Bereich erfassen.
- Einflüsse der gesamten Wertschöpfungskette müssen berücksichtigt werden.

Auch die Freie Universität Bozen erkannte die immense Wichtigkeit von Industrie 4.0 und gründete das Smart Mini Factory Lernfabriklabor. Dieses soll eine Plattform für Informationsaustausch und Kommunikation zwischen Studenten, Forschern und Industrie bilden, um den Wissenstransfer zwischen Forschung und Industrie zu ermöglichen. Diese branchenübergreifende Zusammenarbeit generiert für alle Bereiche einen didaktischen und finanziellen Mehrwert (Smart Mini Factory, 2021).

1.2 Motivation und Zielsetzung

Das Smart Mini Factory Labor ist eine Lernfabrik und bietet Forschern, Unternehmern, Professoren und Studenten eine Plattform, um zusammen verschiedene Konzepte und Methoden der Industrie 4.0 zu analysieren, weiterzuentwickeln und anhand praktischer Fallbeispiele zu simulieren. Die synergetisch verlaufende Zusammenarbeit generiert in allen Bereichen einen Mehrwert: Forscher profitieren von Praxiserfahrungen und neuen Problemstellungen der Unternehmer, diese wiederum können das geballte Wissen der Wissenschaftler nutzen, um ihre Unternehmens- oder Prozessstruktur zu optimieren. Die Studenten realisieren anhand von Studien- oder Abschlussarbeiten kontinuierlich neue Projekte und sammeln dabei wertvolle Praxiserfahrung mit hochentwickelter Technologie.

Voraussetzung für besagte Wissensgenerierung ist natürlich eine angemessene Ausstattung des Labors. Dabei punktet die Smart Mini Factory (SMF) mit einer Reihe von zukunftsweisenden Geräten und Demonstratoren, wie zum Beispiel das Comau Exoskeletton MATE, Ulixes Der Assistant A600, insgesamt sechs kollaborativen und nicht kollaborativen Robotern, einer mobilen Robotikplattform KUKA KMR iiwa und vielen mehr. Eine Sonderstellung bilden die Bosch-Rexroth Montagetische, die hybride Montagestation mit UR3 und eine flexible Montrac Transferlinie. Seit einigen Jahren wurde im Zuge der Lehrveranstaltungen in den Bachelor- und Masterstudiengängen der industrielle Zusammenbau eines Pneumatikzylinders simuliert. Ausgeführt wurde diese Tätigkeit an den Bosch-Rexroth Montagetischen, sowie an der hybriden Montagestation. Um auch die Simulation eines Prozessablaufes auf mehreren automatisierten Montagestationen in Kombination mit hybriden Montageplätzen, also einer teilautomatisierten Montagelinie, zu ermöglichen, wurde eine ein flexibles Transfersystem der Marke Montratec angekauft.

Im Folgenden bestand die Notwendigkeit der Erarbeitung eines Konzeptes zur Integration der bestehenden automatisierten und nicht automatisierten Stationen in die Montratec-Transferlinie. Aufgrund der im Jahre 2020 ausgebrochenen Corona-Pandemie und dem daraus resultierenden restriktiven Zugang ins SMF-Labor wurde die Ausarbeitung dieses Konzeptes, sowie die digitale Modellierung und Überprüfung der Anlage als theoretische Arbeit ausgeschrieben und größtenteils während des Lockdowns in Heimarbeit ausgearbeitet. Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis und dient als Basis für die anschließende praktische Umsetzung.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die folgende Darstellung (siehe Abb. 1) dient als Übersicht der Struktur und Inhalte der nachfolgenden Arbeit.



Abbildung 1 Struktur der Arbeit

2 Stand der Technik und der Forschung

In diesem Kapitel wird Aufschluss über den aktuellen Stand der Technik und Forschung im Bereich Montage und Montageplanung gegeben. Dabei wird anfangs genauer in die Terminologie und Begriffserklärung im Bereich Montage eingegangen, um die darauffolgende Analyse der Montage- bzw. Automatisationsstufen verständlicher zu gestalten. Der abschließende Abschnitt beschäftigt sich mit hybriden sowie kollaborativen Montagestationen. Diese bilden das moderne Verbindungsglied zwischen manuellen und automatisierten Montagesystemen.

2.1 Theoretische Grundlagen und Methoden zur Gestaltung von modernen Montagesystemen

2.1.1 Entstehung, Begriffserklärung und Funktionen der Montage

Ein industriell hergestelltes Produkt setzt sich aus einer Vielfalt von Einzelteilen und Baugruppen zusammen, die zu verschiedenen Zeiten und durch Anwendung verschiedener Fertigungsverfahren produziert werden. Im Zuge der Montage soll durch Zusammenbauen dieser Teilevielfalt nun ein Produkt höherer Komplexität entstehen, das vorher festgelegte Funktionen erfüllt. Zudem soll dieser Vorgang in einer definierten Zeit ablaufen (Warnecke et al., 1975; Lotter und Wiendahl, 2012).

Erst seit dem Anlaufen der industriellen Güterproduktion wird von der Montage als eigenständigem Produktionsschritt gesprochen (Lotter und Wiendahl, 2012). Die Montage stellt demnach ein Teilsystem des Produktionssystems eines Industrieunternehmens dar, mit dem der Produktionsprozess eines Gutes zum Abschluss gebracht wird (Holle, 2002; Konold und Reger, 2003).

Das Prinzip der Arbeitsteilung in der Montage geht auf den Boom der Automobilindustrie in den USA Anfang des 20. Jahrhunderts zurück. Durch die starke Konkurrenz musste die kostenintensive Montage wirtschaftlicher gestaltet werden, wobei ein Mangel an ausreichend qualifizierten Arbeitskräften bestand. Die Lösung von Henry Ford für den Zusammenbau seines T-Modells war der Einsatz der Fließmontage, die er als Erster im Jahre 1908 angewandt hat (Lotter und Wiendahl, 2012).

Das Montieren umfasst laut VDI-Richtlinie 2860 (1990) alle Tätigkeiten zum Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern. Zu diesen Tätigkeiten, den sog. Funktionen der Montage, zählen folgende Vorgänge (Konold und Reger, 2003; Lotter und Wiendahl, 2012):

- Das Fügen (DIN 8593, 1996): Urformen, Umformen, An- und Einpressen, Füllen, Zusammenlegen, Stoffverbinden (z.B. durch Schweißen, Kleben und Lötens) u. a.
- Das Handhaben (VDI 2860, 1990): Bewegen, Ordnen, Mengen ändern, Speichern, Sichern, Positionieren, Zuteilen, Ein- und Ausgeben, Spannen und Entspannen, u. a.
- Das Kontrollieren (VDI 2860, 1990): Messen und Prüfen.

- Das Justieren: Einformen, Fügen von Ausgleichsteilen, Einstellen, Trennen, Umformen, Nachbehandeln.
- Sondertätigkeiten: Erwärmen, Entgraten, Reinigen, Kühlen, Markieren, Auspacken, Bedrucken, Ölen, Einsprühen, Abdichten, u.a.

2.1.2 Aktuelle Anforderungen an Flexibilität und Anpassbarkeit von Montagesystemen

Aktuell wird die wirtschaftliche Situation vieler Unternehmen weltweit von der zunehmenden Globalisierung entscheidend beeinflusst. Zudem haben sich die Märkte von Anbieter- zu Käufermärkten entwickelt, was den Konkurrenzdruck zwischen den verschiedenen Unternehmen intensiviert (Lotter und Wiendahl, 2012). Vollautomatisierte Montagesysteme findet man vor allem noch in der Großserienproduktion, da sie sehr produktiv und effizient sind. Der Trend geht aber hin Richtung Variantenvielfalt und kundenspezifische Produktgestaltung, der sog. „customization“, wobei die Losgrößen schrumpfen und eine ständige Verkürzung der Produktlebenszyklen festzustellen ist (Bartenschlager et al., 1998; Konold und Reger, 2003; Lotter und Wiendahl, 2012).

Es wird auf Flexibilität und Anpassbarkeit von Montagesystemen gesetzt, um schnellstens auf Stückzahl- und Variantenänderungen und damit einhergehende Veränderungen der Fertigungs- und Montageprozesse während des Produktlebenszyklus reagieren zu können. Sind Möglichkeiten zur Nachrüstung von bereits eingerichteten Montagesystemen gegeben, so können diese bei gegebenen Anforderungen Schritt für Schritt mechanisiert und automatisiert oder auch verkettet und umgerüstet werden (Schmidt, 1992; Bartenschlager et al., 1998; Lotter und Wiendahl, 2012).

Außerdem helfen standardisierte Montagegrundsysteme und Funktionsbaugruppen, die produktneutral und im Hinblick auf deren Wiederverwendung konzipiert wurden, die Montage flexibel zu halten. Individuelle Kundenwünsche können wirtschaftlich verwirklicht werden, indem die Variantenausbildung möglichst spät im Herstellungsprozess durchgeführt wird (Konold und Reger, 2003; Lotter und Wiendahl, 2012). Dies erfordert gegebenenfalls die Eingliederung von formgebenden Fertigungsverfahren in die Montage (Wiendahl et al., 2004).

Alle diese Phänomene führen momentan hin zu einer hybriden und roboterunterstützten Montage, bei denen der Mensch lenkende und steuernde Aufgaben übernimmt (Lotter und Wiendahl, 2012). Neueste Entwicklungen schlagen kooperative Arbeitsstationen vor, bei denen durch eine enge Kooperation und Interaktion zwischen Mensch und Maschine (bzw. Roboter) auch schwierige Montagevorgänge realisiert werden können. Der Schlüssel liegt darin, die jeweiligen Stärken bzw. Vorteile manueller und automatisierter Montagesysteme richtig einzusetzen und zu nutzen (Krüger et al., 2009).

Ein anderer wichtiger Aspekt ist die Art der Teilebereitstellung bzw. Teilezuführung. Komplexe Produkte mit einer Vielfalt an Teilen und Varianten sowie der Einsatz von Just-In-Time- oder Just-In-Sequence-Konzepten rückt die Bereitstelllogistik immer mehr in den Mittelpunkt der Montageplanung. Des Weiteren gewinnt die Gestaltung der Werkstückträger zunehmend an Bedeutung (Lotter und Wiendahl, 2012).

Die Montage ist ein sehr kostenintensiver Prozess, wobei der größte Teil der Produktionskosten eines Produktes zwar durch die Montage verursacht wird, jedoch auf die Verantwortlichkeit der Konstruktion fällt, wie in Abb. 2 veranschaulicht (Lotter, 1992).

Alle organisatorischen und technischen Fehler, Schwierigkeiten und Probleme der vorliegenden Prozesse stauen sich bei der Montage auf (Konold und Reger, 2003), da sie als Abschluss des Produktionsprozesses angesehen werden kann (Holle, 2002). Das zeigt, dass eine montage- und automatisierungsgerechte Produktgestaltung für die Rationalisierung der Montage von zentraler Bedeutung ist (Lotter und Wiendahl, 2012).

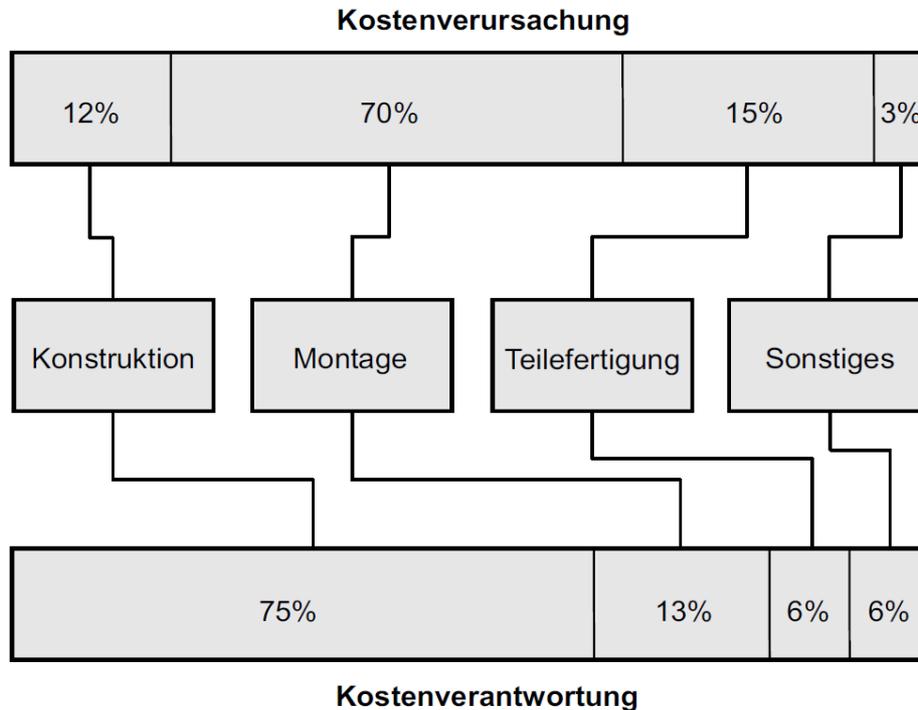


Abbildung 2 Kostenverursachung und Kostenverantwortung (Lotter und Wiendahl, 2012)

2.1.3 Methoden der Montageplanung

Die Planung und Gestaltung eines Montagesystems sollte in einer möglichst flexiblen Montagestruktur resultieren, wobei die Aspekte der Mengen- und Variantenabhängigkeit eines Produktes, der erforderlichen Fügetechnik, der Organisation der auszuführenden Arbeit und der Ergonomie der Arbeitsplätze in diesen Prozess miteinbezogen werden müssen (Konold und Reger, 2003).

Der Planungsprozess eines Montagesystems zeichnet sich durch eine hohe Komplexität aus, die es zu beherrschen gilt. Aus der Praxiserfahrung haben sich in der Vergangenheit mehrere Methoden und Richtlinien zur Produktions- und Montageplanung herausgebildet. Nachfolgend wird genauer auf die Planungssystematik nach Lotter eingegangen, die eigens für die Planung von Montagesystemen konzipiert wurde. Diese setzt sich aus 11 Schritten zusammen, die auf zahlreichen Praxiserfahrungen fußen und äußerst flexibel in ihrer Anwendung sind. Man kann sie auf die verschiedensten Produkte in den verschiedensten Branchen applizieren, wobei sie natürlich an die jeweiligen Anforderungen der Produkte und deren Montageprozess angepasst werden müssen. Dabei spielen v.a. die Produktgestaltung und -komplexität sowie das Produktionsvolumen eine zentrale Rolle (Lotter und Wiendahl, 2012).

Die 11 Schritte zur Planung eines Montagesystems nach Lotter (Abb. 3) sind im Folgenden kurz erklärt (Lotter, 1992; Lotter und Wiendahl, 2012):

(1) In einer *Anforderungsliste* werden die Eckdaten des einzurichtenden Montagesystems festgelegt. Dazu zählen etwa die planmäßige Produktionsmenge und die geschätzte Produktlebenszyklusdauer. In Folge werden mit Hilfe der Arbeitszeiten des Unternehmens die maximale Nutzungsdauer und ein Ziel-Nutzungsgrad des Systems ermittelt. Die Analyse der Wirtschaftlichkeit umfasst beispielsweise die zu erreichende Amortisationszeit und Flexibilität des Systems, um möglichst flexibel auf Marktveränderungen reagieren zu können.

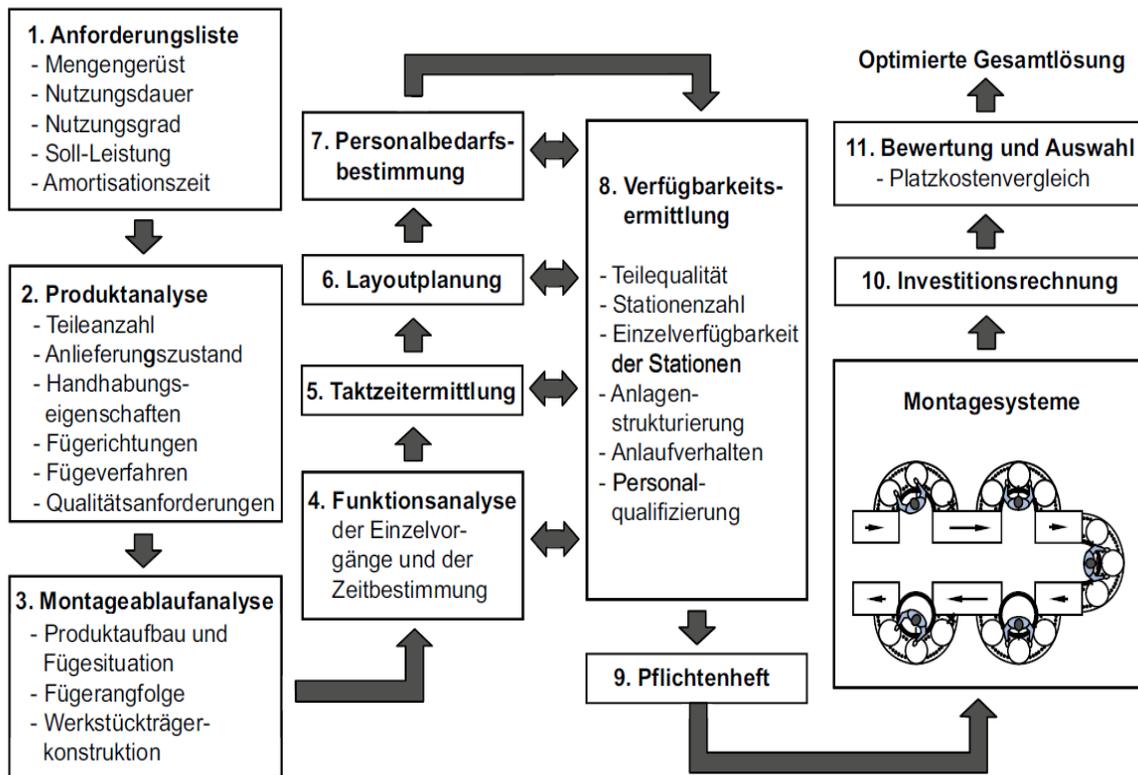


Abbildung 3 Planungssystematik nach Lotter (1992)

(2) Bei der nachfolgenden *Produktanalyse* wird das zu montierende Produkt hinsichtlich der Menge und Art seiner Teile, deren Anliefersituation, der notwendigen Fügerichtungen und -verfahren, der zu erreichenden Qualität und der Handhabungseigenschaften untersucht. Ziel dieser Analyse ist die Bestimmung eines wirtschaftlichen Automatisierungsgrades für das zu planende System, wobei man Antworten auf die Fragen der Teilebereitstellung, der Eignung des Produktes für die manuelle oder automatische Montage und der erforderlichen Einzelteilqualität für manuelle oder automatische Montage finden sollte.

(3) Es folgt eine *Montageablaufanalyse*, bei der auf Basis der konstruktiven Produktstruktur und der Fügesituation die Fügerangfolge ermittelt wird. Zur Veranschaulichung der Struktur eines Montageablaufes kann ein Montagevorranggraph (Netzplan) ausgearbeitet werden, wobei die Montageaufgabe in all ihre Teilvorgänge zerlegt wird (Knoten). Die Vorgänger- und Nachfolgerabhängigkeiten zwischen ihnen werden durch Pfeile dargestellt. Der Vorranggraph macht deutlich, welche Tätigkeiten vor anderen abgeschlossen sein müssen und welche zur gleichen Zeit ablaufen können, da sie unabhängig voneinander sind. Bei Bedarf können auch noch weitere wichtige Daten angeführt werden, wie z.B. die übergeordnete Baugruppe, die benötigte Zeit oder ob es

sich um einen manuellen oder automatischen Montageschritt handelt. Des Weiteren fällt die Planung und Gestaltung eines Werkstückträgers zur Produktfixierung in diesen Planungsabschnitt mit hinein (Lotter, 1992; Konold und Reger, 2003; Lotter und Wiendahl, 2012).

(4) Als nächstes wird eine *Funktionsanalyse* durchgeführt. Dabei werden die einzelnen Montagevorgänge in ihre Funktionsfolgen aufgeteilt, die typischerweise aus den Vorgängen Ordnen, Zuführen, Fügen und Prüfen zusammengesetzt sind. Daraufhin werden die dafür erforderlichen Zeiten ermittelt bzw. aufgenommen. Bei automatischen Montageschritten müssen bei der Zeitermittlung auch die Schalt- und Haltezeiten berücksichtigt werden. Bei manuellen Montageschritten hingegen benutzt man „Systeme vorbestimmter Zeiten“ (SvZ), wie z.B. das in der Praxis häufig angewandte MTM-Verfahren (Methods Time Measurement) oder das vereinfachte MTM-UAS (Universelles Analysiersystem), das aus dem ursprünglichen MTM-Verfahren hervorgegangen ist. Bei diesen Methoden wird eine manuelle Montageaufgabe in ihre grundsätzlichen Bewegungselemente aufgegliedert, denen dann Soll-Zeiten zugeteilt werden (Lotter, 1992; Lotter und Wiendahl, 2012; Holle, 2002; Konold und Reger, 2003; Warnecke, 1992).

(5) Die *Taktzeit* wird unter Berücksichtigung der Daten in der Anforderungsliste mit der nachfolgenden Formel berechnet:

$$T_{\text{TAKT}} = \frac{\text{verfügbare Betriebszeit/Schicht}}{\text{geforderte Produktionsmenge/Schicht}} \cdot \text{OEE}$$

OEE bedeutet „Overall Equipment Effectiveness“, also Gesamtanlageneffektivität, und kann wie folgt errechnet werden:

$$\text{OEE} = \text{Maschinenverfügbarkeit} \cdot \text{Maschineneffizienz} \cdot \text{Qualitätsrate}$$

Aus der Kundennachfrage ergibt sich die geforderte Produktionsmenge pro Schicht - der Kunde ist also der Taktgeber. Die längste Taktzeit der Einzelstationen gilt als die übergreifende Taktzeit des kompletten Montagesystems (Lotter, 1992; Lotter und Wiendahl, 2012; Matt, 2014).

(6) Im nachfolgenden Schritt, der *Layoutplanung* des Montagesystems, soll die bestmögliche Anordnung der Montagearbeitsplätze und -anlage in Hinsicht auf den Materialfluss und der Materialbereitstellung gefunden werden. Die Größe des Montagesystems und die Anzahl an parallel arbeitenden, gleichen Montagestation hängen von der Produktstruktur, der Fügerangfolge, der Fügesituation, dem Werkstückträger und der geplanten Taktzeit ab. Die Fügesituation und die Funktionsanalyse hingegen beschränken den erreichbaren Automatisierungsgrad und legen somit den Anteil an manuellen Montagefähigkeiten fest.

(7) Im Zuge der *Personalbedarfsbestimmung* werden die notwendigen Personalressourcen ermittelt. Unterschieden wird in Personal für die manuelle Arbeit am Montageobjekt, das unter Zuhilfenahme der Soll-Zeiten von Schritt 4 bestimmt wird, und

Personal für überwachende Tätigkeiten an den Montageanlagen, z.B. zur Funktionsüberwachung, zur Sicherstellung der Materialbereitstellung und zur Kleinstörungsbehebung.

(8) Durch die *Verfügbarkeitsermittlung* soll eine gleichmäßige Verfügbarkeit des Montagesystems langfristig gewährleistet werden. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Qualität der Teile, der Qualifikation der Mitarbeiter, der Struktur der Anlage, ihrem Anlaufverhalten und der Anzahl und Verfügbarkeit der einzelnen Montagestationen. Es kann vorkommen, dass einige bereits unternommene Schritte auf Basis der Ergebnisse der Verfügbarkeitsermittlung überarbeitet werden müssen. Außerdem machen unsichere Absatzprognosen das Erarbeiten alternativer Lösungen und Varianten unabdingbar.

(9) In diesem Schritt werden die Ergebnisse der Schritte 1 bis 8 in einem *Pflichtenheft* untergebracht. Es kann dazu nützlich sein, Angebote bei Montagesystemproduzenten anzufragen und hilft bei der Planung von Eigenleistungen.

(10) Im Zuge einer *Investitionsrechnung* werden die umfassenden Kosten der Montaganlagen berechnet (Planung – Fertigung – Aufbau – Inbetriebnahme) und durch den Vergleich von Eigenleistung und Fremdbeschaffung die kostengünstigsten Lösungen ausgearbeitet.

(11) Schlussendlich wird eine *Bewertung und Auswahl* der verschiedenen Lösungsansätze vorgenommen, wobei man sich dabei mit verschiedensten Methoden behilft, wie etwa der Montagestückkostenrechnung mit integrierter Maschinenstundensatz- und Personalkostensatzrechnung oder Wirtschaftlichkeitsberechnungen kombiniert mit einer Nutzwertanalyse. Das Ergebnis dieser Phase ist entweder die Auswahl eines vorgeschlagenen Systems oder die Überarbeitung und Optimierung einer der möglichen Lösungsvarianten.

2.1.4 Entwicklungs- und Kreativitätsmethoden zum Entwurf von Montagearbeitsstationen

Im folgenden Unterkapitel wurde eine kurze Übersicht über heuristische Kreativitätsmethoden erstellt, welche derzeit Verwendung finden. Anhand ihrer Effizienz und ihrer Eignung wurden einige ausgewählt und zur Realisierung der vorliegenden Arbeit verwendet (Winkelhofer, 2006; Gust, 2018; Becker, 2018).

- 6 Thinking Hats Method:

6 Gruppenmitglieder setzen je einen Hut einer bestimmten Farbe auf. Jede Farbe repräsentiert eine bestimmte Charaktereigenschaft, welche nun der Träger annehmen muss. Das Projekt wird diskutiert, die Ergebnisse notiert. Die Hüte werden gewechselt und die Runde beginnt von neuem.

- 635 Methode:

6 Gruppenmitglieder schreiben je 3 Ideen auf ein weißes Blatt Papier und geben dieses 5-mal weiter, wobei jeder eine Ergänzung beisteuert.

- ABC Methode:

Das komplette Alphabet wird an die linke Seite eines Blattes notiert. Nun muss innerhalb einer festgelegten Zeit jedem Buchstaben eine Idee zugeordnet werden.

- Assoziogramm:

Ein Begriff wird in die Mitte eines leeren Blattes Papier geschrieben. Der Ersteller schreibt nun alle einige andere Begriffe, welche er mit ersterem verbindet (assoziiert) im Kreis herum. Dies ist eine einfache Methode, die den Einstieg in ein Thema erleichtern soll.

- Bionik:

Hierbei werden vergleichbare Lösungsansätze aus in der Natur gesucht und spezifisch an das Problem angepasst. Dies führt zu unkonventionellen, oft futuristisch anmutenden Problemlösungen (Nachtigall, 1998).

- Brainstorming:

Die am weitesten verbreitete Methode zur Lösungsfindung: Eine beliebige Anzahl von Gruppenmitgliedern äußert jede erdenkliche Idee zur Lösung der Fragestellung. Kritik, Bewertung und negative Einwände sind im ersten Teil des Vorgangs unerwünscht. Erst anschließend dürfen die Ergebnisse besprochen und ausgewertet werden.

- Collective Notebook:

Eine modern Variante des Brainstormings. Hierbei werden mittels Brainwriting (jeder erdenkliche Idee wird aufgeschrieben) innerhalb eines festgelegten Zeitraumes alle Gedanken der Teilnehmer in einer geteilten (shared) Datei gesammelt und anschließend geprüft und bewertet. Möglich ist hier auch eine anonyme Teilnahme.

- Morphologische Analyse:

Die Morphologische Analyse ist eine kreative, heuristische Methode zur Lösungsfindung von multidimensionalen, nicht quantifizierbaren, komplexen Problemen, die mit konventionellen Methoden nicht erfassbar sind. Hierfür wird ein Morphologischer Kasten erstellt mit etwa fünf Spalten und einer beliebigen Anzahl an Zeilen. An der linken Seite werden nun lösungsrelevante Kriterien geschrieben, wie z.B. Material, Länge, Form. Rechts davon wird die Tabelle verschiedene Ausprägungen des Kriteriums gefüllt. In absteigender Reihenfolge jeweils eine Ausprägung pro Zeile ausgewählt werden, welche nun zu einem Konzept zusammengefasst werden. Anschließend wird jedes Konzept geprüft und bewertet. (Schlattmann und Seibel, 2017)

- Progressive Abstraktion:

Anstatt die Problemstellung zu lösen, wird diese schrittweise durch Hinterfragung abstraktiert, um das Kernproblem zu erschließen. Diese Methode sollte in der Anfangsphase der Lösungssuche angewandt werden. (Schlattmann und Seibel, 2017)

- SCAMPER:

SCAMPER ist ähnlich dem TRIZ eine Checkliste, die durch eine Reihe von Anweisungen innovative Ideen generieren soll.

- Synektik:
Die Synektik-Methode handelt nach dem Grundsatz "Mach dir das Fremde vertraut und verfremde das Vertraute". (Becker, 2018)
- TRIZ:
Die TRIZ Methode (oder auch TIPS, Theory of the resolution of invention-related tasks) basiert auf der Annahme, dass eine relativ große Anzahl von Erfindungen aufgrund einer relativ kleinen Anzahl von Lösungsprinzipien entstanden sind. Das vorliegende Problem möglicherweise mit einem dieser Lösungsansätze behoben werden.

Besonders interessant ist der von Jiri Scherer entwickelte Do-It-Ideenprozess, welcher in Abb. 4 dargestellt wird. Dieser sieht die sukzessive Anwendung verschiedener Ideenfindungs- und Lösungsmethoden vor, ähnlich der Ablauffolge eines morphologischen Kastens. Der Ideenprozess gliedert sich in vier Phasen, die sich ihrerseits in insgesamt zehn Schritten aufteilen. Diese dürfen in ihrer Abfolge nicht verändert werden. Jedem Schritt sind eine gewisse Anzahl von Methoden zugeordnet. Jede Methode steht für sich und hat keinen direkten Bezug zu den nebenstehenden. (Scherer, 2007)

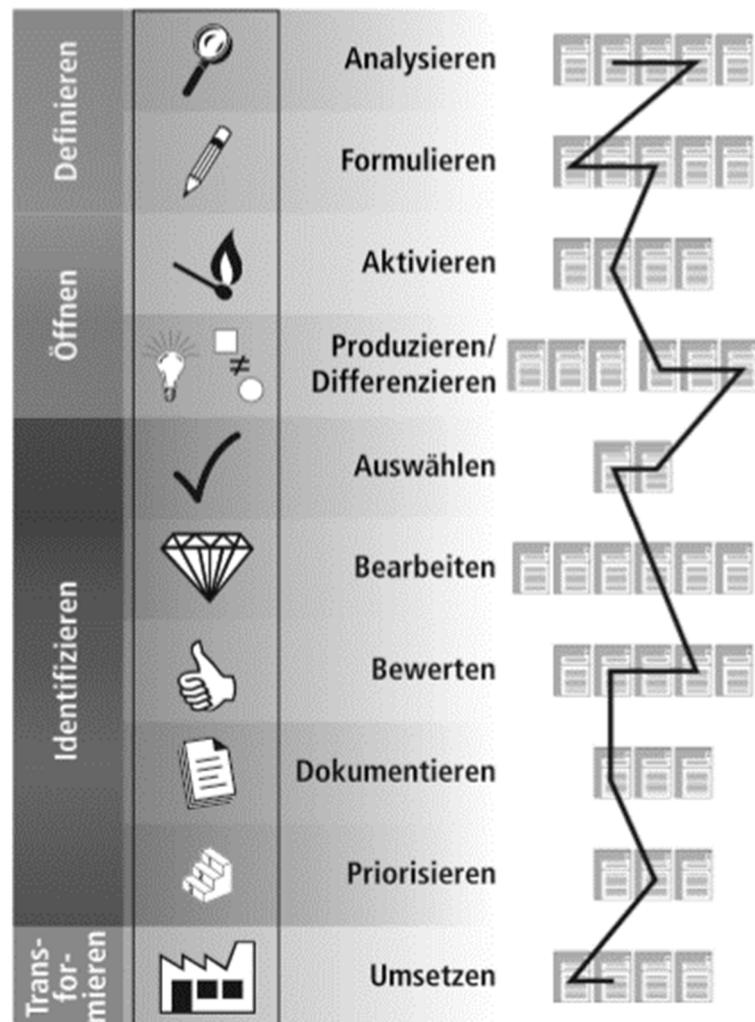


Abbildung 4 Do-It-Ideenprozess (Scherer,2007)

2.2 Stufen der Automatisierung in der Montage

Im Grunde unterscheidet man zwischen manuellen, teilautomatisierten (hybriden) und vollautomatisierten Montagesystemen (Konold und Reger, 2003; Lotter und Wiendahl, 2012). In Abb. 5 sind ihre grundsätzlichen vor- und nachteiligen Eigenschaften dargestellt.

Manuelle Montagesysteme sind nicht investitionsintensiv und äußerst flexibel, was die Montage von zahlreichen, kundenspezifisch angepassten Produktvarianten möglich macht. Allerdings können sie durch ihre niedrige Produktivität nur bei geringen Produktionsmengen und kleinen Losgrößen rentabel eingesetzt werden.

Ein vollautomatisiertes Montagesystem hingegen wird bei großen Produktionsmengen und Losgrößen verwendet, um die hohen Investitionskosten abwälzen zu können. Es zeichnet sich durch seine hohe Produktivität aus, was sich wiederum negativ auf seine Flexibilität und der herstellbaren Variantenanzahl auswirkt.

Letztlich gibt es noch teilautomatisierte (hybride) Montagesysteme, die den Einsatz von manuellen und automatisierten Montagevorgängen vorsieht. Gegenstand der Automatisierung sind dabei besonders qualitätswichtige Vorgänge (Lotter und Schilling, 1994; Lotter et al., 1998; Lotter und Wiendahl, 2012).

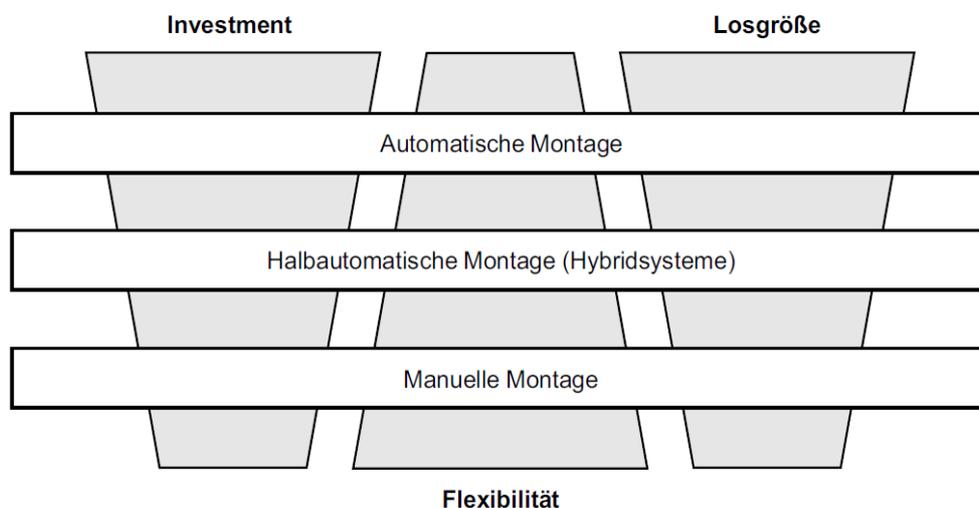


Abbildung 5 Auswahlkriterien für Montagesysteme (Lotter und Wiendahl, 2012)

Die Grundformen zur Anordnung der Montagearbeitsplätze sind das Karree, die U-Form und die Linienform. Je nach Anforderungen und Platzverhältnissen werden natürlich verschiedene Sonderformen realisiert. Bei manuellen Montagesystemen kann der Werkstückumlauf entweder manuell oder automatisch erfolgen. Integriert man zudem noch frei- oder festprogrammierbare Handhabungseinrichtungen in das Montagesystem, wie z.B. Roboterzellen oder Rundtaktische, so erhält man ein hybrides Montagesystem. Werden alle Montagevorgänge vollautomatisiert abgearbeitet, so müssen die verschiedenen Arbeitsstationen entweder lose oder starr mit Hilfe von Transfer- und Fördereinrichtungen miteinander verkettet werden. Lose Verkettung bedeutet, dass die Weitergabe des zu montierenden Werkstückes zeitasynchron, also nicht taktgebunden ist. Die starre Verkettung kommt einer zeitsynchronen, also taktgebundenen Weitergabe gleich. Ein Beispiel wären Längstransferautomaten.

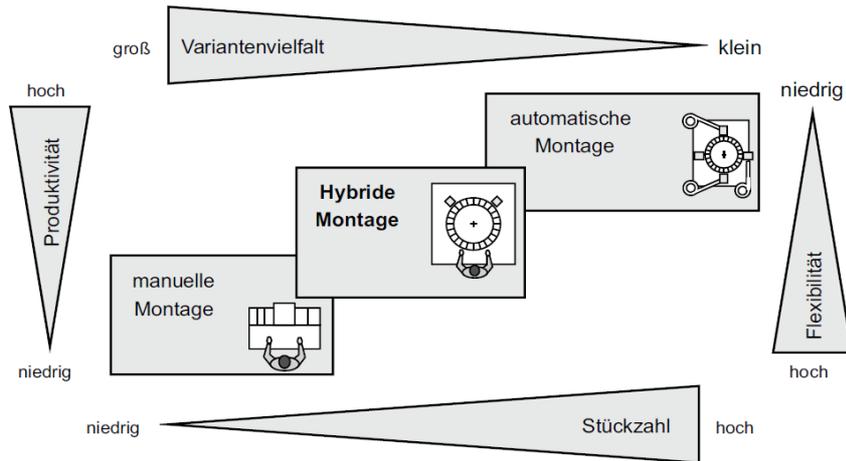


Abbildung 6 Charakteristiken von Montagesystemen (Lotter, 2004)

Je nach Anforderungen des Montagesystems und nach Eigenschaften des Werkstückes ist der Einsatz von Werkstückträgern erforderlich. Gründe sind z.B. instabile Auflageflächen des Arbeitsobjektes, dessen mögliche Beschädigung oder Verschmutzung verursacht durch die Weitergabe oder durch Aufstauen oder wenn es aufgrund seines Gewichtes nicht manuell weitergegeben werden kann. Der Werkstückträger bringt das Montageobjekt in eine bestimmte Position, die es auch bei einwirkenden Kräften, wie sie z.B. bei Eindrück- oder Schraubvorgängen auftreten, beibehält. Somit werden nicht wertschöpfende Handhabungszeiten vermindert und eine Automatisierung des Montagevorganges möglich gemacht (Konold und Reger, 2003; Lotter und Wiendahl, 2012).

2.2.1 Manuelle Montagesysteme

Entsprechend der Wortbedeutung „manuell“, was man mit „von Hand“ umschreiben könnte, werden in einem manuellen Montagesystem sämtliche Montagetätigkeiten von einem menschlichen Mitarbeiter unternommen. Der Mensch zeichnet sich durch seine Sinne, seinen motorischen Fähigkeiten und seine Intelligenz und Lernfähigkeit aus und kann eine Vielfalt an verschiedenen Montagevorgängen, u. a. durch den Einsatz von Hilfsmitteln wie Werkzeugen und Lehren, durchführen.

Für die Gestaltung eines manuellen Montagesystems sollten mehrere Aspekte berücksichtigt werden. Sie sind in Abb. 7 übersichtlich dargestellt.

Nachdem bei einem manuellen Montagesystem der Mensch zentral für den Erfolg der Montageaufgaben ist, ist besonderes Augenmerk auf seine Leistungsfähigkeit zu legen. Sie weicht im Laufe einer Schicht nach oben und unten von der Normleistung ab und ist zudem abhängig von mehreren Aspekten, wie z.B. der Arbeitsplatzgestaltung, dem Raumklima, der Raumgestaltung, dem Lärmpegel, dem Arbeitsklima und persönlichen Eigenschaften des Arbeiters (Lotter und Wiendahl, 2012).

Damit die Leistungsfähigkeit der Arbeiter langfristig und ohne gesundheitliche Folgeerscheinungen für den Mitarbeiter aufrechterhalten wird, müssen die Arbeitsplätze nach ergonomischen Grundsätzen gestaltet werden (Landau und Luczak, 2001), also auf die jeweiligen Körpermaße und Bewegungsumfänge der unterschiedlichen Mitar-

beiter anpassbar sein (Lotter und Wiendahl, 2012). Des Weiteren können so die Ermüdung der Arbeiter verlangsamt und die Ausschussquoten im Vergleich zu ungünstig gestalteten Arbeitsplätzen vermindert werden (Lotter, 1992).

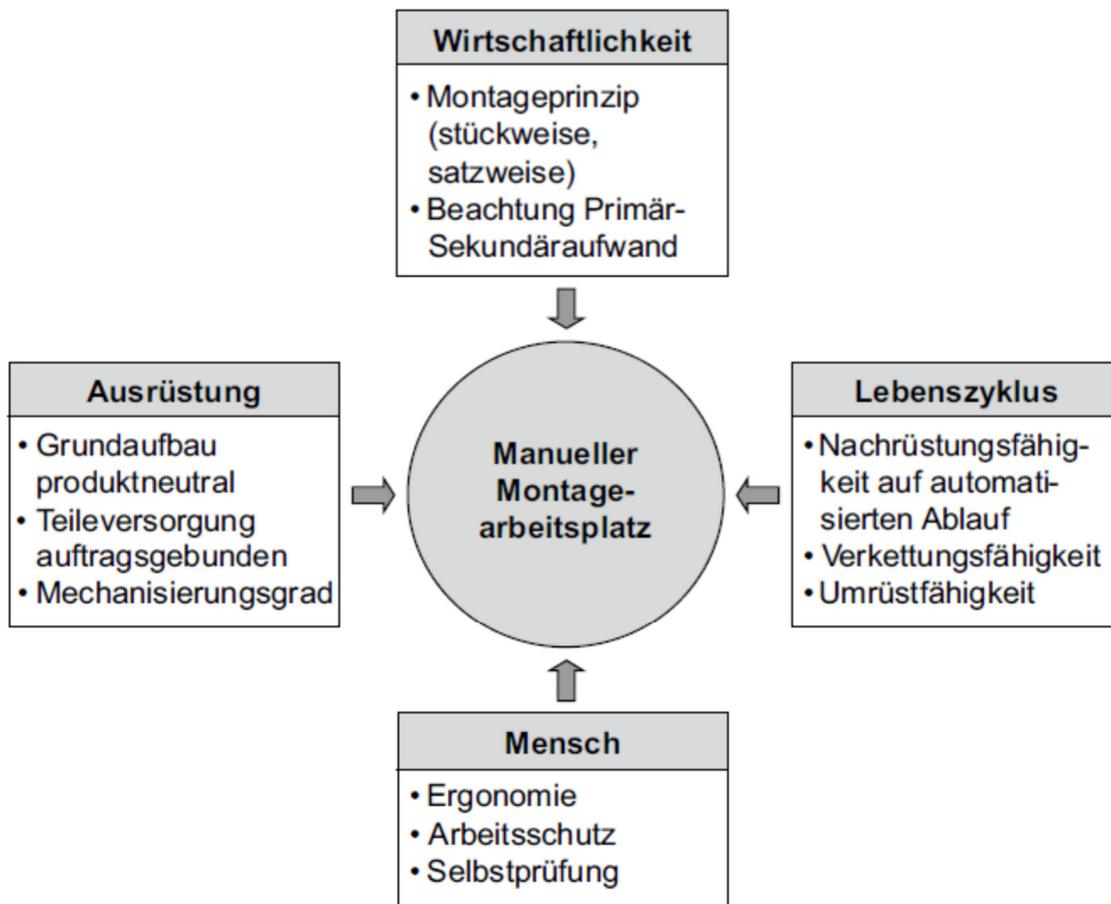


Abbildung 7 Zu berücksichtigende Aspekte bei der Gestaltung eines manuellen Montagesystems (Lotter und Wiendahl, 2012)

Bezogen auf die Arbeitsplatzausrüstung sind geeignete mechanische Hilfsmittel vorzusehen, vor allem bei Vorgängen, die wichtig für die Qualität des Endproduktes sind (z.B. Schrauben festziehen). Die Grundstruktur des Montagesystems ist möglichst produktneutral auszuführen und die Materialbereitstellung ist aufgrund der steigenden Anzahl an Einzelteilen sowie der steigenden Komplexität der Produkte zu fokussieren.

Im Hinblick auf Änderungen der Produktnachfrage bezüglich Mengen und Varianten während des Produktlebenszyklus sollte man sich wappnen, indem man sich die Möglichkeit zur stufenweisen Aufrüstung und Automatisierung der Arbeitsstationen vorbehält, einhergehend mit der Möglichkeit zur Verkettung und Umrüstung derselben.

Besonders wichtig für den Erfolg ist die Wirtschaftlichkeit des einzurichtenden Systems, die durch das angewandte Montageablaufprinzip und der Menge gleicher Erzeugnisse am Arbeitsplatz beeinflusst wird. Es kann entweder stückweise oder satzweise montiert werden. Bei der *stückweisen Montage* montiert der Arbeiter Schritt für Schritt ein Produkt eines Loses und fährt mit der Montage des nächsten Produktes erst dann fort, wenn er alle Montagetätigkeiten am vorherigen Produkt abgeschlossen hat. Bei der *satzweisen Montage* wird an einem Arbeitsplatz ein vorbestimmter Satz identischer Produkte aufgelegt, um sodann den ersten Montagevorgang an allen bereitgestellten

Produkten auszuführen. Erst danach kann der nächste Montageschritt angegangen werden. Die Entscheidung, welches Montageablaufprinzip wirtschaftlicher ist, hängt vor allem von der Grundfläche und Größe eines Produktes und dessen Produktionsvolumen ab (Lotter und Wiendahl, 2012).

Durch das Ausmachen und Eliminieren von Verschwendung mit Hilfe der Primär-Sekundär-Analyse (PSA) kann die Wirtschaftlichkeit eines Montagesystems quantifiziert und verbessert werden (Lotter, 1992; Lotter und Wiendahl, 2012; Lotter et al., 1998). Man unterscheidet zwischen Primärvorgängen (PV) und Sekundärvorgängen (SV). Primärvorgänge umfassen alle wertschöpfenden Tätigkeiten, die zum Fortschritt der Montage beitragen (z.B. Fügen, Schrauben, Bearbeiten). Sekundärvorgänge umfassen alle nicht wertschöpfenden Tätigkeiten, die nicht zum Fortschritt der Montage beitragen, aber notwendig sind (z.B. Zwischenlagern, Transportieren, Wenden, Ablegen, Gehen). Um den wirtschaftlichen Wirkungsgrad W_M der Montage zu errechnen, setzt man die Summe der Zeiten aller Primärvorgänge mit der Summe der Zeiten aller Primär- und Sekundärvorgänge ins Verhältnis:

$$W_M = \frac{\sum PV}{\sum PV + \sum SV} \cdot 100 [\%]$$

Das optimale Ergebnis erzielt man durch die Minimierung der nicht wertschöpfenden Sekundärvorgänge (Holle, 2002; Konold und Reger, 2003; Lotter und Wiendahl, 2012).

2.2.2 Teilautomatisierte (hybride) Montagesysteme

Durch die Kombination von manuellen und automatisierten Arbeitsstationen erhält man teilautomatisierte, hybride Montagesysteme. Dabei wird versucht, die jeweiligen Vorteile und Stärken der zusammen eingesetzten manuellen und automatisierten Arbeitsstationen dermaßen einzusetzen, um die maximale Leistung aus dem Gesamtsystem herauszuholen.

Die automatisierten Montageanlagen laufen beispielsweise kontinuierlich und unterliegen keinen Ermüdungs- und Erschöpfungsphänomenen. Sie sind ideal dafür geeignet, einfache, repetitive oder monotone Montageabläufe mit hoher Produktivität und Präzision auszuführen. Allerdings schränkt ein teils hoher Programmier- und Einrichtungsaufwand sowie limitierte Möglichkeiten zur Handhabung komplexer Einzelteile ihre Flexibilität stark ein (Krüger et al., 2009; Hesse und Malisa, 2010; Lotter und Wiendahl, 2012).

Die menschlichen Mitarbeiter hingegen zeichnen sich durch ihre Feinmotorik aus, die ihnen die Ausführung von schwierigen Montage- und Handhabungsvorgängen ermöglicht, sowie durch ihre Intelligenz und Lern- bzw. Anpassungsfähigkeit an sich verändernde Umstände und Aufgaben. Bezogen auf die aufbringbare Kraft, Präzision und Schnelligkeit können sie jedoch nicht mit den Maschinen mithalten (Hesse und Seitz, 1996; Krüger et al., 2009).

Daneben ist die auszuführende Montageaufgabe ein ausschlaggebender Faktor dafür, einen angemessenen bzw. optimalen Automatisierungsgrad des hybriden Montagesystems zu finden (Lotter und Wiendahl, 2012).

Seit mehr als 20 Jahren macht man sich in der Industrie hybride Montagesysteme zunutze, bei denen man die sequentiell aufgeteilten Montageaufgaben entweder automatisierten oder manuellen Arbeitseinheiten möglichst so zuweist, dass ihre jeweiligen Stärken ausgeschöpft werden, also eine Synergie entsteht. Am Anfang der Montagelinie, also „Upstream“, vollführen Roboter und andere Automaten die relativ einfachen Standardmontagevorgänge und an ihrem Ende, also „Downstream“, arbeiten menschliche Arbeiter komplexere, variable Montagevorgänge ab (Lien und Rasch, 2001; Bley et al., 2004).

Die hybride Montage ist besonders für den rationellen und wirtschaftlich sinnvollen Zusammenbau von Kleingeräten geeignet. Zudem stellen kleine Losgrößen und zahlreiche Varianten der Produkte kein größeres Problem dar. Anfängliche Investitionen können niedrig gehalten werden, indem man das System so aufbaut, dass es im Nachhinein stufenweise nachgerüstet werden kann.

Im Zentrum der hybriden Montage sollte stets der Mensch stehen. Deshalb ist bei der Zusammenarbeit des Menschen mit den Montageautomaten und –maschinen sicherzustellen, den menschlichen Arbeitern einen adäquaten Arbeitsinhalt zu überlassen, wie etwa Überwachungstätigkeiten. Der Takt der Montageautomaten sollte die menschlichen Mitarbeiter weder unterfordern noch unter Stress setzen. Um dies zu verhindern, also die Taktbindung zu lockern oder zu unterbrechen, können Puffer oder Bypass-Systeme Anwendung finden (Lotter und Wiendahl, 2012). Es gibt mehrere Arten von hybriden Montagesystemen. Einteilen kann man sie entsprechend der auszuführenden Montageaufgabe und dem daraus folgenden Layout der eingesetzten manuellen und automatisierten Arbeitsstationen (in Anlehnung an: Lotter et al., 1998; Lotter und Wiendahl, 2012):

Räumlich gesehen kann man die Arbeitsstationen als Karree, als Linie, in U-Form oder in kombinierten oder anderen Sonderformen (z.B. Kreis, Oval, T-Form) anordnen.

Die zeitliche Abhängigkeit von Mensch und Maschine ist, im Gegensatz zu manuellen und automatisierten Systemen, ein grundlegendes Kennzeichen der hybriden Montage. Entweder wird mit oder ohne Taktzwang gearbeitet, wobei Puffer- oder Bypass-Systeme zwischen den Handarbeitsplätzen und Automaten die Zeitkopplung eliminiert oder zumindest abschwächt. Dabei gibt der Mitarbeiter das zu halbfertige Produkt manuell und ungetaktet weiter.

Die Art der Verkettung der Arbeitsstationen kann starr, wie z.B. bei einem Montageautomaten, oder lose sein, wie z.B. bei einem modularen System. Letztere sind also flexibel umbaubar und können einfach verändert und angepasst werden, sollten sich etwa die nachgefragten Mengen oder technische Details des herzustellenden Produktes ändern sollten. Dazu müssen einfach standardisierte Komponenten des modularen Systems, wie manuelle Arbeitsplätze oder Automatikzellen, eingeschoben, verschoben oder ausgetauscht werden.

Zudem können beim Einsatz eines modularen Systems mit produktneutralen Systemkomponenten viele davon nach Ende des Lebenszyklus des Produktes für andere Zwecke wiederverwendet werden.

Der Vorgang des Umrüstens, der bei einem Wechsel von einer Produktart oder Produktvariante auf die nächste vorzunehmen ist, kann in manueller oder automatisierter Weise erfolgen.

Bezüglich der Montageablaufprinzipien können sowohl die stückweise als auch die satzweise Montage zum Einsatz kommen und je nach Wahl werden dabei die Produktivität und die Rentabilität des Montagesystems entscheidend beeinflusst. Grundsätzlich trägt die satzweise Montage zur Verringerung der Sekundärvorgänge bei, was sie gegenüber der stückweisen Montage häufig günstiger macht.

Des Weiteren erhält man eine hohe Stückzahlflexibilität, wenn man die Anzahl manueller Arbeitsplätze bei der hybriden Montage geschickt plant. Durch Variation der manuellen Arbeiter verändert sich proportional dazu auch die Systemausbringung, was eine flexible Reaktion auf Stückzahlschwankungen und eine je nach Auftrag anpassbare Anlagenleistung möglich macht.

Nicht zuletzt kann der anfängliche Automatisierungsgrad eines hybriden Montagesystems im Laufe seiner Nutzungsdauer stufenweise erhöht werden, um sich auf einen Anstieg der Nachfrage am Markt anpassen zu können. Ist das Leistungspotential einer Stufe vollkommen erschöpft, dann kann man bei gegebenen Marktumständen die nächste Automatisierungsstufe verwirklichen. Somit wird das Risiko von Fehlinvestitionen vermindert, insbesondere am Anfang der Produktion eines Produktes und dessen Markteinführung (Lotter und Wiendahl, 2012).

2.2.3 Vollautomatisierte Montagesysteme

Vollautomatisierte Montagesysteme finden seit 1950 in nennenswertem Ausmaß Einsatz zur Massenfertigung von bestimmten Produkten. Die dafür notwendige Technik ist bis heute stetig weiterentwickelt worden, wobei man sich vor allem Montageautomaten und Sondermaschinen bedient, die speziell für bestimmte Produkte entwickelt bzw. adaptiert wurden und bei denen sämtliche Montagevorgänge automatisiert ablaufen, also ohne manuelle Montagetätigkeiten. Das anwesende Personal übernimmt nur noch überwachende und steuernde Aufgaben, sowie das Wiederauffüllen der Materialbereitstellungseinheiten und die Störungsbehebung (Lotter und Wiendahl, 2012).

Grundsätzlich sind Montageautomaten also Einzweckmaschinen. Um mehr Flexibilität zu erreichen, müssen (Montage-)Roboter eingesetzt werden, die in ihren Bewegungen innerhalb ihres Bewegungsbereiches frei programmierbar sind und mit unterschiedlichsten Endeffektoren, also Arbeitsorganen (Wirkorganen) wie Werkzeugen und Greifern, ausgestattet werden können. Das macht einen erneuten Einsatz bzw. die Umrüstung der Anlagen mit diesen integrierten Maschinen zur Erledigung anderer Aufgaben möglich (in Anlehnung an: Bartenschlager et al., 1998; Hesse und Malisa, 2010; Lotter und Wiendahl, 2012).

Im Laufe der Zeit haben modulare Strukturen als Basis von vollautomatisierten Montagesystemen durchgesetzt, die sich in der Praxis bewährt haben. Dabei können einzelne Baukastenkomponenten und Teilsysteme miteinander kombiniert und fördertechnisch zu einer kompletten Montageanlage verbunden werden. Je nach Art und Eigenschaften des herzustellenden Produktes und den damit einhergehenden Produktionsumständen und Rahmenbedingungen haben sich unterschiedliche Grundbauformen von vollautomatisierten Montagesystemen durchgesetzt.

Bei der Automatisierung von Montageaufgaben sind die Schwierigkeit der durchzuführenden Handhabungstätigkeiten und der Fügevorgänge maßgebend für den Komple-

xitätsgrad der gesamten Automatisierungsaufgabe. Darunter fallen etwa die Zugänglichkeit des Fügeortes, ein potenzielles Verkeilen von Einzelteilen, die Steifheit des Werkstückes und das Fixieren und Sichern der Einzelteile während der Ausführung der Montagevorgänge. Z.B. erschweren nicht formstabile, biegeschlaffe Teile die Automatisierung einer Montageaufgabe enorm, da dafür eigene Vorrichtungen herangeschafft werden müssen.

Betrachtet man nun die verschiedenen Verbindungsverfahren und ordnet sie ohne Berücksichtigung speziell angefertigter Hilfswerkzeuge nach ihrer Automatisierbarkeit von leicht bis schwer, so erhält man folgende Reihenfolge: Ineinanderschieben, Einlegen, Pressen, Schnappen, Lappen, Schrumpfen, Schweißen, Nieten, Schrauben, Einrenken, Falzen, Löten, Kleben. Kommt ein Verfahren mit einer simplen Hauptbewegung aus, so befindet es sich weiter vorne in der Liste.

Zusätzlich zu den technischen Aspekten der Automatisierung sind besonders auch die erforderlichen Zeitdauern der automatisierten Montagevorgänge, deren Zuverlässigkeit, Genauigkeit und nicht zuletzt die entstehenden Kosten ausschlaggebend.

Bei der Organisationsform einer vollautomatisierten Montage sind die räumliche Anordnung und der Verlauf der Hauptförderrichtung, die zeitliche Bindung des Materialflusses, das Ausmaß und die Art der Arbeitsteilung sowie der kinematische Zustand des Montageobjektes als grundlegende Unterscheidungsmerkmale zu benennen.

Vorausgesetzt man teilt die Montageaufgabe auf mehrere Stationen auf, so kann man diese räumlich gesehen in offene und geschlossene Grundformen aufteilen. Ein Transfer- bzw. Fördersystem stellt dabei die materialflusstechnische Verbindung zwischen den einzelnen Stationen her. Offene Grundformen können beispielsweise linienartig verkettet sein oder dem Aussehen eines Fiskskeletts folgen, bei dem vormontierte Einheiten an den Verbindungsknoten in die Endmontage einlaufen. Während diese vor allem für die Montage von Großgeräten und ohne Werkstückträger eingesetzt werden, werden geschlossene Grundformen typischerweise mit Werkstückträgern eingesetzt, da diese das Montagesystem in einem Kreislauf durchlaufen.

In Bezug auf die zeitliche Bindung miteinander verketteter Montagestationen unterscheidet man die Reihenverkettung, die Parallelverkettung und die Reihen-Parallel-Verkettung als gemischte Varianten der ersten beiden. Bei der Reihenverkettung sind die einzelnen Arbeitsstationen seriell nacheinander angeordnet und demnach erfolgt die Montage am Erzeugnis selbst in den Arbeitsstationen parallel zueinander angeordnet, wobei derselbe Arbeitsinhalt an allen parallel liegenden Arbeitsstationen abgearbeitet wird. Somit wird der Durchsatz erhöht. Bei der gemischten Reihen-Parallel-Verkettung können die Taktzeiten angepasst werden, indem in Serie verkettete und parallel verkettete Stationen in Kombination eingesetzt werden. Somit können beispielsweise schnell zuströmende Basisteile auf einige parallel verkettete Arbeitsstationen mit langsamerer Taktzeit aufgeteilt werden. Diese Formen der Verkettung sind in Abb. 8 noch einmal veranschaulicht.

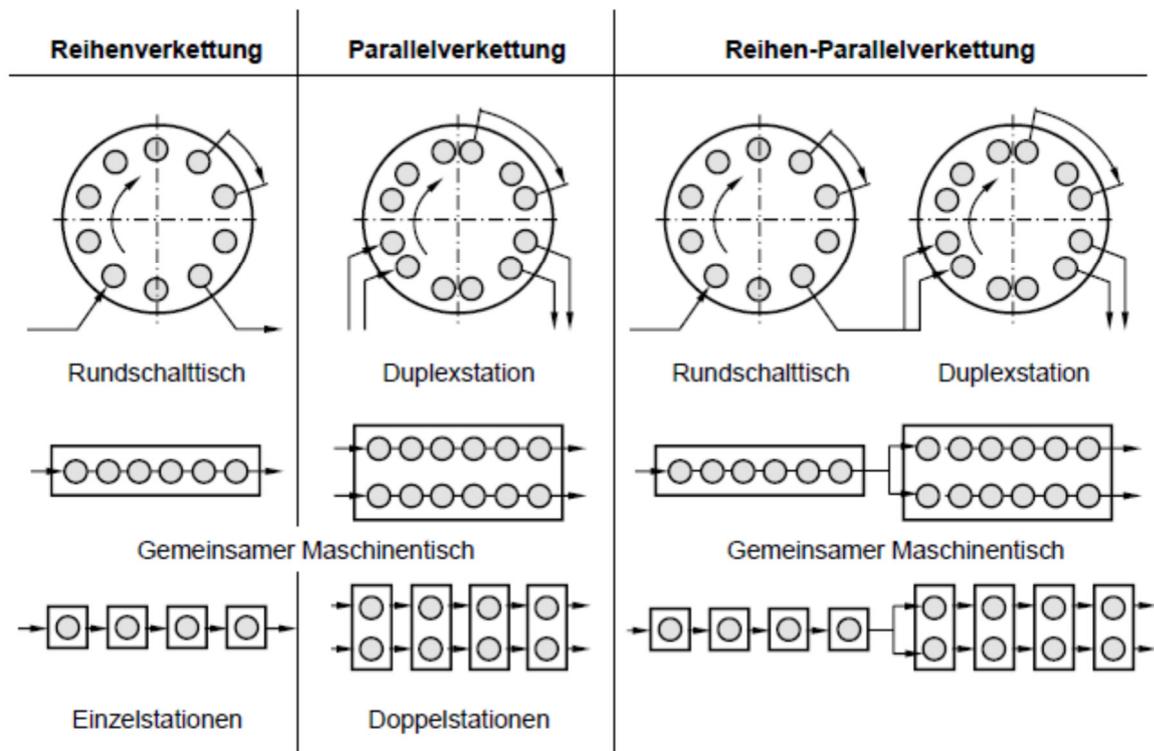


Abbildung 8 Arten der Verketzung von mehreren Arbeitsstationen (Lotter und Wiendahl, 2012)

Die Bauformen der vollautomatisierten Montageanlagen können nach unterschiedlichen Kriterien eingeteilt werden. In Abb. 9 etwa unterscheidet man zwischen Einstationen- und Mehrstationen-Maschinen und bei Letzteren noch nach synchroner, asynchroner, getakteter und kontinuierlicher zeitlicher Bindung der einzelnen verketteten Stationen.

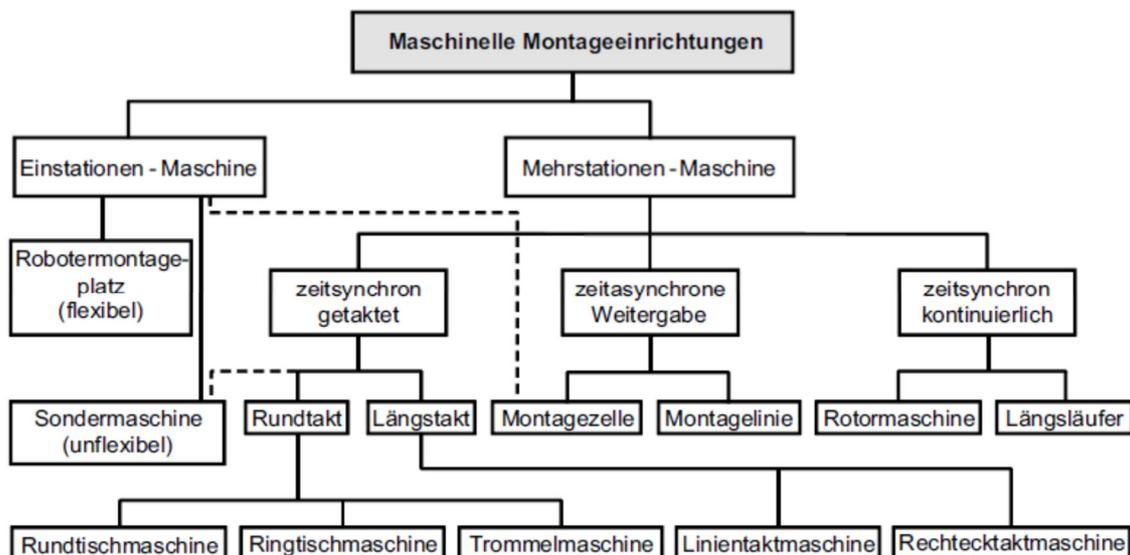


Abbildung 9 Einteilung der maschinellen Montageeinrichtungen (Hesse, 2010)

Die Baueinheiten von Montageautomaten kann man danach einteilen, ob sie Grund-, Haupt- oder Hilfsfunktionen erfüllen. Zu den Grundeinheiten zählen grundsätzlich Konsolen, Platten und Gestelle. Sie bilden die Basis, auf der sämtliche Arbeitseinheiten und

Antriebe befestigt werden können. Zu den Haupteinheiten zählen Bewegungs- und Arbeitsmodule (z.B. Schraubeinheiten), die direkt dazu dienen, einen Prozess zu ermöglichen. Je nach Montageaufgabe werden andere Haupteinheiten benötigt. Hilfs- und Zusatzeinheiten unterliegen steuernde, überwachende und kontrollierende Funktionen sowie Funktionen der Materialbereitstellung.

2.3 Mensch-Maschine Kollaboration in der Montage

In hybriden Montagesystemen werden sowohl manuelle als auch automatisierte Arbeitsstationen in Kombination eingesetzt. Die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Bereich der Robotik haben Robotersysteme hervorgebracht, die in unmittelbarer Nähe zum Menschen ohne trennende Schutzvorrichtungen arbeiten, kooperieren und interagieren. Diese vergleichsweise neuen technischen Lösungen, die sog. Assistenzroboter, Cobots und/oder Leichtbauroboter, haben ihren Ursprung im zunehmenden Einsatz von maschineller Intelligenz auf einfache Handhabungseinrichtungen (Lotter und Wiendahl, 2012, Steil und Maier, 2020).

2.3.1 Technologien zur Mensch-Maschine Kollaboration in der Montage

Ein *Assistenzroboter* kann ortsfest oder mobil sein und assistiert seinen menschlichen Mitarbeitern bei Fertigungs- oder Montageaufgaben ohne zwischengeschaltete, trennende Schutzeinrichtungen. Realisiert wird die enge Zusammenarbeit durch eine ausgeklügelte Sensorik und Aktorik sowie in den Roboter integrierten Datenverarbeitungssystemen (Hesse und Malisa, 2010).

Die Programmierung solcher Roboter ist relativ einfach gehalten. Man kann sie z.B. durch simples Vorzeigen anlernen ("Teachen"), indem man sie per Hand an die gewünschten Raumpunkte führt und diese dann in einem Bewegungsprogramm abspeichert. Die Forschung arbeitet zurzeit an neuen Anlernverfahren, die sich der Gestik oder der natürlichen Sprache des Menschen bedienen (Ionescu und Schlund, 2021).

Werden Assistenzroboter auf autonome, mobile Fahrgestelle montiert, vergrößert sich ihr Arbeitsraum und sie können dadurch beispielsweise Transport-, Belade- und Entladeaufgaben ausführen (Bejarano et al., 2019).

Kollaborierende Roboter, kurz „Cobots“ (vom Englischen collaborative robot), sind intelligente Manipulatoren, die mit ihren menschlichen Kollegen eng kollaborieren und interagieren, indem sie von ihnen, u.a. auf bestimmten Raumbahnen, geführt werden können und die Bewegung durch zusätzliche Kraft aus Servomotoren unterstützt wird. Außerdem können virtuelle Wände und Schranken definiert werden, um den Bewegungsraum des Systems einzuschränken und somit die Sicherheit zu erhöhen (Hesse und Malisa, 2010; Kirgis et al., 2016).

Der ursprüngliche Gedanke zur Entwicklung von Cobots war die ergonomische Aufwertung von klassischen Handhabungseinrichtungen und -vorgängen (Hesse und Malisa, 2010). Ein einfacher Balancer kompensiert beispielsweise keine Trägheitskräfte. Kleinste Anwendungsfehler können für die Bediener gesundheitliche Schäden und Verletzungen, z.B. am Rückgrat, zur Folge haben (Zaeh und Prasch, 2007). Erste Produkte

in diese Richtung stellte beispielsweise die Firma Cobotics vor. Ihre „Intelligent Assist Systems“ (IAS) oder „Intelligent Automation Devices“ (IAD) sind in der Lage, durch entsprechende Kraftunterstützung die auf ihren Bediener wirkenden Trägheitskräfte auf weniger als ein Zehntel zu reduzieren (Colgate et al., 1996; Akella et al., 1998). Ein anderes Produkt mit einem ähnlichen Zweck ist das von Fraunhofer IPK geschaffene „Power Amplifying Assist System“ (IPAD) (Krüger et al., 2006).

Cobots schließen also die Technisierungslücke zwischen Robotern und einfachen Manipulatoren. Sie bieten sowohl die Genauigkeit, Leistung und kontrollierte Bahnbewegungen von Industrierobotern als auch die simple Arbeitsweise von passiven Manipulatoren. Hinzu kommt die Intelligenz, Feinmotorik, Erfahrung und Lernfähigkeit der menschlichen Bedienpersonen (Krüger et al., 2006; Hesse und Malisa, 2010). Heute gibt es eine Vielzahl an Anbietern von kollaborativen Robotern wie bspw. Universal Robots, Kuka, Franka Emica oder Aubo.

Leichtbauroboter, also Roboter mit entsprechenden Leichtbaustrukturen, stellen einen aktuellen Trend in der Roboterindustrie dar. Aufgrund mehrerer positiver Eigenschaften, wie z.B. hohe Kosteneffizienz und Flexibilität, können sie nicht nur von großen Unternehmen, sondern auch von KMUs (kleinen und mittleren Unternehmen) wirtschaftlich eingesetzt werden und bilden somit eine ernstzunehmende Konkurrenz für herkömmliche Industrieroboter. Außerdem zeichnen sie sich durch ihre Kompaktheit, Schnelligkeit, Bedienerfreundlichkeit und Sicherheit in der engen Kollaboration mit menschlichen Mitarbeitern aus (Frutig, 2013). Besonders die letzte genannte Eigenschaft lässt sie im Hinblick auf die immer enger werdende Zusammenarbeit mit dem Menschen an Wichtigkeit gewinnen (Bauer et al., 2016).

Obwohl es noch keine klare Definition von Leichtbaurobotern gibt, so müssen laut Frutig (2013) einige charakteristische Merkmale erfüllt sein, um von Leichtbaurobotern sprechen zu können. Ihr Gewicht sollte 30 Kilogramm nicht überschreiten, damit ein Mitarbeiter völlig ausreicht, um ihre Position zu verändern und sie neu zu installieren. Ihre Bedienung, Steuerung und Programmierung sollten einfach durchführbar sein und durch übersichtliche Bedienoberflächen und Touchscreens, wie sie z.B. auf Smartphones oder Tablets zu finden sind, unterstützt werden. Außerdem sollte die Möglichkeit zum einfachen „Teachen“, also dem manuellen Führen des Roboters zu den gewünschten Raumpunkten und dem Abspeichern derselben, gegeben sein. Zu guter Letzt sollten die Systeme mit der Norm EN ISO 10218-1 konform und mit Sicherheitstechnik ausgestattet sein, die eine eventuelle Kollaboration mit menschlichen Mitarbeitern ohne trennende Schutzeinrichtungen wahr werden lässt. Dazu zählen etwa adaptive Sensoren und eine Echtzeit-Kollisionskontrolle.

Das „Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik“ (DLR) hat beispielsweise erste humanoide Roboterarme in Leichtbauausführung konstruiert, die der Kinematik eines menschlichen Arms sehr nahe kommen. Diese Manipulatoren punkten im Vergleich zu den traditionellen Industrierobotern mit ihren sieben Freiheitsgraden (DOF – Degrees of Freedom), mit unzähligen Sensoren und Aktuatoren, die die Sicherheit bei der Kollaboration bzw. Interaktion mit dem Menschen gewährleisten sollen, einem Last zu Gewicht Verhältnis von Eins zu Eins und einem Eigengewicht von weniger als 15 Kilogramm. Ihr Arbeitsraum erstreckt sich über einen Bereich von bis zu eineinhalb Metern, sämtliche Kabel sind intern im Gehäuse verlegt und sie können auch in der Industrie eingesetzt werden. Konventionelle Industrieroboter haben hingegen ein Verhältnis von

Last zu Gewicht von Eins zu Zehn oder weniger und sind auf einen Elektronikschaltkasten sowie externe Verkabelung angewiesen (Steil, 2020).

Um bei einer engen Kollaboration zwischen Mensch und Maschine bei der Montage den direkten physischen Kontakt des Montagemitarbeiters mit dem Montageobjekt ersetzen zu können, hat man sogenannte „Admittance-Displays“ entwickelt. Sie sind mit entsprechenden Krafrückmeldungen ausgestattet, die die Aufgabe haben, die Kontaktwiderstände des Roboters mit dem Montageobjekt fühlbar auf den Montagemitarbeiter übertragen (Krüger et al., 2006).

2.3.2 Anwendungsmöglichkeiten in hybriden Montagesystemen

Bei einer engen Kollaboration von Mensch und Roboter in hybriden Montagesystemen kann man je nach der Art der vorliegenden Interaktion fünf verschiedenen Systemvarianten (Abb. 10) unterscheiden: Zelle, Koexistenz, Synchronisiert, Kooperation und Kollaboration. (Bauer, 2016)

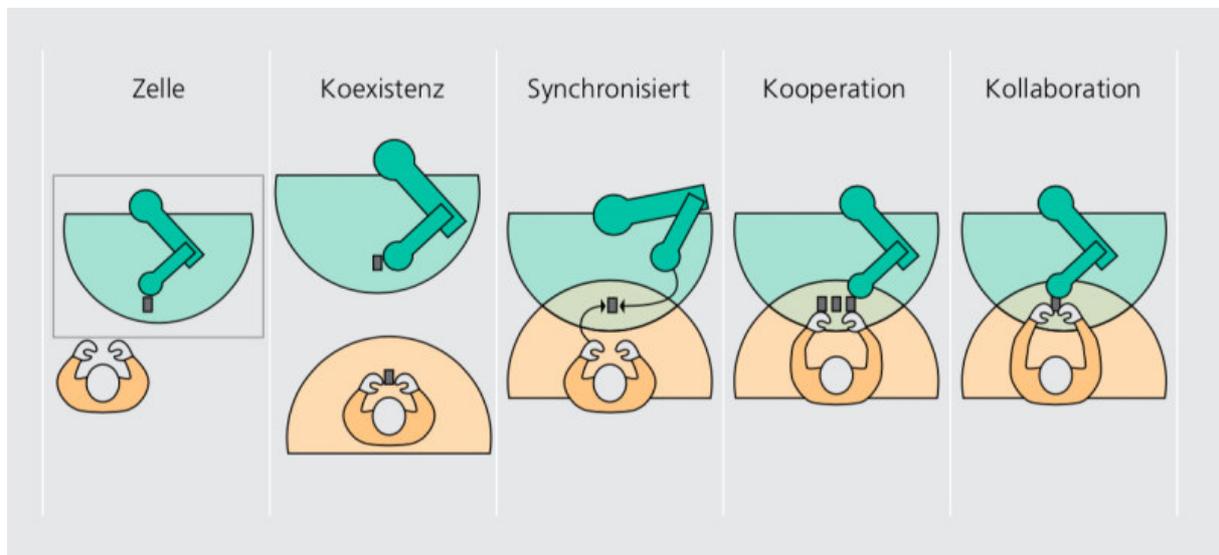


Abbildung 10 Formen der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter (Bauer, 2016)

Bei den ersten beiden Systemen handelt es sich nicht um kollaborative Interaktionen im eigentlichen Sinn. Als Zelle wird die klassische physische Abtrennung durch Schutzgitter bezeichnet. Das Koexistenz-System kann auf diese Gitter verzichten, benötigt aber optische Sensoren und einen genormten Sicherheitsabstand, um den Roboter bei Annäherung des Werkers stoppen zu können.

Bei der Synchronisierten Montage teilen sich Mensch und Roboter zwar den Arbeitsraum, beanspruchen ihn jedoch nie zum selben Zeitpunkt.

Bei der Kooperativen Montage befinden sich Mensch und Roboter zeitgleich im gemeinsamen Arbeitsraum, arbeiten jedoch nicht am selben Werkstück.

Bei der kollaborativen Montage arbeiten Mensch und Roboter zeitgleich am selben Werkstück. (Bauer, 2016)



Abbildung 11 Kooperative Montage einer Armauflage

Abbildung 11 zeigt die kooperative Montage einer Armauflage eines Opel Insignas. Der KUKA iiwa teilt sich den Arbeitsraum mit zwei Werkern und übernimmt deren Verschraubungsaufgaben. Hierbei wird niemals am selben Werkstück gearbeitet, die Verschraubung bildet einen eignen Prozessschritt und Arbeitsstation. Besonderes Augenmerk ist hierbei auf die zusätzliche Schutzvorrichtung am Roboterkopf zu legen. Da 13kg schwere Lasten auf Kopfhöhe des Werkers bewegt werden, sind die werksseitig vorgesehenen Sicherheitsvorrichtungen nicht mehr ausreichend. (KUKA, 2019)



Abbildung 12 Kollaborative Montage eines Doppelkupplungsgetriebes

Abbildung 12 zeigt die kollaborative Montage eines Doppelkupplungsgetriebes in der Industriehalle eines bekannten Automobilherstellers. Aufgrund der breiten Produktpalette ist eine automatisierte Montage nicht wirtschaftlich, eine manuelle dagegen aufgrund schwerer Einzelteile aus ergonomischer Sicht nicht vertretbar. Der KUKA iwaa dient im Assistenzmodus als Manipulator und erleichtert das Fügen durch orthogonale Orientierung. Bei Produkten mit höherer Stückzahl kann der Großteil der Montage vom Roboter übernommen werden, wodurch der Werker an mehreren Montagestationen gleichzeitig arbeiten kann. Dies garantiert die begünstigt eine bessere Auslastung des Werkers.

Abschließend kann gesagt werden, dass die kollaborierenden Roboter dem Werker bei der Ausführung der Arbeit als leistungsfähiges Werkzeug dienen sollten. Keineswegs aber sollte der Mensch aus dem Zentrum der Aufmerksamkeit verschwinden und der Automatisierung untergeordnet werden (Steil, 2020).

2.3.3 Sicherheitsaspekte der Mensch-Maschine-Kollaboration

Die Mensch-Maschine-Kollaboration ist Gegenstand immer neuer Entwicklungen, die Intensität der Zusammenarbeit nimmt ständig zu, es wird an gemeinsamen Arbeitsplätzen gearbeitet und der physische Kontakt zwischen Menschen und Robotern bei kollaborativen Tätigkeiten kann nicht ausgeschlossen werden. Alle diese Phänomene haben neue Anforderungen an die Sicherheit, sowohl und vor allem der Menschen, aber auch die der Roboter, zur Folge (Krüger et al., 2009; DIN ISO/TS 15066, 2016).

Konventionelle Roboterzellen wurden durch aufwändige Sicherheitseinrichtungen, wie z.B. Schutzzäune oder Schutzkäfige, von ihrem Umfeld abgeschirmt. Mit der Weiterentwicklung der Technik hin zu einer möglichen Kollaboration zwischen Mensch und Roboter bemühte man sich zunehmend auch um die Erarbeitung von neuen Sicherheitskonzepten. In den Normen EN ISO 10218-1: 2007 „Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen“ wurde dann erstmals die Zusammenarbeit von Menschen und Robotern ohne trennende Schutzvorrichtungen behandelt. Davor war die Sicherheitstechnik noch nicht so weit, um solch eine enge Art der Zusammenarbeit zu ermöglichen (Oberer und Schraft, 2007; Hesse und Malisa, 2010).

Zu den anwendbaren Sicherheitskontrollsystemen zählen (a) Pre-Kollisionssysteme und (b) Post-Kollisionssysteme (Galín, 2019):

Zu (a) *Pre-Kollisionssysteme* sind Systeme, die den Arbeitsbereich des Roboters durch den Einsatz von externen Sicherheitssensoren kontrollieren. Begibt sich der Mitarbeiter in die überwachte Zone, so verlangsamt der Roboter sofort seine Bewegungsgeschwindigkeit auf ein sicherheitstechnisch akzeptables Level oder er stoppt gegebenenfalls auch. Zur Arbeitszone des Roboters haben allgemein nur autorisierte Mitarbeiter Zutrittsrechte. Bei der eingesetzten Sicherheitssensorik dreht es sich vor allem um optische Systeme. Dazu zählen etwa Laserscanner oder 3D-Kameraüberwachungssysteme (Galín, 2019).

Zu (b) *Post-Kollisionssysteme* sind Systeme, bei denen die gesamte Sicherheitssensorik im Leichtbaugehäuse des Roboters untergebracht ist. Dies ermöglicht eine aktive und zugleich auch noch sichere Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter. Als Voraussetzungen liegen dieser Art von Sicherheitssystem die Entwicklung von neuartigen Kinematikstrukturen, die Verbesserung der Sensor- und Aktortechnik und der

Einsatz von leichten, aber dennoch sehr robusten Materialien zugrunde. Des Weiteren kann nicht nur mehr eine statische und eingegrenzte Zone sicherheitstechnisch überwacht werden, sondern der kontrollierte Bereich ist nunmehr dynamisch und veränderbar (Galín, 2019).

3 Digitale Modellierung der teilautomatisierten Montagelinie

Das folgende Kapitel behandelt die projektspezifische Anwendung der zuvor gesammelten theoretischen Grundlagen. Vorgegangen wird dabei grob nach dem 11-Schritte Modell von Lotter. Die Anforderungsliste kann hierbei übersprungen werden, da das Ziel der Produktionslinie nicht eine hohe Produktionsleistung ist, sondern didaktische Vorteile und Flexibilität der Anlage im Vordergrund stehen.

Begonnen wird mit einer Analyse des zu montierenden Produktes und der derzeitig manuellen Montage, um eine Ist-Situation zu definieren. Abgeschlossen wird dies mit einer klaren Aufgabenbeschreibung.

Darauf aufbauend wird ein Soll-Prozessablauf erarbeitet, welcher dann auf ein Layout übertragen wird. Anschließend werden die Aufgaben der Hardwarekomponenten im Prozessablauf spezifiziert.

Im dritten Unterkapitel wird die Vorgehensweise bei der Erstellung des digitalen Modells der Produktionslinie genauer beleuchtet.

3.1 Produkt- und Prozessanalyse

Für eine Aufnahme der Ist-Situation wurde zuerst das Produkt und der Prozess analysiert. Die allgemeine Beschreibung des Aufbaus und der Funktion des Produktes dient dabei zum besseren Verständnis des Montagevorgangs. Darauf folgt eine detailliertere Analyse der einzelnen Bestandteile und der Prozessschritte. Aufbauend darauf wird der Montagevorranggraph ausgearbeitet, welcher zur Herleitung des Montageablaufes dient. Am Ende werden noch die manuellen Montagezeiten analysiert und die Montageprozesse auf ihre Automatisierbarkeit geprüft.

3.1.1 Produktanalyse

Gegenstand der Analyse ist der doppelwirkende Pneumatikzylinder 2111A0050 der Firma Kuhnke. Im Gegensatz zu einfachwirkenden Zylindern, bei welchen die Rückstellung des Kolbens bzw. der Kolbenstange durch eine Schraubenfeder gewährleistet wird, kann ein doppelwirkender Zylinder von beiden Richtungen mit Druckluft versorgt werden, also in beide Richtungen arbeiten. Die beim Rückzug aufgebrachte Kraft ist jedoch stets niedriger als die beim Aushub, da die Kolbenstange die verfügbare Kolbenfläche verringert. Zu erwähnen sei noch die jeweils auslassseitige Durchlaufverzögerung, um einen ruckfreien Aushub zu garantieren.

Am nebenstehenden Schnittbild (Abb. 13) zeigt den Aufbau im zusammengestellten Zustand. Zu erwähnen sei die beidseitig vorhandene Endlagendämpfung. Diese sorgt für eine geschwindigkeitsabhängige Verzögerung des Kolbens, was sich vor allem bei hohem Druck und geringer Last positiv auf die Lebensdauer auswirkt, sowie die Geräuschemission vermindert. Das Prinzip ist das folgende: Der Kolbenvorsprung verschließt etwa 10mm vor Erreichen der Endposition den Hauptausfluss, wodurch sich vor drumherum ein verzögerndes Luftpolster aufbaut. Diese kann sich nur durch die wesentlich kleineren Bypass-Bohrungen im Zylinderboden abbauen. Der Luftdurchsatz, und dadurch die Dämpfrate, ist dabei durch eine Schraube einstellbar.

Der Zylinder wird produkttypisch in verschiedenen Längen und Durchmessern produziert. Im bestimmten Maße ist eine Baukastenstruktur zu erkennen. Interessant wäre hier die Verwendung von Kuhnke Zylindern mit verschiedenen Hublängen. Dabei verändern sich lediglich die Länge der Kolbenstange sowie die Höhe des Gehäuses.

Zur besseren Veranschaulichung der Einzelteile im Folgenden die Explosionszeichnung des Produktes, Abbildung 14, welche von der Firma Kuhnke zur Verfügung gestellt wurde:



Abbildung 13 Schnittbild des Kuhnke-Pneumatikzylinders

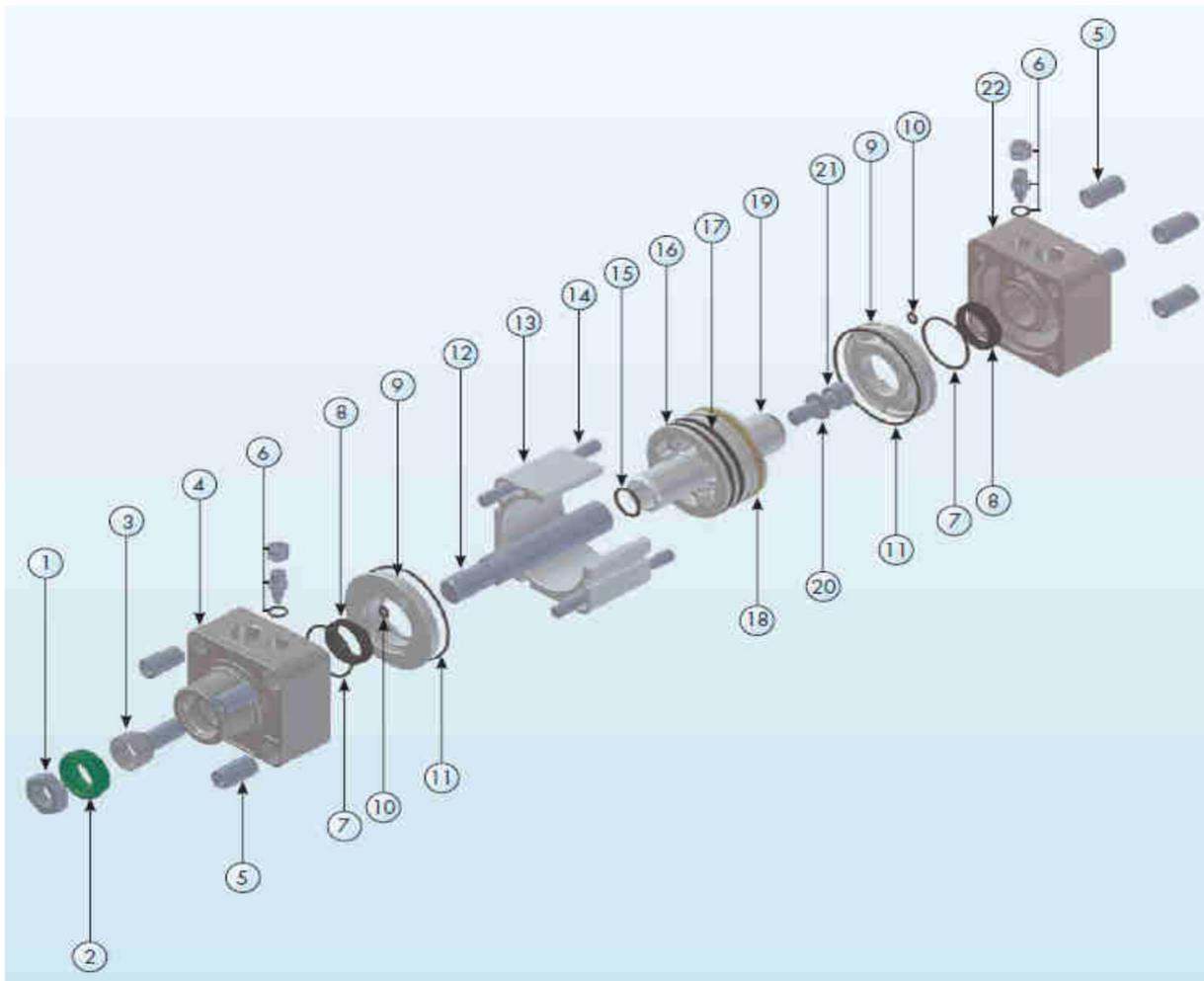


Abbildung 14 Explosionszeichnung des Kuhnke-Pneumatikzylinders (Quelle: Kuhnke)

Tabelle 1 zeigt eine Darstellung der verwendeten Bauteile. Zur Vereinfachung der Produktionssimulation wurden sieben der insgesamt 22 Bauteile fest mit der dazugehörigen Einheit verbunden. Dies wurde bereits bei Auslieferung der etwa 200 Zylinder beschlossen und durchgeführt, da vollständige Montage des Zylinders weder aus materialtechnischen Gründen möglich gewesen wäre noch einen signifikanten didaktischen Mehrwert generiert hätte.

Die letzte Spalte der Tabelle beschreibt die Formstabilität der Bauteile, da diese essenziell für die Automatisierbarkeit des Montagevorgangs ist.

Tabelle 1 Bezeichnung, Stückzahl und Material der Einzelteile

Nr.	Bezeichnung	Anz.	Material	Formstabil
1	Kolbenstangenmutter	1	Stahl	X
2	Kolbenstangendichtung	1	Gummi	
4	Zylinderdeckel vorne	1	Aluminium	X
5	Zugstangenmutter	4	Stahl	X
8	Dämpfungsdichtung	2	Kunststoff	
12	Kolbenstange	1	Stahl	X
13	Zylinderrohr	1	Aluminium	X

14	Zugstange	4	Stahl	X
15	O-Ring	1	Kunststoff	
16	Kolbendichtung	1	Kunststoff	
18	Führungsband Kolben	1	Kunststoff	
19	Kolben	1	Aluminium	X
20	Scheibe	1	Stahl	X
21	Befestigungsschraube Kolben	1	Stahl	X
22	Zylinderdeckel hinten	1	Aluminium	X

Detaillierte Analyse der Bauteile

- Kolbenstangenmutter: Bei der Kolbenstangenmutter handelt es sich um einer 6mm dicken M10 Sechskant-Stahlmutter, welche produkttypisch an beiden Seiten eine Fase aufweist und somit leichte Zentrierungsabweichungen in der Montage ausgleicht. Vereinzelnung und Handhabung gestaltet sich hier relativ einfach, da sich die Mutter normalerweise schon flach, also richtig orientiert, liegt. Der Montagevorgang erfordert simultane Bewegung in z-richtung sowie die Drehung der Mutter mit angepasster Drehzahl.
- Kolbenstangendichtung: Der grüne Kunststoffsimerring ist relativ formstabil, was die Vereinzelnung durch eine kameraunterstützte Greifzange möglich macht. Die Achsensymmetrie des Bauteiles vereinfacht zwar die Orientierung, doch muss die richtige Seite nach oben zeigen. Der darauffolgende Einpressvorgang erfordert sehr hohe Kräfte, welche von keinem der verfügbaren Roboter erreicht werden können.
- Zylinderdeckel vorne: Hierbei handelt es sich um ein Aluminiumussteil mit quadratischem Grundriss. Zu beachten ist hierbei, dass die Bohrungen des vorderen und hinteren Deckels gleich orientiert sind.
- Zugstangenmutter: Die vier Zugstangenmuttern besitzen aufgrund ihrer zylinderförmigen Geometrie und der Anzahl ein sehr hohes Automatisierungspotenzial. Problematisch könnte jedoch der Innensechskant werden, da er für die Positionierung nur geringe Winkelabweichungen zulässt.
- Dämpfungsdichtung: Die Dämpfungsdichtungen müssen aufgrund des komplizierten Einfädungsvorgangs von Hand montiert werden. Eine Automatisierung würde den Rahmen der Arbeit sprengen.
- Kolbenstange: Dieses zylindrische Bauteil besteht aus oberflächengehärteten, rundgeschliffenen Stahl. Einer Seite weist ein M10 Außengewinde, sowie zwei Einfräsungen auf, letztere können am Werkstückträger formschlüssig als Verdrehsicherung auf, letztere können am Werkstückträger formschlüssig als Verdrehsicherung genutzt werden.

- Zylinderrohr: Das Zylinderrohr ist ein Aluminium-Extrusionsteil mit quadratischer Grundfläche. Vorder- und Hinterseite können nur Anhand des Produktaufklebers unterschieden werden, eine verkehrte Montage würde sich also nicht auf die Funktionalität des Produktes auswirken.
- Zugstange: Die vier Zugstangen sind bereits an einer Seite mit jeweils einer Zugstangenmutter verklebt. Diese erleichtert das Handling, gegebenenfalls können so auch dieselben Spezialwerkzeuge verwendet werden, wie für die einzelnen Zugstangenmutter. Zu beachten ist, dass bei einigen die Mittelachse der Zugstangenmutter und die der Zugstange nicht deckungsgleich sind. Dies kann beim Einfügen Probleme geben.
- O-Ring: Hierbei handelt es sich um einen sehr dünnen Gummiring, welcher bereits bei manueller Montage für Komplikationen sorgt. Wird er nicht in optimaler Position auf die Zugstange gelegt, kann er verrutschen und sich beim Aufstülpen des Kolbens zwischen Kolben und Kolbenstange verklemmen. Darüber hinaus ist er nicht formstabil und daher für einen Roboter schwer zu greifen. Eine Automatisierung des Montageprozesses ist also nicht zu empfehlen.
- Führungsband: Auch hierbei handelt es sich um ein nicht formstabiles Bauteil. Die Montage muss parallel mit der Kolbeneinführung erfolgen, da sich das Führungsband nicht von selbst am Kolben halten kann.
- Kolben: Dieses Drehteil hat an einer Seite eine Passung, wo der Kolbenbolzen eingeschoben wird. Dieser Vorgang erfordert zwar hohe Präzision und Feingefühl, sollte jedoch auch mit einem Roboter machbar sein.
- Scheibe: Eine einfache Beilagscheibe, die Vereinzlung und Handhabung sollte auch für einen Roboter kein Problem darstellen. Problematisch ist eher das Einfädeln über die Schraube, da diese dann wiederum in die Kolbenstange geschraubt werden muss. Diese einzelnen Schritte müssen direkt nacheinander folgen.
- Befestigungsschraube Kolben: Eine handelsübliche M6 Inbus-Schraube. Die prozessrelevanten Eigenschaften sind hierbei dieselben wie für die Scheibe.
- Zylinderdeckel hinten: Wie auch beim vorderen Zylinderdeckel handelt es sich hierbei um einen Aluminiumgussteil mit quadratischem Grundriss, wobei auf die Positionierung der Bohrungen geachtet werden muss. Die in Zylinderrohr gerichtete Seite ist identisch mit der des vorderen Deckels.

3.1.2 Analyse der derzeit manuellen Montageprozesse

Nachdem die einzelnen Komponenten des Produktes auf ihre Fügesituation analysiert wurden, kann nach Lotter (2012) die Montageablaufanalyse erfolgen. Dafür wird der derzeitige manuelle Montageprozess analysiert, um die einzelnen Montageschritte herauszufiltern. Diese werden wiederum in einem Montagevorranggraph zusammengefasst, welcher möglichst akkurat alle durchführbaren Montagekonfigurationen darstellen sollte.

In der folgenden Liste werden die einzelnen Prozessschritte, 20 an der Zahl, zusammengefasst:

1. O-Ring auf Kolbenstange platzieren
2. Magnetring an Kolben anbringen
3. Kolbendichtung an Kolben anbringen
4. Kolben über den zuvor platzierten O-Ring schieben
5. Befestigungsschraube und Scheibe zusammenfügen
6. Befestigungsschraube anziehen
7. Führungsband an Kolben anbringen
8. Kolben in Gehäuse einschieben
9. Dämpfungsdichtung in den hinteren Zylinderdeckel einsetzen
10. Kolbenstangendichtung an auflegen und einpressen
11. Dämpfungsdichtung in den vorderen Zylinderdeckel einsetzen
12. Zugstangenmuttern ansetzen
13. Zylinderdeckel hinten auf die Zugstangenmuttern stecken
14. Gehäuse auf Zylinderdeckel hinten stecken
15. Zylinderdeckel vorne an Gehäuse anbringen
16. Zugstangen einführen
17. Zugstangenmuttern anziehen
18. Kolbenstangenmuttern ansetzen und bis zur Mitte aufdrehen
19. Schutznetz über Zylinder ziehen
20. Zylinder in Fertigteilkiste legen.

Die Herausforderung bei der Formulierung der einzelnen Prozessschritte besteht in den folgenden zwei Kriterien: Abstraktion und Abgrenzung.

Jeder einzelne Prozessschritt sollte bzw. muss so weit wie möglich abstrahiert werden, um unnötige Restriktionen vermeiden. Um dies zu erreichen, muss sich die Formulierung auf die Primärarbeit, d.h. die wertsteigernde Tätigkeit beschränken.

Eine passende Abgrenzung der Prozessschritte ist ebenso wichtig. Das Ergebnis eines abgeschlossenen Prozessschrittes sollte eine transportfähige Baugruppe sein, um eine Zuweisung auf verschiedenen, lokal getrennten Arbeitsstationen zu ermöglichen. Des Öfteren ist dies jedoch nicht möglich, beispielsweise sitzt der O-Ring zwischen Schritt 1 und 4 nicht richtig auf der Zylinderstange und kann bei ruckartiger Bewegung verrutschen oder gar zu Boden fallen. Unter anderem darum bedarf es nach der Ausarbeitung des Detailkonzeptes einer gründlichen Prüfung, um die Prozesssicherheit zu gewährleisten.

Aufbauend auf diesen Prozessschritten kann nun der Montagevorranggraph erstellt werden (siehe Abb. 15). Ein Montagevorranggraph, auch Netzplan genannt, dient zur Veranschaulichung der Struktur und beinhaltet alle möglichen Montagekonfigurationen. Im Normalfall wird er von links nach rechts gelesen. Wichtig beim Erstellen des Vorranggraphs ist die richtige Positionierung der Prozessschritte. Diese müssen an der frühestmöglichen Position gesetzt werden. Die Vereinigung mit anderen Prozessschritten bzw. anderen Bauteilen, muss dagegen an der spätestmöglichen Position erfolgen, um unnötige Einschränkungen in der Prozessplanung zu vermeiden.

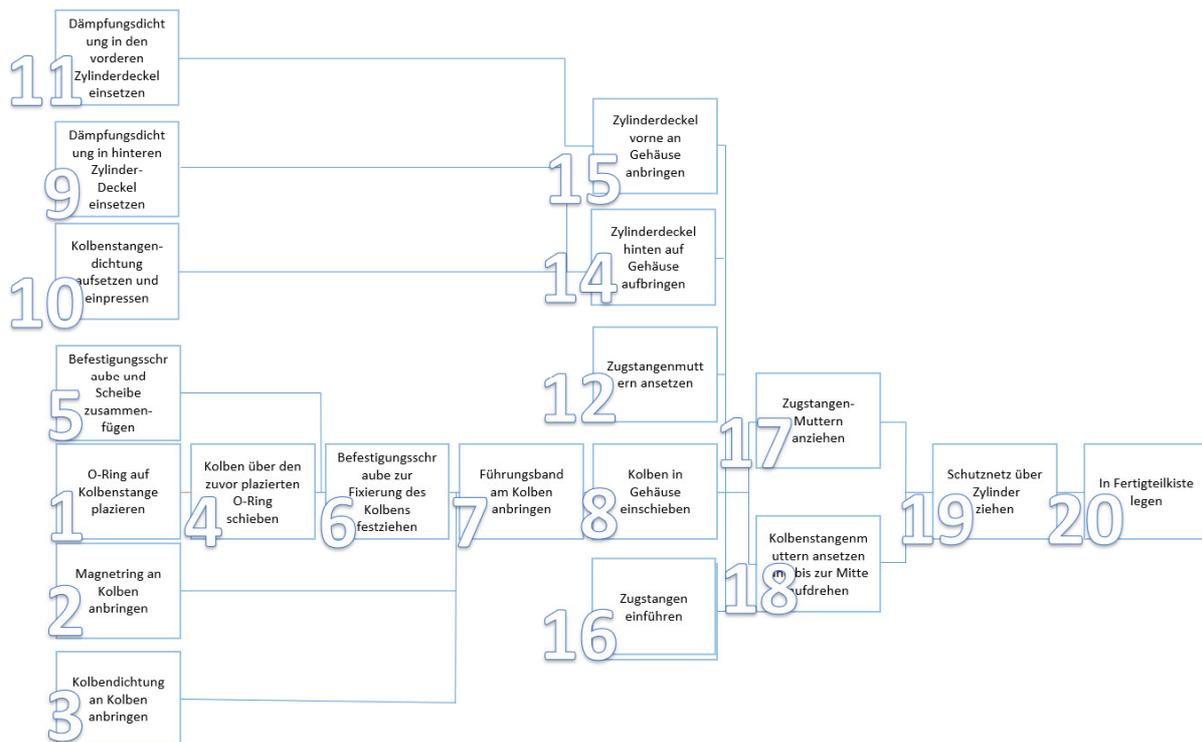


Abbildung 15 Montagevorranggraph des Pneumatikzylinders

Aus dem erstellten Vorganggraph sind folgende Punkte erkenntlich:

- Prozessschritte 1-8 führen zu einer geschlossenen Baugruppe, bestehend aus Kolben, dazugehörige Kleinteile und Zylinderrohr. Da die meisten Prozessschritte manuell ausgeführt werden müssen, bietet sich hier eine hybride Montage an. Die fertige Baugruppe kann danach auf den Werkstückträger gestellt werden, wo sie griffbereit für weitere automatisierte Arbeitsschritte verfügbar ist.
- Vor Prozessschritt 17 und 18 befindet sich eine Engstelle.
- Zylinderdeckel vorne, Kolben- und Dämpfungsdichtung bilden eine eigenständige Baugruppe. Auch dafür muss eine Position auf dem Werkstückträger vorgesehen werden.
- Für Zylinderdeckel hinten gilt dasselbe wie für Zylinderdeckel vorne.
- Die Prozessschritte 18, 19 und 20 können von einem einzigen Operator übernommen werden

Tabelle 2 zeigt die Zeiten des manuellen Montageablaufs. Diese Zeiten wurden im Rahmen der Bachelorarbeit im Smart Mini Factory Labor praktisch mittels Zeitmessung ermittelt.

Zur Ermittlung der Montagezeiten wurden drei mal fünf Zylinder zusammengebaut. Die ersten zehn dienten nur zu Trainingszweck, die letzten wurden mit der Kamera aufgenommen und auf Prozesszeiten analysiert. Die einzelnen Prozesszeiten wurden in die Tabelle eingetragen und der Mittelwert, sowie die Standardabweichung berechnet. Die in Klammer gesetzten Werte flossen nicht in die Berechnung ein, da es sich um Ausreißerwerte handelt. In diesem Fall geben sie Aufschluss über die Prozesssicherheit der Tätigkeit.

Tabelle 2 Montagezeiten

Beschreibung der Tätigkeit	Nr.	Durchgang Nr.					Mittelwert [s]	Std.-Abw. [s]
		1 [s]	2 [s]	3 [s]	4 [s]	5 [s]		
Kolbenstange in Haltevorrichtung einstecken und O-Ring platzieren	1	7,0	6,5	6,8	6,3	5,9	6,5	0,43
Magnetring an Kolben anbringen	2	[8,6]	4,7	4,7	4,4	4,7	4,6	0,15
Kolbendichtung am Kolben anbringen	3	13,5	10,7	[19,7]	12,2	10,1	11,6	1,53
Kolben über den O-Ring auf die Kolbenstange aufchieben	4	5,3	5,2	[17,8]	5,7	3,7	5,0	0,88
Befestigungsschraube und Scheibe zusammenfügen und einführen	5	5,6	4,8	4,3	5,5	4,4	4,9	0,61
Befestigungsschraube zur Fixierung des Kolbens an der Kolbenstange festziehen und Teil weglegen	6	6,5	5,7	6,0	6,5	5,2	6,0	0,55
Führungsband am Kolben anbringen	7	5,3	4,3	4,7	4,4	5,9	4,9	0,67
Kolben in das Gehäuse einschieben und Teil weglegen	8	4,8	3,4	3,9	4,4	3,4	4,0	0,62
Dämpfungsdichtung in den hinteren Zylinderdeckel einsetzen	9	13,3	11,7	13,4	14,7	12,9	13,2	1,08
Kolbenstangendichtung auf den vorderen Zylinderdeckel aufsetzen und einpressen	10	6,7	7,7	8,2	7,1	6,5	7,2	0,71
Dämpfungsdichtung in den vorderen Zylinderdeckel einsetzen	11	9,8	8,5	10,1	10,7	9,3	9,7	0,83
4 Zugstangenmutter auf Werkstückhalterung aufstecken	12	9,4	8,3	8,1	7,4	9,7	8,6	0,95
Zylinderdeckel hinten auf die 4 Zugstangenmutter aufstecken	13	2,2	2,4	2,7	2,3	2,4	2,4	0,19
Gehäuse mit eingestecktem Kolben auf Zylinderdeckel hinten anbringen	14	3,6	2,8	1,9	3,2	2,7	2,8	0,63
Zylinderdeckel vorne auf Gehäuse anbringen	15	4,1	2,2	3,0	2,5	2,3	2,8	0,78
4 Zugstangen einführen	16	7,9	7,6	10,4	9,2	8,1	8,6	1,15
4 Zugstangen mit Industrieschrauber festziehen	17	[14,3]	9,8	10,0	10,8	10,2	10,2	0,43
Kolbenstangenmutter ansetzen und bis zur Mitte aufdrehen	18	6,7	[14,2]	5,7	4,6	5,4	5,6	0,87
Schutznetz über den Zylinder ziehen	19	6,1	5,9	4,4	5,1	4,1	5,1	0,88
fertigen Pneumatikzylinder in die Fertigteilkiste legen	20	4,0	5,2	2,5	3,0	2,0	3,3	1,28
SUMME							127,2	

Im Folgenden einige Schlussfolgerungen bei der Analyse der Videoaufnahmen und der Zeiten:

- Das Anbringen des Magnetringes erwies sich aufgrund der Sprödigkeit des Materials als problematisch. Wurde er zu stark geöffnet, konnte es zum Bruch kommen. Die vorsichtige Handhabung kostete daher Zeit und machte den Prozess instabil. Von einer Automatisierung ist abzuraten.
- Die Montage der Kolbendichtung war insofern problematisch, da er beim Einfädeln zum Verdrehen neigte. Eine Neujustierung war zeitaufwändig, doch mit etwas Übung sollte dies kein Problem mehr darstellen.
- Das Aufchieben des Kolbens war aufgrund der lockeren Position des O-Ringes problematisch. Dieser konnte leicht verrutschen, sich verklemmen oder auf den Boden fallen. Eine Automatisierung ist auch hier nicht zu empfehlen.

- Die Zugstangen tendieren zum Verkeilen zwischen Gehäuse und hinteren Deckel. Eine Zentriervorrichtung könnte hier abhilfe schaffen.
- Die Kolbenstangenmutter ist für eine ungeübte Hand manchmal schwierig anzusetzen. Problematisch hierbei ist die simultane Ausführung einer Schub- und Drehbewegung. Hier wäre ein Roboter mit Greifsystem gut geeignet.

Zum Abschluss der Montageanalyse wurde eine Tabelle (Tabelle 3) erzeugt, welche die Automatisierbarkeit der Montageprozesse darstellt. Berücksichtigt wurde hierbei Formfestigkeit, Geometrie, Vereinzelung, Fügeposition, Notwendigkeit einer Orientierung, Kraftsensibilität und noch einige andere Kriterien.

Tabelle 1 Prozesseignungsevaluierung der Operatoren

	Mensch	UR3	URS	UR10	KUKA	Scara	Parallel	ABB	quattro
1 Oring plazieren	4	1	1	1	1	0	0	0	0
2 Kolben über den O-Ring auf die Kolbenstange aufchieben	4	3	3	3	3	2	1	2	2
3 Befestigungsschraube und Scheibe zusammenfügen und einführen	4	2	2	2	2	1	1	2	1
4 Befestigungsschraube zur Fixierung des Kolbens an Kolbenstange festziehen	4	4	4	4	4	3	3	3	3
5 Magnetring am Kolben anbringen	4	1	1	1	1	0	0	0	0
6 Kolbendichtung am Kolben anbringen	4	1	1	1	1	0	0	0	0
7 Führungsband am Kolben anbringen	4	0	0	0	0	0	0	0	0
8 Kolben im Gehäuse einschieben	4	0	0	0	0	0	0	1	0
9 Dämpfungsdichtung in den hinteren Zylinderdeckel einsetzen	4	1	1	1	1	1	1	1	1
10 Kolbenstangendichtring auf vorderen Zylinderdeckel aufsetzen und einpressen	4	0	0	0	0	0	0	1	0
11 Dämpfungsdichtung in den vorderen Zylinderdeckel einsetzen	4	1	1	1	1	1	1	1	1
12 Vier Zugstangenmuttern auf Werkstückhalterung aufstecken	4	3	3	3	3	3	1	2	2
13 Zylinderdeckel hinten auf die vier Zugstangenmuttern aufstecken	4	3	3	3	3	2	2	2	3
14 Gehäuse mit eingestecktem Kolben auf Zylinderdeckel hinten anbringen	4	3	3	3	3	2	2	2	2
15 Zylinderdeckel vorne auf Gehäuse anbringen	4	3	3	3	3	2	2	3	3
16 Vier Zugstangen einführen	4	3	3	3	3	2	1	2	2
17 Vier Zugstangen mit Industrieschrauber festziehen	4	4	4	4	4	3	1	3	3
18 Kolbenstangenmutter ansetzen und bis mitte aufdrehen	4	3	3	3	3	2	2	2	2
19 Schutznetz über den Zylinder ziehen	4	0	0	0	0	0	0	0	0
20 fertigen Pneumatikzylinder in die Fertigteilkiste legen	4	4	4	4	4	3	2	3	3

Die Note 0 wird vergeben, wenn die geschätzten Anpassungskosten des Operators höher als die Konstruktionskosten einer rein mechanischen Lösung wären.

3.1.3 Analyse der vorhandenen Hardwarekomponenten

Im folgenden Unterkapitel werden die einzelnen Hardwarekomponenten auf ihre Reichweite, kinematische Bewegungsfreiheit und Tragkraft analysiert. Anschließend wird anhand einer Excel-Tabelle ermittelt, für welche Prozessschritte sie sich am besten eignen. Am Ende wird noch spezifisch das Transportsystem Montrac begutachtet.

Universal Robots UR3

Der UR3 ist ein Leichtbau-Tischroboter des dänischen Unternehmens Universal Robots. Der 11kg schwere Roboter kann bis zu 3kg schwere Lasten bewegen innerhalb einer Reichweite von 500mm. Durch seine zahlreichen, in den 6 Gelenken verbauten Drehmomentsensoren, der ultraleichten Bauweise, sowie der ausgeklügelten Software bedarf er keiner Sicherheitseinhausung mehr und kann kollaborativ eingesetzt werden



Anz. Achsen	6
Traglast	3kg
Reichweite	500mm
Gesamtgewicht	11kg
Arbeitsraum	Kugelförmig
Wiederholgen.	±0.1 mm
Kollaborativ:	Ja

Universal Robots UR10

Der UR10 entspricht in seiner Funktions- und Bauweise größtenteils dem kleineren Model UR3, ist jedoch durch seine höhere Reichweite von 1300mm und der maximalen Traglast von 10kg besser für die Handhabung von größeren Objekten geeignet.



Anz. Achsen	6
Traglast	14kg
Reichweite	1300mm
Gesamtgewicht	29,5kg
Arbeitsraum	Kugelförmig
Wiederholgen.	±0.1 mm
Kollaborativ:	Ja

ABB irb 120

Der irb 120 ist der kleinste Vertreter der Modellreihe irb. Er ist ein typischer 6-Achsen Industrieroboter, besticht durch einen steifen und stabilen Aufbau und punktet dadurch in hoher Wiederholgenauigkeit. Seine breit gefächerten Einsatzgebiete reichen von Lackier- und Schleifarbeiten über Schweißarbeiten bis hin zu komplizierten Handhabungs- und Montagearbeiten. Zu beachten ist dennoch die Verwendung von adäquater Sicherheitsvorrichtungen wie Gitterzellen oder Lichtschranken.



Anz. Achsen	6
Traglast	3kg
Reichweite	500mm
Gesamtgewicht	25kg
Arbeitsraum	Kugelförmig
Wiederholgen.	±0.01 mm
Kollaborativ:	Nein

Adept Cobra i600

Der Cobra i600 ist ein Roboter des Typs SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), welcher prinzipbedingt vor allem für planebene Montage- und Fügevorgängen geeignet ist. Dabei erreicht er sehr hohe Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerte, parallel dazu punktet er durch eine hohe Wiederholgenauigkeit. Für planschräge, d. h. sich nicht orthogonal oder parallel zu den Bewegungsachsen befindliche Trajektorien, ist er allerdings weniger geeignet.



Anz. Achsen	4
Traglast	5.5kg
Reichweite	600mm
Gesamtgewicht	41kg
Arbeitsraum	Nierenförmig
Wiederholgen.	±0.02 mm
Kollaborativ:	Nein

KUKA LBR iiwa

Der LBR iiwa R800, kollaborativer Roboter der deutschen Marke KUKA, ist der erste in Serie gefertigte Leichtbauroboter (LBR) der Welt. Seiner Bezeichnung iiwa (intelligent industrial work assistant) verdient er durch die intuitive Steuerung und durch seine hohe Flexibilität. Dank seiner redundanten 7. Achse kann er im Gegensatz zu den UR-Modellen auch verwinkelte Montagepositionen erreichen, was sich allerdings auch in seinem Preis widerspiegelt.



Anz. Achsen	7
Traglast	7kg
Reichweite	800mm
Gesamtgewicht	22kg
Arbeitsraum	Kugelförmig
Wiederholgen.	±0.02 mm
Kollaborativ:	Ja

KUKA KMR

Das KUKA KMR Modul ist eine Transportplattform und eigentlich nur in Verbindung mit dem iiwa erhältlich. Grundidee dabei war die Mobilisierung des KUKA-LBRs, was die Flexibilität erhöhen sollte. Der KMR ist omnidirektional steuerbar, kann also ohne zu Wenden in jede Richtung fahren. Die Vmax in Querrichtung beträgt dabei jedoch nur die Hälfte der Vmax in Längsrichtung. Hauptanwendungsbereich liegt in der Belieferung der Montagearbeitsplätze, was er autonom ausführen kann.



Anz. Achsen	7
Traglast	170kg
Geschwindigkeit	3,6km/h
Gesamtgewicht	390kg
Arbeitsraum	Kugelförmig
Positioniergen.	±5 mm
Kollaborativ:	Ja

Adept Quattro s650

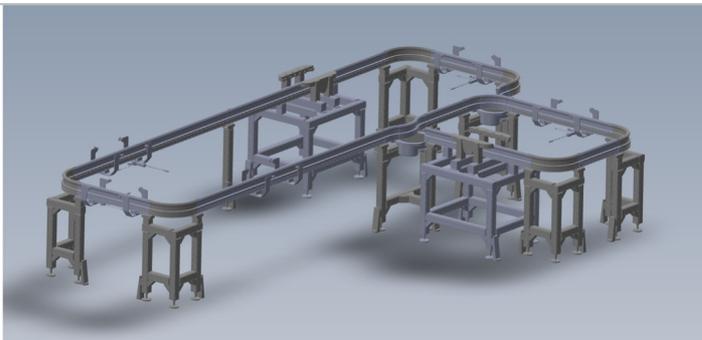
Der Quattro s650 ist ein Parallelroboter des kalifornischen Unternehmens Adept, einer Tochterfirma von Omron. Parallelroboter, auch Pick-and-Place- oder Cookie-roboter genannt erreichen aufgrund ihres Baustruktur extrem hohe Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerte. Essenziell dafür sind sehr leichte und gleichzeitig stabile geschlossene kinematische Kette. Im Falle des Quattros bestehen diese aus Karbonfaser. Hauptanwendungsgebiet liegt dabei in einfachen Transportvorgängen, wo die Produkte mit hoher Wiederholfrequenz an versetzt oder geordnet werden müssen.



Anz. Achsen	6
Traglast	6kg
Reichweite	650mm
Gesamtgewicht	117kg
Arbeitsraum	Ellipsoid
Wiederholgen.	±0.01 mm
Kollaborativ:	Nein

Montratec Montrac Transfersystem

Hier handelt es sich um ein Einschienen-Transportsystem in geschlossener Ausführung. Transportiert wird auf sogenannten Shuttles, motorisierte Plattformen mit einer Tragkraft von 15kg, angetrieben von einem Gleichstrommotor. Die erforderliche Energie beziehen sich die Shuttles aus sich seitlich der Schienen befindlichen Stromleitern. Das Schienensystem steht auf massiven Aluminiumprofilen.



Anz. Stationen	6
Traglast	15kg
Traglast PU4	400kg
Geschwindigkeit	117kg
Plattformgröße	400x300mm
Positioniergen.	±0.05 mm
Schutzpflichtig	Nein

3.1.4 Aufgabenbeschreibung und Zielsetzung

Das Ziel dieser Abschlussarbeit besteht in der Konzepterstellung und der digitalen Modellierung der hybriden Montagelinie, bestehend aus der Transferlinie Montrac, allen zuvor analysierten Robotern und mindestens einem kollaborativen Arbeitsplatz. An diesen können zukünftige Studenten, Lehr- und Forschungspersonal, sowie Interessierte die Montage eines Pneumatikzylinders beobachten und dadurch einen Überblick über die Potenziale von Industrie 4.0 erlangen. Im Folgenden werden die Rahmenbedingungen des Konzeptes festgelegt.

- Vollständig hybride Montage des Pneumatikzylinders
- Einbindung möglichst aller verfügbaren Roboter
- Aufgabenzuweisung nach Fähigkeitsprofil des Werkers
- Position und Orientierung der Montrac-Transportlinie muss beibehalten werden
- Position der Adept Quattro Roboterzelle muss beibehalten werden
- Alle nicht kollaborativen Roboter müssen durch adäquater Sicherheitsvorrichtungen (Sicherheitszelle, Lichtschranken) von Zugriffen während des Betriebs unzugänglich sein
- Vermeidung der Verwendung von nicht wiederverwendbaren Montagehilfsmitteln, wie z.B. Fräs- oder Drehteile
- Hohe Flexibilität, niedrige bzw. keine Rüstzeiten
- Hohe Modularität der Montagestationen
- Niedrige Investitionskosten, niedriger Fertigungsaufwand
- Hybride Montagestation muss ausschleusbar sein.

3.2 Detailkonzept

Im folgenden Unterkapitel wird auf die Ausarbeitung des Detailkonzeptes eingegangen. Begonnen wird dabei mit der Erarbeitung des Soll-Prozessablaufes. Darauf aufbauend kann ein grobes Layout der Montagelinie geplant werden. Im Folgenden genauer auf die Tätigkeiten der Hardwarekomponenten. Am Ende wird geklärt, ob das Konzept bereits in diesem Stadium umgesetzt werden kann oder es noch weitere Prüfung benötigt.

3.2.1 Soll-Prozessablauf

Die Ausgangssituation bildet die Montrac-Transportlinie. Abb. 16/17/18 zeigen die Shuttles und möglichen Pfade der Shuttles. Die Drehrichtung im Urzeigersinn wäre zwar ebenso möglich, doch schlecht mit dem aktuellen Montageprozess kompatibel.

Die Pfeile veranschaulichen die zwei geschlossenen Pfade des Transportsystems. Der Umweg an der Unterseite wird als Bypass genutzt. Dies ermöglicht eine Auskoppelung zweier Shuttles, bzw. Umgehung bestimmter Prozessschritte. Gesteuert wird diese Auskoppelung durch zwei Weichen, auf der Abbildung sind beide möglichen Positionen abgebildet. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass ein geschlossener Kreislauf im Bypass nicht möglich ist, da am gemeinsamen Segment (unter dem roten Verbotssymbol) die Stromleiter auf der falschen Seite befinden würden.

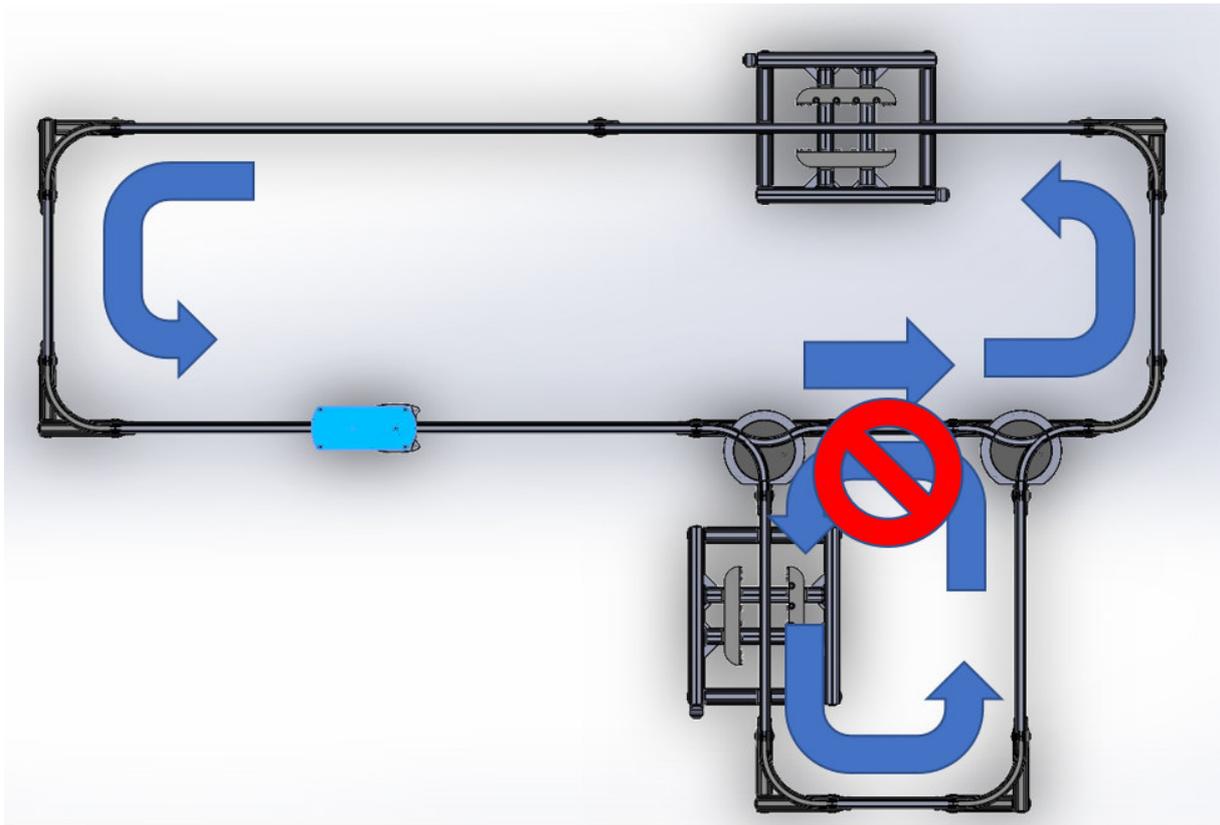


Abbildung 16 Mögliche Umlaufbahnen der Transportshuttles

Das Montrac-System wurde mit insgesamt sechs Stationen geliefert, vier davon in Standard- und zwei in Heavy-Duty-Ausführung für präzise und kontrollierte Stopps.

Die Standardausführung, genannt Supotrac, dient als Abstützvorrichtung und entlastet durch leichtes Anheben der Shuttleplatte die Lagerung der Shuttles. Dabei ist jedoch nur die Einwirkung von niedrigen Kräften vorgesehen, wie sie beispielsweise bei Handbearbeitung entstehen.



Abbildung 18 Supotrac (Montratec, 2020)



Abbildung 17 Abbildung 17 PU-4 (Montrac, 2020)

Die Heavy-Duty-Ausführung (Bezeichnung des Autors, Produktname Positiningunit PU-4), verfügt über eine Wiederholgenauigkeit von $\pm 0.02\text{mm}$ und kann bis zu 4000 N aufnehmen. Dies ermöglicht die Ausübung schwergängiger Montagevorgänge direkt auf dem Werkzeugträger.

Bei der Analyse der Roboter wurde ersichtlich, dass die kooperativen Roboter, also der UR3, UR10 und der KUKA iiwa, definitionsbedingt auch im Kollisionsfall aufgrund ihrer

Sensorik und Leichtbauweise nicht in der Lage sind, hohe Kräfte aufzubringen. Daher scheint es, abgesehen von der höheren Positioniergenauigkeit, relativ sinnfrei, die PU4 in Verbindung mit einem Cobot zu verwenden. Darüber hinaus besitzt der UR3, welcher im gegenwärtigen Layout an die untere PU4 gestellt wurde, nicht die Reichweite, um Montagefähigkeiten in einem akzeptablen Umfang auszuführen.

Die PU-4 wird also nach oben gesetzt. Die genaue Position kann anhand des Datenblattes ermittelt werden, sie sollte montagebedingt so nah wie möglich am rechten oberen Eck positioniert werden.

Das bestehende Layout wird nun wie in Abb. 19 ersichtlich, in zwei Bereiche geteilt. Bereich A ist auch bei laufender Produktion für Studenten zugänglich, hier müssen sich also auch die manuellen bzw. hybriden Montagearbeitsplätze befinden. Im oberen hinteren Bereich, Bereich B, dagegen befinden sich die nicht kollaborativen Industrieroboter, also ABB, Parallelroboter und SCARA. Der Adept Quattro besitzt bereits eine vollständige Einhausung, kann also auf seiner aktuellen Position an der linken Seite verbleiben. Bereich A und Bereich B müssen durch einer Sicherheitsbarriere (gelb eingezeichnet) getrennt werden. Die Barriere links oben kann dabei durch eine einfache Tür realisiert werden, die beim Öffnen durch einen Endschalter die Sicherheitskette unterbricht, und dadurch die Anlage zum Stehen kommt. Der breite Bereich erfordert dagegen optische Sicherheitsvorrichtungen, bzw. Lichtschranken, die bei Unterbrechung des Lichtfächers die Anlage abschalten.

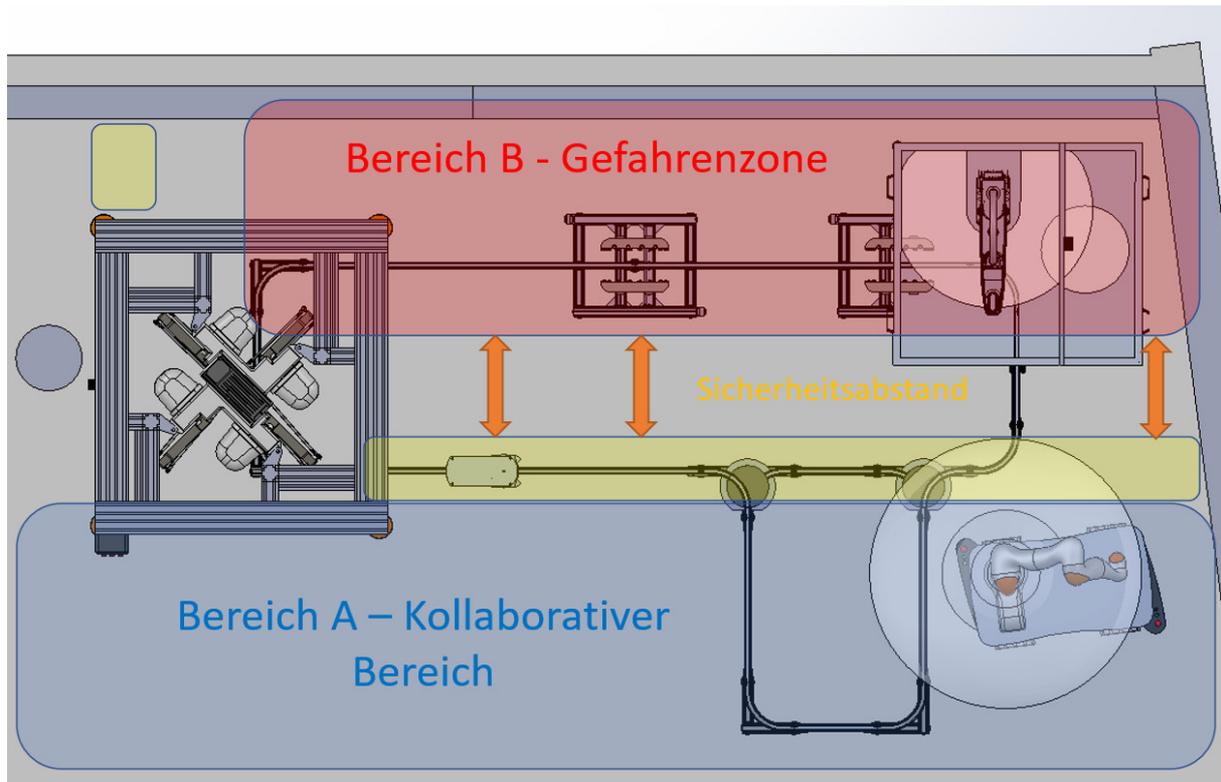


Abbildung 19 Einteilung in Bereiche

Anpassung des Prozessablaufes an die Rahmenbedingungen des aktuellen Layouts

Auf Basis der vorgegebenen Rahmenbedingungen wurde der Prozessablauf unter Berücksichtigung folgender Kriterien definiert:

- Die Position des jeweiligen Werkers muss sich innerhalb des zugewiesenen Bereiches befinden, d.h. also alle nicht kollaborativen Roboter müssen sich in Bereich B befinden.
- Der zugewiesene Prozessschritt muss dem jeweiligen Fähigkeitsprofil des Werkers entsprechen.
- Die Anordnung der Werker an der Transferlinie muss dem Montagevorranggraph entsprechen. Rückwärtslaufende Fahrtrichtungen oder ein zweiter Durchlauf sind nicht erlaubt.

Die folgende Abbildung 20 zeigt eine mögliche Prozessschrittzweisung an die Werker unter Berücksichtigung der zuvor genannten Kriterien:

	Mensch	UR3	UR5	UR10	KUKA	Scara	Parallel	ABB	quattro	
1 Oring plazieren	4	1	1	1	1	0	0	0	0	Bereich A
2 Kolben über den O-Ring auf die Kolbenstange aufchieben	4	3	3	3	3	0	1	2	2	
3 Befestigungsschraube und Scheibe zusammenfügen und einführen	4	2	2	2	2	1	1	1	1	
4 Befestigungsschraube zur Fixierung des Kolbens an Kolbenstange festziehen	4	4	4	4	4	3	3	3	3	
5 Magnetring am Kolben anbringen	4	1	1	1	1	0	0	0	0	
6 Kolbendichtung am Kolben anbringen	4	1	1	1	1	0	0	0	0	
7 Führungsband am Kolben anbringen	4	0	0	0	0	0	0	0	0	
8 Kolben im Gehäuse einschieben	4	0	0	0	0	0	0	1	0	
9 Dämpfungsdichtung in den hinteren Zylinderdeckel einsetzen	4	1	1	1	1	1	1	1	1	
10 Kolbenstangendichtring auf vorderen Zylinderdeckel aufsetzen und einpressen	4	0	0	0	0	0	0	1	0	
11 Dämpfungsdichtung in den vorderen Zylinderdeckel einsetzen	4	1	1	1	1	1	1	1	1	
12 Vier Zugstangenmuttern auf Werkstückhalterung aufstecken	4	3	3	3	3	3	1	2	2	Bereich B
13 Zylinderdeckel hinten auf die vier Zugstangenmuttern aufstecken	4	3	3	3	3	2	2	2	3	
14 Gehäuse mit eingestecktem Kolben auf Zylinderdeckel hinten anbringen	4	3	3	3	3	2	2	2	2	
15 Zylinderdeckel vorne auf Gehäuse anbringen	4	3	3	3	3	2	2	2	2	
16 Vier Zugstangen einführen	4	3	3	3	3	2	1	2	2	
17 Vier Zugstangen mit Industrieschrauber festziehen	4	4	4	4	4	2	1	3	3	
18 Kolbenstangenmutter ansetzen und bis mitte aufdrehen	4	3	3	3	3	2	2	2	2	
19 Schutznetz über den Zylinder ziehen	4	0	0	0	0	0	0	0	0	
20 fertigen Pneumatikzylinder in die Fertigteilkiste legen	4	4	4	4	4	3	2	3	3	

Abbildung 20 Prozesszuweisung

Die Anordnung der Werker in der Abbildung wurde im Vorhinein mit Bedacht gewählt: die vier Cobots wurden zwischen Mensch und Industrieroboter gesetzt, da sie gewissermaßen ein Bindeglied bilden. Sie können ohne trennende Schutzvorrichtung mit dem Menschen zusammenarbeiten, benötigen ihrerseits aber auch keine Vorrichtung, um mit den Industrierobotern zu kooperieren. Denkbar ist daher ein Einsatz im Bereich A oder B, falls die Reichweite es zulässt, auch in beiden Bereichen.

Bezüglich der Prozesskonfiguration wären im Rahmen des Vorranggraphen auch noch Änderungen möglich, so könnten z. B. die Prozessschritte 9-11 vor 1 geschoben werden, oder 5-7 untereinander vertauscht. Im Großen und Ganzen scheint sich die gegebene Konfiguration jedoch gut für die Implementierung ins Layout zu eignen.

Wird die Tabelle genauer analysiert, kristallisieren sich vier Inseln höherer Machbarkeit heraus. Jene oben rechts ist jedoch nicht umsetzbar, da für eine vollständige Montage menschliches Eingreifen erforderlich wäre, was wiederum mehrere Shuttleläufe notwendig machen würde.

Kombiniert man nun die gegebenen Rahmenbedingungen und das Fähigkeitsprofil der Werker anhand dieser Abbildung, können die Bereiche mit den jeweiligen Prozessschritten verbunden werden. Auf dieser Basis kann nun ein Layout erstellt werden.

3.2.2 Layout der teilautomatisierten Montagelinie

Die folgende Abbildung 21 zeigt zusammenfassend die Zuordnung der Prozessschritte an die Bereiche in passender Abfolge.

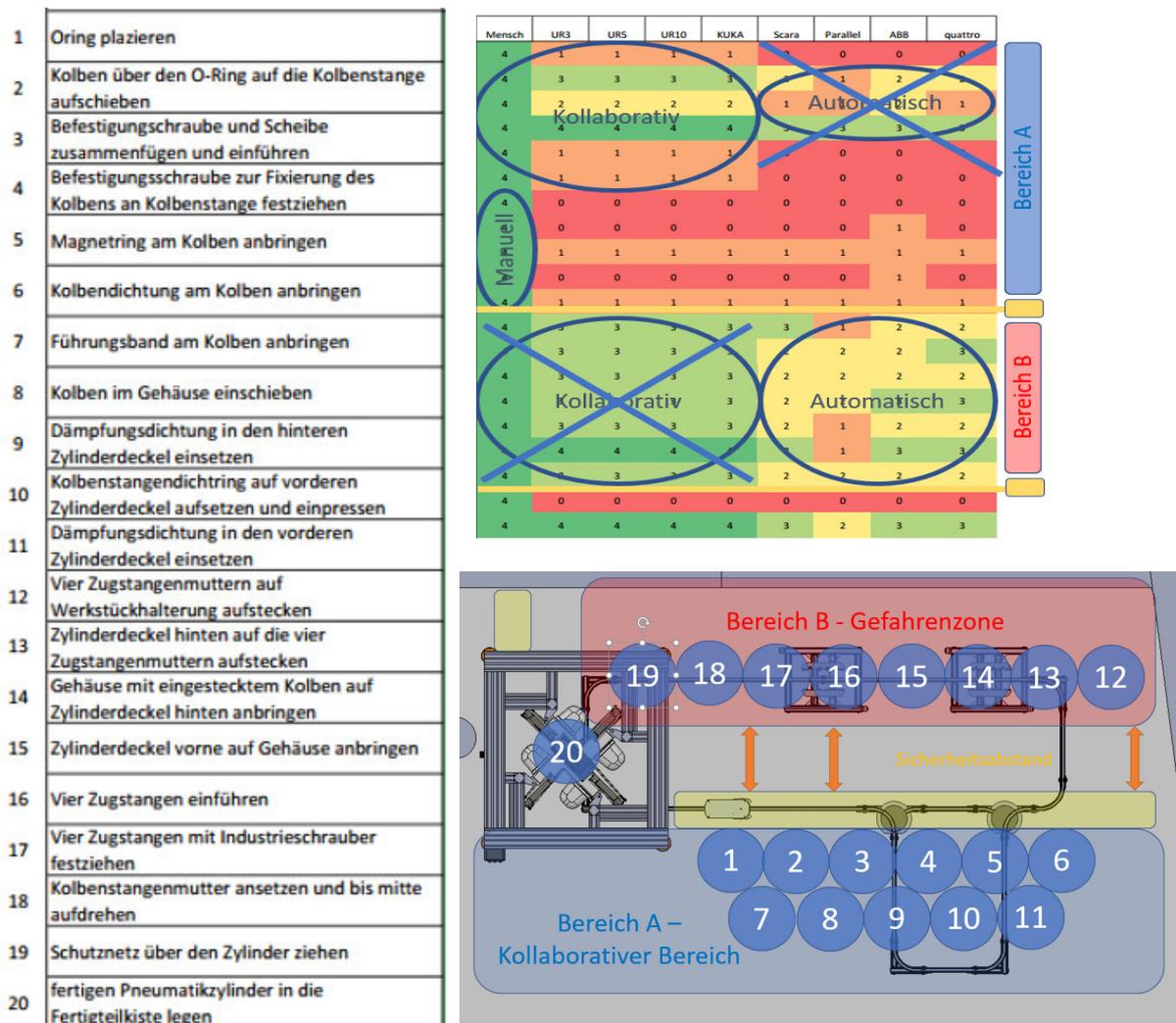


Abbildung 21 Zusammenfassung

Aufbauend auf diesem Entwurf können nun die Roboter platziert werden. Hier muss vorgegriffen werden, da es noch weitere Einflussfaktoren gibt, die jedoch erst im nächsten Unterkapitel, Spezifikation der Hardwarekomponenten, detailliert geschildert werden.

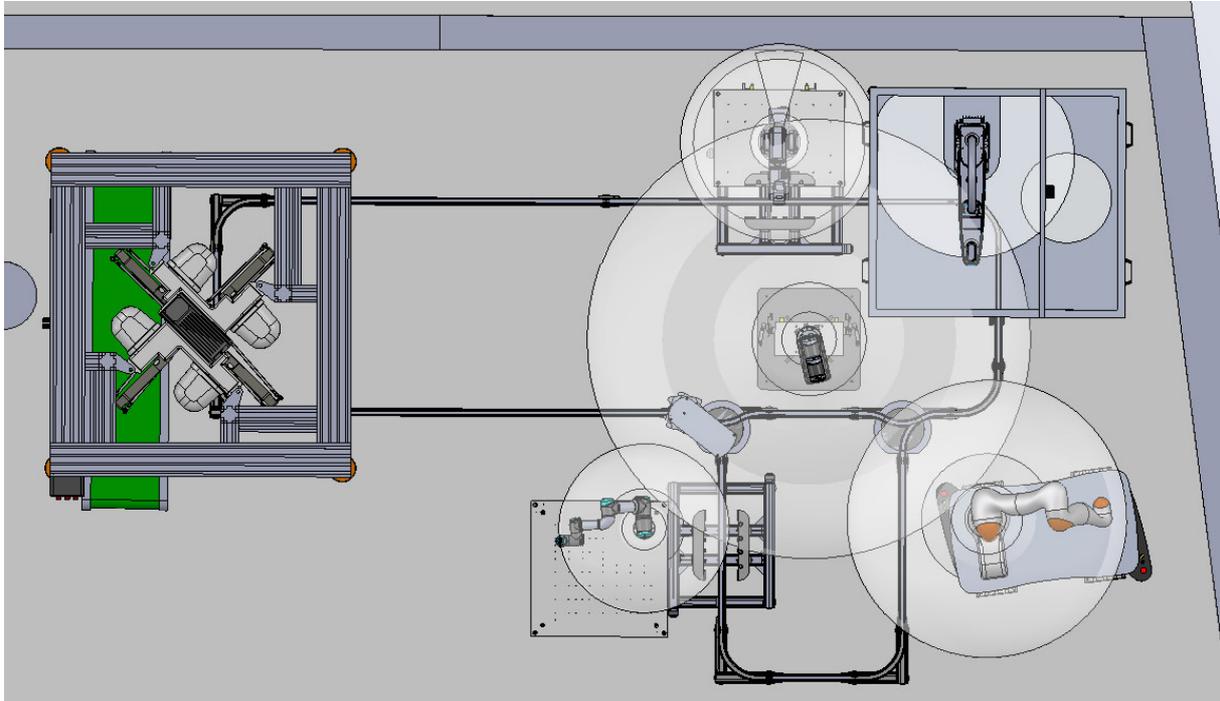


Abbildung 22 Reichweite Roboter

In Abbildung 22 wurde die Reichweite der Roboter eingezeichnet. Anhand der Schnittfläche bzw. des Schnittvolumens kann die Durchführbarkeit des jeweiligen Prozessschrittes geprüft werden.

3.2.3 Spezifizierung der Hardwarekomponenten im Soll-Prozess

Kuka KMR iiwa

Die Kuka KMR mobile Transportplattform (Abb. 23) eignet sich hervorragend für die Bereitstellung, Kommissionierung und Abtransport der Bauteile. Die Notwendigkeit dieser Tätigkeiten wurde in der Prozessanalyse nicht berücksichtigt, da es sich hierbei um Sekundärvorgänge handelt. Der Kuka kann also für folgende Tätigkeiten eingesetzt werden:

- Bereitstellung von Bauteilen an der hybriden Montagestation.
- Bereitstellung von Bauteilen an de Bosch-Rexroth Montagetischen (je nach Montagekonfiguration)
- Belieferung der Adept Cobra Station, also Befüllung des Vibrationsbehälters mit Muttern und Zugstangen
- Transport der vom Adept Quattro auf dem Transportband abgelegten fertigen Zylindern zurück zu der MRK, wo der Arbeiter noch das Schutznetz überzieht
- Nachbefüllung seiner Plattform im Lager.

Um unnötige Fahrwege zu vermeiden, sollte die Plattform bereits alle Bauteile auf der Ladefläche gelagert haben, sozusagen einen Zwischenspeicher bilden. Die einzelnen Lieferstationen können nach dem Milk-Run Prinzip abgearbeitet werden.

Im Detail könnte hierbei an jeder Station eine Kamera installiert werden, welche den Füllstand der Behälter überwacht und bei niedrigem Füllstand das Signal an die mobile Plattform sendet. Möglich wäre auch eine einfache Be-



Abbildung 23 KUKA KMR iiwa mit Einzelteilbehälter

standskontrolle, die anhand der Anzahl der montierten Bauteile den Füllstand der Behälter berechnet. Eine dritte Option wäre das manuelle Eingreifen des Arbeiters.

Hybride Montagestation

Die hybride Montagestation (Abb. 24) im SMF Labor ist im aktuellen Entwicklungsstand bereits in der Lage, in Kollaboration mit einem Werker den kompletten Montageprozess durchzuführen. In diesem Detailkonzept beschränkt sich ihr Aufgabenbereich auf die Montage der nicht formstabilen Komponenten, genauer gesagt, auf die Prozessschritte 1-11, sowie 18-20. Die dafür notwendigen Halterungen sind schon vorhanden. Der UR3 ist mit einer sensiblen Greifzange ausgestattet, welche auch

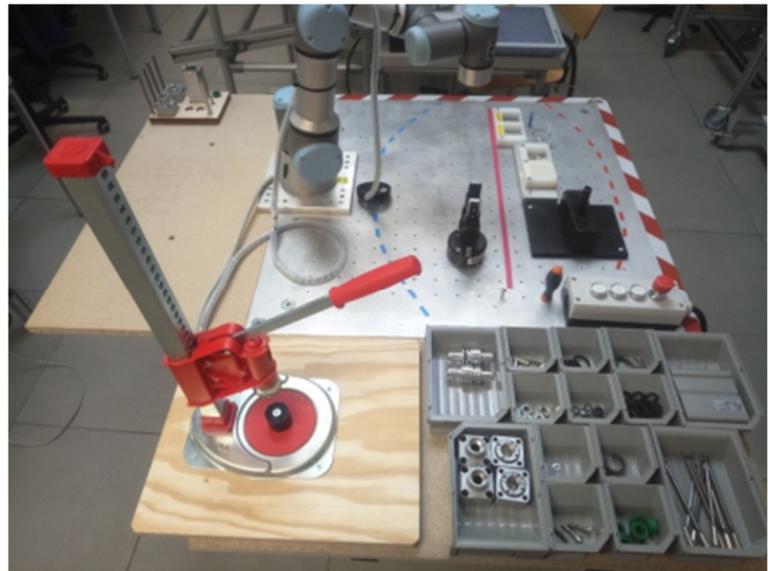


Abbildung 24 Hybride Montagestation mit UR3

weiche Bauteile wie Dichtungsringe aus den Behältern nehmen und für den Arbeiter bereitstellen kann. Einfachere Aufgaben, wie das Zusammensetzen von Schraube und Scheibe, kann der UR3 allein erledigen, wenn auch mit bescheidener Geschwindigkeit. Auch Prozessschritt 10 wäre denkbar, jedoch fehlt dem UR3 die nötige Kraft zur Betätigung der Kniehebelpresse. Diese könnte man auch durch eine elektrische ersetzen, oder einfach den Hebel verlängern.

Im Detail werden auf dieser Station folgende Baugruppen produziert:

- Zylinderdeckel vorne mit eingesetzter Dämpfungs- und Kolbenstangendichtung
- Zylinderdeckel hinten mit eingesetzter Dämpfungsdichtung

- Zylinderrohr mit zusammengesetzten und eingeführten Kolben, inkl. Verschraubter Kolbenstange, der Kolben sollte ungefähr mittig positioniert sein
- Kompletter Zylinder inklusive Schutznetz und Kolbenstangenmutter.

Die ersten drei Baugruppen können auf den Tisch zwischengelagert werden und bei Präsenz eines Transportshuttles vom UR3 auf dessen Werkstückträgerplatte gestellt werden. Dies ermöglicht eine Entkoppelung des Materialflusses sodass auch eine satzweise Montage möglich ist, was wiederum die Produktivität steigert.

Adept Cobra i600 SCARA

Der Adept SCARA Roboter ist aufgrund seiner hohen Geschwindigkeit, der Wiederholgenauigkeit und der in Z-Achse frei rotierende Aufnahme ausgezeichnet für Vereinzelung von Kleinteilen geeignet. Der Scara wird mit einer noch im Detail zu konstruierenden Zange ausgerüstet, welche in der Lage ist, die Zugstangenmuttern zu Greifen und um 180 Grad in horizontaler Achse zu drehen. Alternativ genügte auch 90 Grad, dies würde jedoch erheblich die Taktzeit erhöhen. Des Weiteren ist die Realisierung einer Kontrollstation notwendig, welche die Orientierung der Mutter kontrolliert. Zur Veranschaulichung kann auf Abbildung 33 vorgegriffen werden. Tätigkeiten im Detail:

- Positionierung der Zugstangenmuttern formschlüssig verdrehsicher auf dem Werkstückträger
- Positionierung der Zugstangen auf dem Werkstückträger.

Der Ablauf lautet wie folgt: Der flexible Feeder Flex-Bowl wird vom Kuka KMR mit Schrauben und Zugstangenmuttern befüllt. Diese werden durch Schütteln und Vibrieren der Flex-bowl vereinzelt und voneinander getrennt. Die Kamera kann nun die Einzelteile voneinander differenzieren und die Greifposition bestimmen. Diese wird an den Roboter gesendet, welcher an gegebener Position zugreift und das Teil entnimmt. Ab diesen Zeitpunkt muss nun unterschieden werden, ob eine Mutter oder eine Zugstange angefordert wurde:

Im Falle einer Zugstange muss diese um 90 Grad in die Vertikale gedreht werden. Nun kann sie in einer bestimmten Position in den Werkstückträger gesteckt werden. Dieser Vorgang ist 4x pro Werkstück notwendig.

Im Falle einer Zugstangenmutter muss diese zuerst auf ihre Orientierung geprüft werden. Dafür wird sie zuerst um 90 Grad in die Vertikale gedreht nun wird sie auf einen Prüfdorn mit 5,3mm Durchmesser gesteckt. Passt sie nicht darüber, wird sie um 180 Grad gedreht und eine Gegenprobe durchgeführt. Im Falle zweier negativer Ergebnisse, wird die Mutter in die FlexBowl zurückgelegt. So kann eine korrekte Orientierung garantiert werden. Im folgen Schritt kann nun die Sechskantöffnung der Mutter über das Sechskantprofil des Werkstückträgers gesteckt werden. Auch dies wird einige Versuche und Nachbesserungen benötigen, da dies eine simultane Bewegung in linearer und rotativer Richtung erfordert. Dieser Schritt muss ebenfalls 4x durchgeführt werden.

Universal Robots UR10

Der UR10 eignet sich aufgrund seiner kollaborativen Eigenschaften, der präzisen Drehmomentkontrolle der Drehachsen sowie seiner Leichtbauweise hervorragend für die Unterstützung des SCARA, Parallel- und ABB-Roboters. Da diese ohne aufwändig modifizierte Sensorik und Kameratechnik, sowie teurer und nicht wiederverwendbarer Mechanik einen relativ begrenzten Einsatzbereich haben, ergänzen sie sich hervorragend mit flexiblen kollaborativen Robotern, die ihrerseits mit einfachen Vorrichtungen zur Seite stehen, sozusagen eine „helping hand“ bieten und so wesentlich komplexere Prozessabläufe ermöglichen. Im gegebenen Soll-Prozess dient der UR10 aufgrund seiner hohen Greifweite von 1300mm zur Unterstützung von gleich drei Montagestationen. Seine Primärtätigkeiten sind die folgenden:

- Aufstecken des hinteren Zylinderdeckels auf die zuvor platzierten Zugstangenmuttern
- Aufstecken des Zylindergehäuses auf den hinteren Zylinderdeckel
- Aufstecken des vorderen Zylinderdeckels über die Kolbenstange auf das Zylindergehäuse.

Diese drei Prozessschritte können sowohl auf der Adept-Montagestation als auch auf der Parallelroboter-Montagestation erfolgen.

Parallelroboter

Die Aufgabenfindung für den von der TFO Bozen realisierten Roboter mit 2 Freiheitsgraden gestaltete sich recht schwierig aufgrund der begrenzten Freiheitsgrade des Roboters. Im Gegensatz zu den restlichen Robotern kann er sich nur im zweidimensionalen Raum bewegen. Folglich müssen sich alle erforderlichen Bauteile in einer Ebene befinden, dessen Normale sich auf horizontaler Ebene befindet. Die Einbauichtung beschränkt sich also auf Quer- und Längsrichtung zur Transportlinie. In diesem Konzept wird der Parallelroboter dafür genutzt, die zuvor vom SCARA-Roboter in den Werkstückträger gesteckten Zugstangen in den zusammengesteckten Zylinder einzuführen.

Im Detail funktioniert dies wie folgt: Die Zugstangen werden auf dem Werkstückträger antransportiert und stecken in vier Bohrungen, welche genau dasselbe Lochbild wie die Zylinderdeckel haben. Der Roboter senkt nun seine 3D-gedruckte Aufnahme über die Mutterköpfe und nimmt diese so kraftschlüssig auf. Sie werden angehoben,

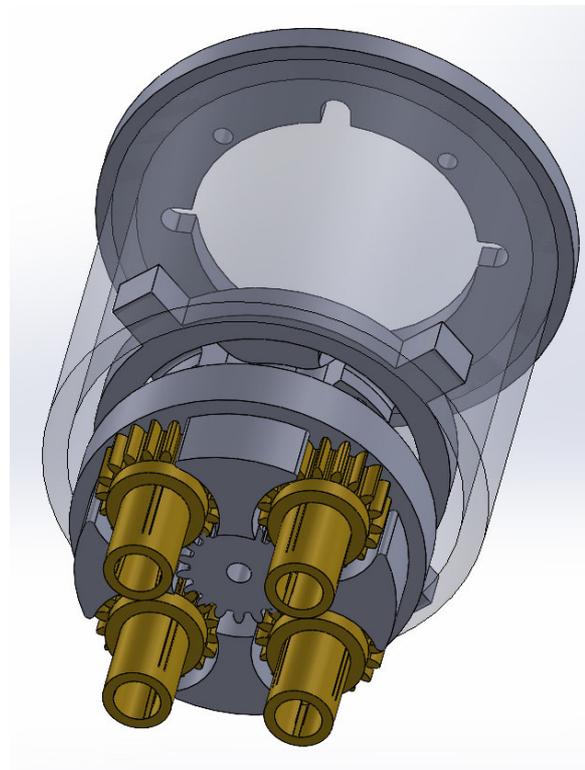


Abbildung 25 Vorläufige Version der Aufnahme der Mutterköpfe

über den bereits vom UR10 zusammengesteckten Zylinder geführt und alle vier gleichzeitig eingeführt. Aufgrund baubedingter Ungenauigkeiten kann es hier zum Verkeilen kommen, dem kann aber mithilfe einer vom UR10 eingeschobenen Schablone entgegengewirkt werden.

ABB IRB120

Der ABB 6-Achsenroboter wird zur Verschraubung der vom Parallelroboter eingeführten Zugstangen eingesetzt. Dafür muss er mit einem Industrieschrauber ausgerüstet werden, welcher durch integrierte Drehmomentkontrolle die vorgegebenen Toleranzen der Anzugsmomente erreicht. Eine spezielle Herausforderung kann hier das Einführen des Inbus-Schraubenaufsatzes in die Zugstangennutter bilden. Da der ABB über keinerlei Rückmeldung der Kräfte verfügt, muss ein spezielles Ansetzprogramm programmiert werden (um ein Verkeilen und daraus resultierende Materialbelastungen zu vermeiden) oder der Roboter mit einem entsprechenden Kraftsensor ausgestattet werden.

Adept Quattro s650

Der vierachsige Parallelroboter Adept Quattro s650 punktet unter allen analysierten Robotern mit den höchsten Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerten, kann jedoch im Montageablauf keine passende Rolle erfüllen. Sein Aufgabenbereich beschränkt sich auf die Entnahme des verschraubten Pneumatikzylinders von der Transferlinie. Dieser wird in Reih und Glied auf das Transportband abgelegt, welches jeweils einen Schritt nach vorne fährt und der fertige Zylinder von der Kuka Plattform entnommen wird.

3.2.4 Notwendigkeiten einer Überprüfung mittels Digitalem Mock-Up

Auf Basis der analysierten Daten könnte nun mit dem realen Auf- bzw. Umbau der Montagelinie begonnen werden. Dies beinhaltet jedoch einige Risiken. Für eine Montagelinie ist ein zweidimensionales Layout keineswegs ausreichend. Folgende Fragestellungen sind noch zu klären, bzw. zu prüfen:

- Passt die aktuellen Montagestationen an die Transferlinie?
- Befinden sich sämtliche prozessrelevanten Positionen innerhalb des Arbeitsraumes des Roboters?
- Besteht Kollisionsgefahr zwischen den Robotern?
- Wie müssen die Roboter positioniert werden, um die Prozesseffizienz zu erhöhen, bzw. unnötige und komplizierte Trajektorien zu vermeiden?
- Sind die beiden Sicherheitsbereiche voneinander vollkommen abgeschirmt, ist also ein Eintritt in die Gefahrenzone ohne Auslösung ausgeschlossen?
- Sind die Montagestationen, welche einen Werker beinhalten auch ergonomisch richtig gestaltet?

Um diese Fragestellungen vor der effektiven Realisierung beantworten bzw. überprüfen zu können bietet es sich an eine digitale Modellierung durchzuführen und das

Konzept im digitalen Modell bzw. virtuell zu überprüfen. Der folgende Abschnitt beschäftigt sich daher mit der digitalen Modellierung der Linie.

3.3 Digitale Modellierung der teilautomatisierten Montagelinie

Im folgenden Unterkapitel wird ein Einblick in die digitale Modellierung der Montagelinie gewährt. Begonnen wird hierbei mit der Vorgehensweise, einer Beschreibung der verwendeten Software und die Informationsbeschaffung.

Im darauffolgenden Unterkapitel wird näher auf das erstellte Modell eingegangen.

3.3.1 Vorgehensweise bei der digitalen Modellierung

Der gegenwärtige Softwaremarkt bietet eine Vielzahl von professionellen CAD-Systemen wie Catia, Autocad, Inventor, NX, Creo und SolidEdge, um einige zu nennen. Die Auswahl der Software für diese Abschlussarbeit fiel insofern leicht, da ein großer Teil der bestehenden Dateien bereits mit SolidWorks erstellt wurde.

SolidWorks ist ein CAD-Programm aus dem Hause Dassault Systemes. 1995 veröffentlicht, war es zusammen mit Autodesk Inventor eines der ersten erhältlichen 3D-CAD Programme. Mittlerweile typisch für dieses Produkt sind die aus Einzelteilen aufgebauten und durch Abhängigkeiten geformten Baugruppen. Des Weiteren ist es möglich, Zeichnungen zu erstellen und als pdf zu exportieren, sowie 2D Zeichnungen abzuleiten. SolidWorks nutzt drei verschiedene Dateiformate zur Sicherung der erstellten Dateien: SLDPRT für Einzelteile, SLDASM für Baugruppen und SLDDRW für Zeichnungen.

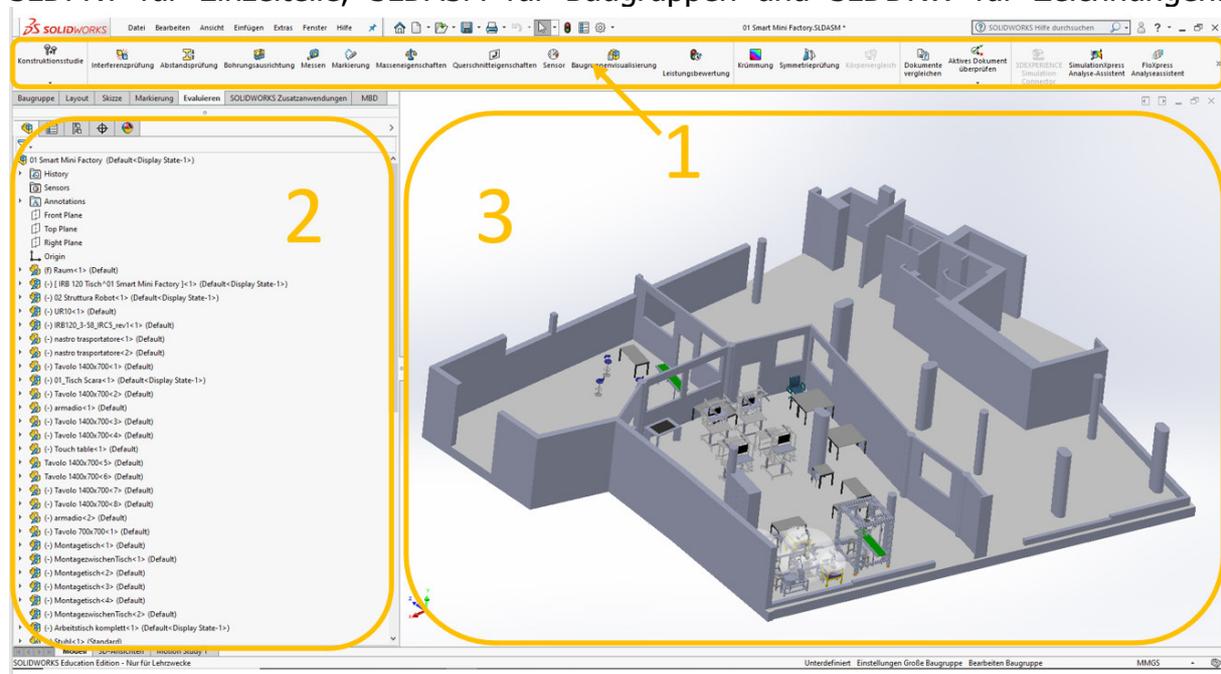


Abbildung 26 User-Interface von SolidWorks

Die Abbildung bildet einen Überblick über das User-Interface von SolidWorks. Bereich 1, der Command Manager, bietet eine große Anzahl von Werkzeugen zur Erstellung

und Bearbeitung von Teilen. Bereich 2, der Feature Manager, stellt die gesamten generierten Features dar. Wichtig ist hierbei die Hierarchie der Features. Die Skizze bildet die Basis. Darauf aufbauend kann ein Feature erstellt werden. Ein oder mehrere Features bilden ein Einzelteil. Mehrere Einzelteile können zu einer Baugruppe zusammengefasst werden. Über den Feature Manager kann jederzeit auf bereits erstellte Features zugegriffen werden. Bereich 3 ist der Grafikbereich, hier kann das Modell bewegt und einzelne Features ausgewählt und modifiziert werden. Eine Bearbeitung des Modells ist also sowohl in Bereich 2 als auch in Bereich 3 möglich.

Basis für diese Abschlussarbeit bildete eine Sammlung von einzelnen CAD-Dateien, die von diversen Mitarbeitern und aus Vorarbeiten des SMF Labors generiert wurden. Im Folgenden eine Auflistung der einzelnen Komponenten und der erforderlichen Änderungen.

- Gebäude/Raum: Das Modell des Raumes ist eine Darstellung des Smart Mini Factory Labors und des FabLab. Es wurde ursprünglich als dxf importiert und durch Extrusion in ein Einzelteil umgewandelt. Die Einrichtung war schon positioniert und einige Roboter standen an ihrem Platz. Die Datei „Raum“ war als Einzelteil in gegebener Form aufbaufehlerfrei, jedoch um 90 Grad verdreht, nämlich auf die Front-Ebene gelegt. Dies hätte Probleme bei der Virtual Reality Konvertierung gegeben, daher wurde es auf die Top-Ebene gelegt. Folglich waren alle existierenden Verknüpfungen mit der Einrichtung fehlerhaft und es musste neu „eingrichtet“ werden.
- Bosch-Rexroth Montagetische: Diese Baugruppen bestehen aus 88 Komponenten und enthielten beim ersten Öffnen 27 Aufbaufehler. 24 konnten automatisch gelöst werden, 3 erforderten eine manuelle Korrektur.
- Zelle Quattro: Die Baugruppe der Adept Quattro Roboterzelle besteht aus über tausend Einzelkomponenten und enthielt an die 250 Aufbaufehler. Die automatische Korrektur erforderte über 60 Minuten volle Prozessorkapazität, konnte aber die meisten lösen. Nachdem die Baugruppe jedoch auch in reduzierter Form (spezielle Darstellungsweise von SolidWorks für große Baugruppen) sehr schwerfällig war und unnötigerweise Systemressourcen verbrauchte, wurde sie nachgezeichnet und auf 84 Komponenten reduziert. Der Roboterkörper wurde im ursprünglichen Format beibehalten.
- Tisch SCARA: Die Baugruppe der Roboterzelle des Adept Cobra i600 SCARA wurde im STEP-Format importiert, und bot daher aufgrund der fehlenden Abhängigkeiten keinerlei Möglichkeit zur Manipulation. Die Baugruppe musste also zerlegt, Fehler korrigiert, Abhängigkeiten eingefügt und ins Layout implementiert werden.
- Parallelroboter: Der Parallelroboter der TFO wurde vermutlich auf Autodesk Inventor modelliert und als STEP-Datei importiert. Es handelte sich um eine sehr detaillierte Baugruppe, jedoch ohne Verknüpfungen.
- Transferlinie Montrac: Die Dateien der Transferlinie wurde vom Unternehmen Montratec direkt auf einer DVD mitgeliefert. Sie waren im STEP-Format abgespeichert und konnten, mit Ausnahme des Verbindungsteils TraLink, fehlerfrei importiert werden. Die Datei TraLink wurde nachbestellt, musste dann aber noch nachmodelliert werden. Die geraden Teile der Transportschiene wurden

anhand der Lieferliste abgelängt. Die nun vollständig vorhandenen Einzelteile konnten zu einer Baugruppe zusammengefügt und ins Modell eingefügt werden.

- Restliche Baugruppen: Die restlichen Baugruppen bedurften nur geringfügiger oder gar keiner Anpassung und müssen daher nicht näher behandelt werden.

Das vollständige und aufbaufehlerfreie Modell des SMF Labors konnte im Anschluss an das erarbeitete Layout der Montagelinie im Soll-Prozessablauf angepasst werden.

3.3.2 Digitales Modell der gesamten Montagelinie

Das fehlerfreie Modell des Layouts des SMF Labors konnte anschließend mit dem Realzustand verglichen und auf Unstimmigkeiten geprüft werden. Hauptfokus lag dabei auf der Position der Montrac Transferlinie, sowie der Position der Adept Quattro Roboterzelle, da mit einer nachträglichen Justierung in der Realität hoher Aufwand und damit Kosten verbunden wären. Nach Prüfung von insgesamt sieben Messpunkten zeigte sich eine durchschnittliche Positioniergenauigkeit im Bereich von unter zehn Millimetern, was völlig ausreichend war.

Ausgehend von der korrekt positionierten Transferlinie wurde begonnen, die manuellen Montageplätze sowie die Roboter/Roboterzellen zu platzieren und anzupassen. Hier konnte des Öfteren nach dem Ausschlussprinzip gearbeitet werden: Die hybride Montagestation musste so nah wie möglich an die Transferlinie gestellt werden, da die Reichweite des UR3 nur 500mm beträgt. Gleichermäßen musste sie am Bypass anliegend sein, um eine Ausschleusung der Transfershuttles zu ermöglichen. Folglich blieben drei mögliche Positionen. Jene an der Wandseite musste freigelassen werden, da der Kuka KMR dort durchfahren muss, und an der oberen Seite bestand kein Platz für eine Haltestation für die Transportshuttles. Folglich blieb nur die dem Adept Quattro zugewandte Seite.

Die Positionierung der restlichen Roboter (Abb. 27) gestaltete sich als wesentlich schwieriger. Anhand der zugewiesenen Montageabläufe konnte die Reihenfolge der Positionen im Urzeigersinn ermittelt werden. Diese lautet wie folgt: SCARA, Parallel, ABB. Des Weiteren mussten drei Arbeitsstationen zugänglich für den UR10 Roboter sein. Dies erfordert einen geringen Abstand zwischen den Robotern, welcher mit gegebener Einhausung des Scara-Roboters nicht zu erreichen war.

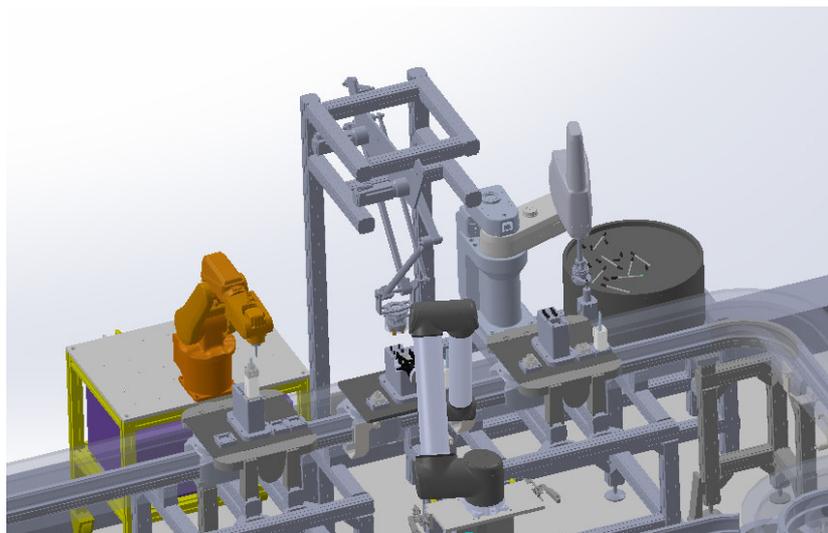


Abbildung 27 Positionierung der drei Industrieroboter und des UR10

Durch eine detailliertere Analyse der Einhausung wurde klar, dass auch durch massive Modifikation des Gehäuses kein vernünftiges Ergebnis erzielt werden kann. Um auf statischer Modellebene alle Volumenschnittbereiche zu analysieren, wurde ein transparentes Modell (Abb. 28) des für die Durchfahrt des Transportschlittes benötigten Freiraumes konstruiert. Dafür wurde ein Lichtraumprofil des Schlittes mit Werkzeugträger erstellt und entlang des Pfades extrudiert. Eine dynamische Simulation hätte als Ergebnis lediglich eine Kollision, also eine Fehlermeldung geliefert.

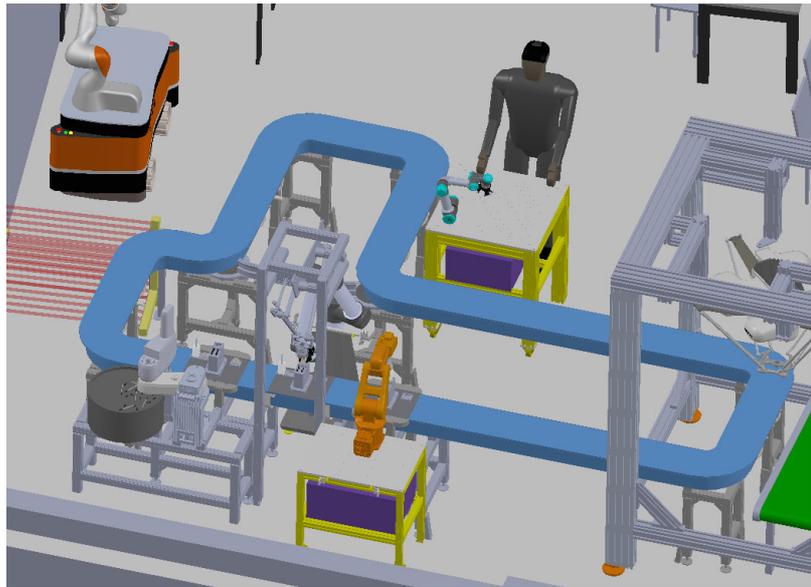


Abbildung 28 Lichtraumprofil entlang des Pfades des Transferschlittes

Aufbauend auf dieser Darstellung konnten die erforderlichen Modifikationen an der Rahmenstruktur ermittelt werden. Erforderlich ist hier eine Modifikation der Plexiglasrahmen, der 10mm Aluminiumgrundplatte, die Kürzung aller Aluminiumsteher, Modifikation der Basisplatte sowie der Austausch der Hälfte der Plexigläser. Darüber hinaus wäre nach erfolgtem Umbau der Durchgang hinter der Struktur verschlossen. Eine Neukonstruktion der Roboterzelle wäre hier aus wirtschaftlicher Sicht die bessere Lösung.

Aufbauend auf dieser Darstellung konnten die erforderlichen Modifikationen an der Rahmenstruktur ermittelt werden. Erforderlich ist hier eine Modifikation der Plexiglasrahmen, der 10mm Aluminiumgrundplatte, die Kürzung aller Aluminiumsteher, Modifikation der Basisplatte sowie der Austausch der Hälfte der Plexigläser. Darüber hinaus wäre nach erfolgtem Umbau der Durchgang hinter der Struktur verschlossen. Eine Neukonstruktion der Roboterzelle wäre hier aus wirtschaftlicher Sicht die bessere Lösung.

Nach dieser Erkenntnis wurde die Montierbarkeit des Scara direkt auf die Montagestation PU4 geprüft. Diese war aufgrund ihrer Modularbauweise, bestehend aus 80mm handelsüblichen Profilaluminium, gut für eine Erweiterung geeignet. Die Profilform wurde also kopiert und eine stabile Basis für den Scara erstellt (Abb.29).

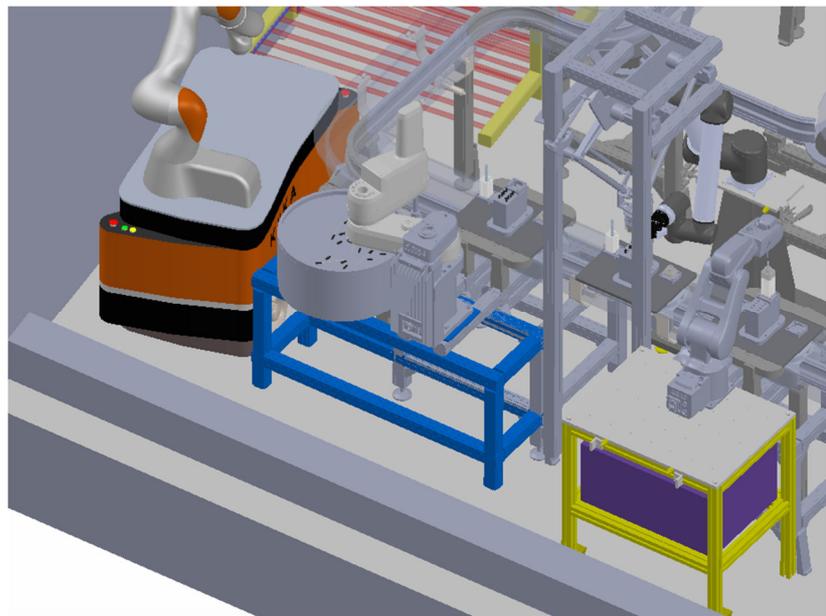


Abbildung 29 Neukonstruktion der Basis des SCARA-Roboters

Der Parallelroboter der TFO an der darauffolgenden Station wurde über die PU4 positioniert, hatte hier jedoch dasselbe Problem. Auch in diesem Fall würde sich anbieten, den Rahmen direkt mit der Haltestation zu verbinden. .

Die Positionierung der ABB Verschraubstation gestaltete sich als relativ einfach, da sich die Verschraubpositionen sehr nahe beieinanderliegen. Da dem ABB-Roboter keine weitere Handhabungsaufgabe zugewiesen wurde, entstehen trotz seines begrenzten Arbeitsraumes und der breit bauenden PU-4-Station keine Probleme. Der bestehende Tisch konnte ebenfalls beibehalten werden.

Zur Absicherung des Gefahrenbereiches B ist die Montage einer Tür mit Sicherheits-Endschalter notwendig, sowie die Montage von Sicherheitsbarrieren. Diese sollten einen T-förmigen Aufbau (Abb. 30) haben, um den KUKA KMR von einem Menschen unterscheiden zu können. Dieser Typ wird beispielsweise von der Firma SICK angeboten. Die Funktionsweise

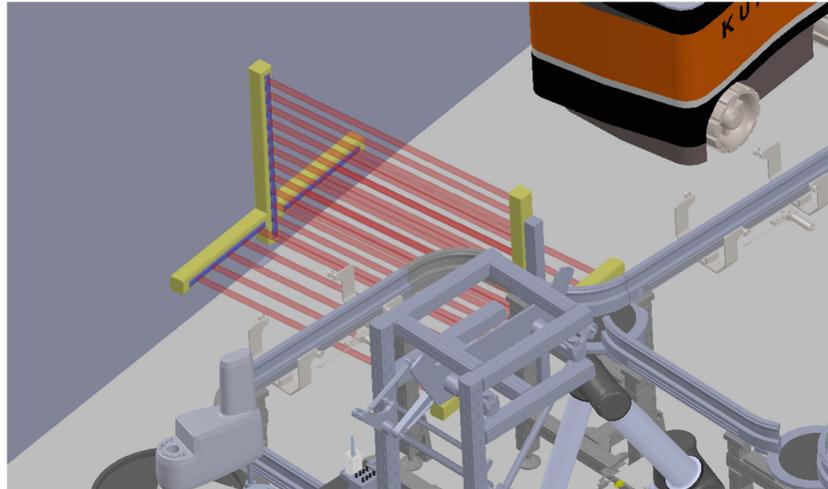


Abbildung 30 T-Bauform der Lichtschranken

beruht darauf, dass ein Mensch beim Durchgehen nur einige der waagrechten Strahlen unterbricht, der KUKA KMR dagegen alle.

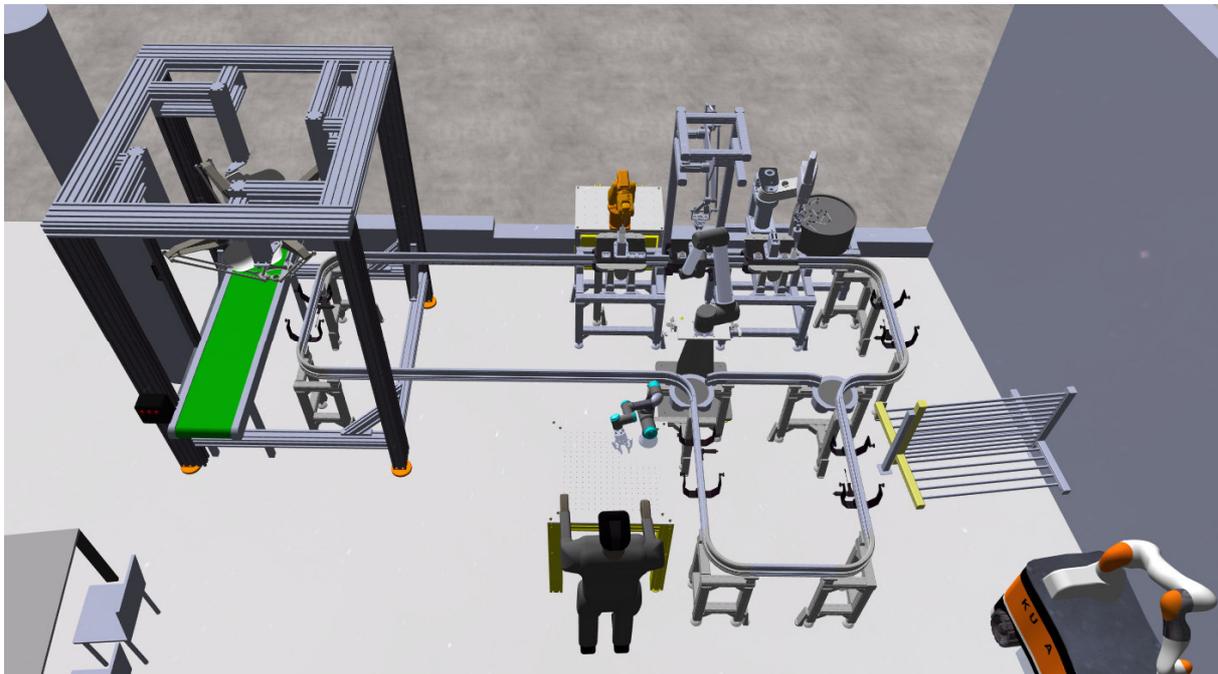


Abbildung 31 Ansicht der kompletten Montagelinie im eDrawings

4 Digitale und virtuelle Überprüfung

Dieses Kapitel behandelt die digitale und virtuelle Überprüfung der modellierten und animierten Montagelinie.

4.1 Überprüfung durch Simulation des Montageablaufs

Zur weiteren Überprüfung des digitalen Modells bietet SolidWorks die Möglichkeit, eine Animation der Baugruppe zu generieren. Dafür stehen drei Tools zur Verfügung:

- **Bewegungsanimation:** Die einfachste Animiermethode. Bewegungsmuster werden von Hand durch vorgeführte Punkte definiert. Es besteht auch die Möglichkeit, einen Linear- oder Rotationsmotor einzusetzen.
- **Basisbewegung:** Mit diesem Tool können auch Gravitation, Federn und Bauteilkontakt simuliert werden. Denkbar wäre damit beispielsweise die Simulation des Ventiltriebes eines Verbrennungsmotors.
- **Bewegungsanalyse:** Nur als Add-on oder in der SolidWorks Pro Version nutzbar. Berücksichtigt alle verfügbaren Bewegungsobjekte und die Ergebnisse als genaue Numerische Werte wiedergeben.

Da für die Animation der Montagelinie der sogenannte Pfadverknüpfungsmotor notwendig war, kamen die ersten beiden Tools nicht in Frage. Die vollständige Simulation des erarbeiteten Prozessablaufes ist notwendig, um dessen Durchführbarkeit auf dynamischer Ebene zu prüfen. Gegenüber einer schrittweisen, statischen Überprüfung bietet sie folgende Vorteile:

Der Prozessablauf wird mit Sicherheit lückenlos dargestellt. Eine Animation bedarf einer definierten Position jedes Objektes zu jedem Zeitpunkt. Dies garantiert bei fehlerfreiem Durchlauf einen kollisionsfreien Montageablauf.

Die Implementierung des Faktors Zeit ergibt eine numerische Überprüfbarkeit durch die Berechnung von Beschleunigungswerten. Diese können mit gegebenen Werten, wie z.B. Maximalbeschleunigungen von Robotergliedern oder trägheitsbedingte Bauteilüberlastung abgeglichen und daran angepasst werden.

Im projektspezifischen Fall ergaben sich, unter anderem, folgende Probleme:

- Die Positionen des UR10 und Parallelroboter bei bestimmten Montagevorgängen. Da der Parallelroboter breit gebaut ist und der UR10 aufgrund der Nähe zur Montagestation seinen Basisarm im steilen Winkel nach oben stellt, kommt es bei bestimmten Zuständen zur Kollision (Abb. 32). Dies würde in realem Umfeld zu Schäden führen. Eine partielle Lösung war, den UR10 weiter von der Montagestation zu entfernen. Des weiteren sollte softwaretechnisch eine zeitliche Aufteilung des Schnittvolumens der zwei Bewegungsräume vorgesehen werden.

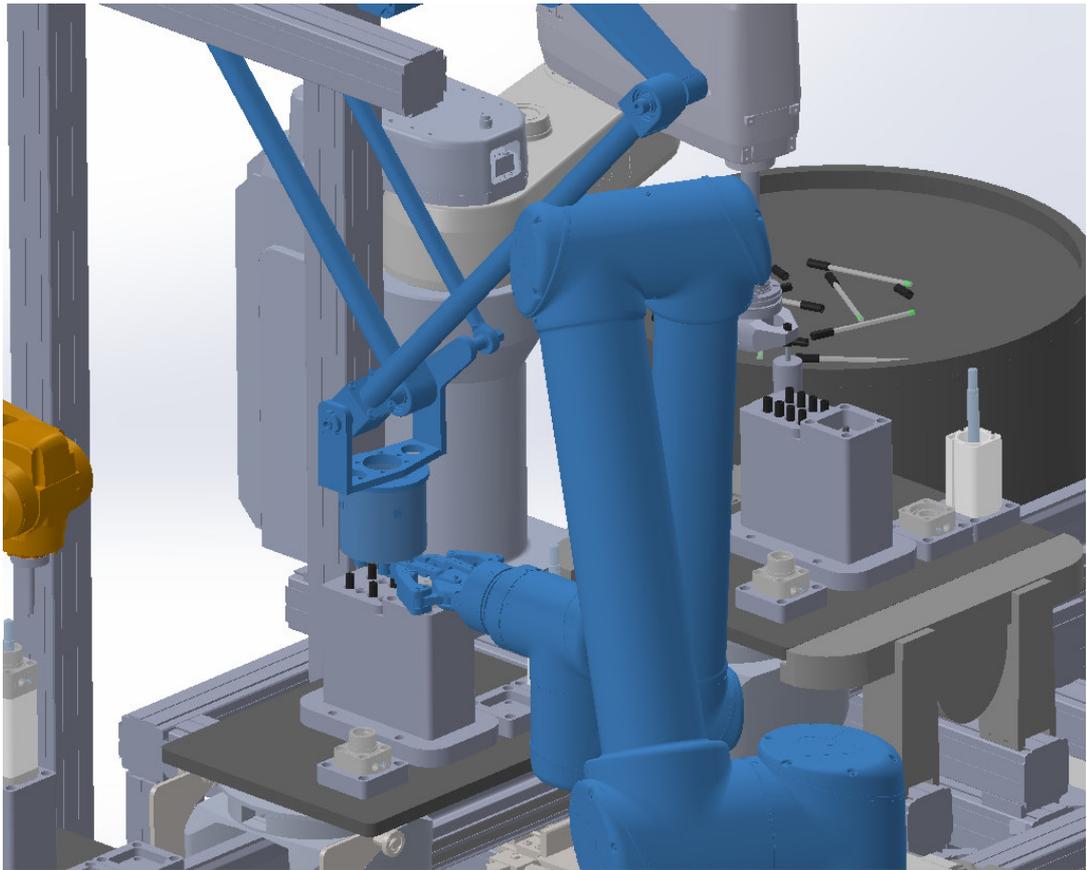


Abbildung 32 Kollision zwischen Parallelroboter und UR10

- Der Scara-Roboter (Abb. 33) muss aufgrund der Positionierung der Aufnahme des Zylinderrohr auf dem Werkstückträger eine ungünstige, beschleunigungsintensive Bewegung um das Zylinderrohr verfahren. Dies konnte relativ einfach durch das Verstellen der Aufnahme gelöst werden.

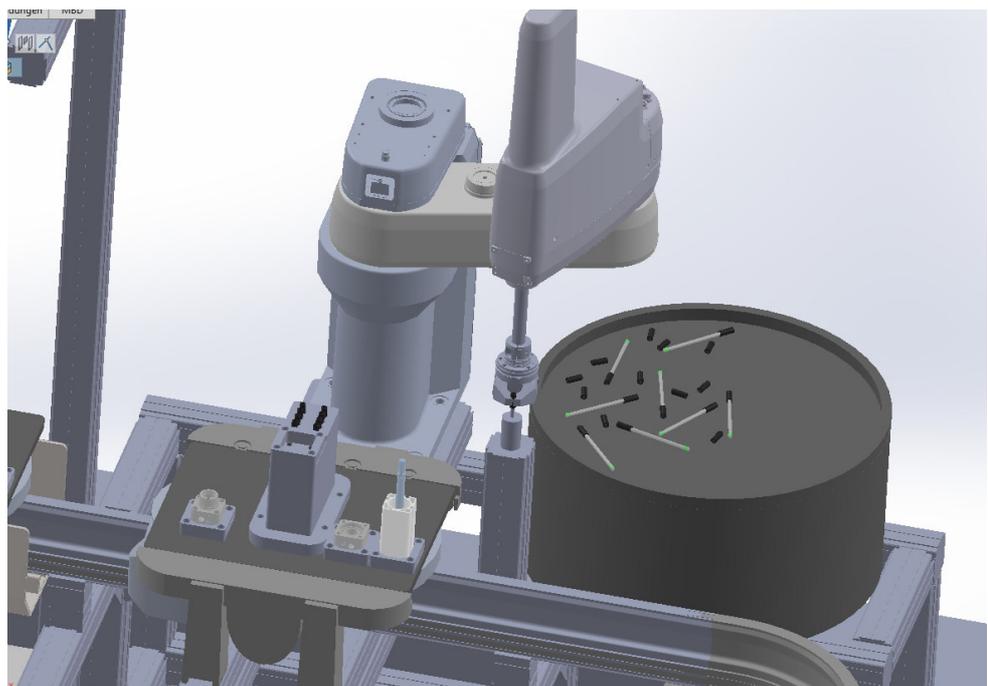


Abbildung 33 Scara-Station zur Platzierung von Muttern und Zugstangen

- Auf Vermutung hin wurde die Querschleunigung des verschraubten Zylinders mit dem Kippmoment abgeglichen. Dies ergab eine Querschleunigung von 5m/s^2 . Die maximale Querschleunigung des Zylinders darf jedoch nur $2,3\text{m/s}^2$ betragen, darüber hinaus kippt er. Gelöst wurde dies durch eine höhere Führung. Darüber hinaus sollten die Kurven nicht mit Höchstgeschwindigkeit durchfahren werden.
- Das Prototypen-Modell der Scara-Zange ist zu breit, um die Zugstangenmutter auf den Verschraubungs-Werkzeugträger zu platzieren. Gelöst werden kann dies durch eine Modifizierung der Zange, ohnehin ist eine vollständige Konstruktion nötig.

Zum Abschluss wird nun in Kapitel 4.2 eine Überprüfung in der virtuellen Realität durchgeführt.

4.2 Überprüfung in der Virtuellen Realität

Nachdem die Durchführbarkeit durch eine Simulation des Prozessablaufes hinreichend geprüft wurde, besteht die Möglichkeit einer weiteren Kontrolle in der Virtuellen Realität. Dassault Systems hat hierfür im Jahr 2019 ihr Ablegerprogramm eDrawings, welches zuvor ausschließlich zum Visualisieren von 3D-CAD Dateien verwendet wurde, mit einer neuen Funktion ausgestattet: eDrawings VR. eDrawings VR bietet Konstrukteuren und Ingenieuren zu ersten Mal die Möglichkeit, 3D-Modelle im virtuellen Raum zu analysieren. Die in Stereo dargestellten Modelle (linkes und rechtes Auge sehen verschiedene Bilder) ermitteln dem Nutzer eine räumliche Wahrnehmung, wie sie bis jetzt nur in der Realität möglich war. Dadurch ist es dem Nutzer erstmals

möglich, eine reale Vorstellung von der Größe des Modells zu bekommen. Auf Erfahrung basierte abgeschätzte Geometriegrößen wie z.B. Blechstärken oder Zylinderdurchmesser können so überprüft und gegebenenfalls noch direkt im Konstruktionsbüro abgeändert werden. So kann der Entwicklungszyklus eines Produktes drastisch gekürzt werden.



Abbildung 34 Ein Forscher des SMF-Labors nutzt das VR-Set zu Überprüfung des digitalen Modelles der Montagelinie

Das digitale Modell der Montagelinie wurde vor allem auf ergonomische und sicherheitsrelevante Aspekte überprüft. Dabei stellten sich unter anderem folgende Probleme heraus:

- Die Montageposition der hybriden Montagestation ist zwar ergonomisch gut platziert, hat jedoch den Nachteil, dass sie nahe am Fahrweg des KMR liegt (Abb. 37). Dies ist zwar sicherheitstechnisch nicht bedenklich, kann jedoch zum generellen Unwohlsein eines potenziell unwissenden Arbeiters führen. Eine Einschulung des Arbeiters ist daher unbedingt erforderlich.
- Eine ähnliche Problemstellung betrifft den UR10. Dieser wirkt aufgrund seiner Größe und dem fehlenden Schutzgehäuse bedrohlich, sofern der Arbeiter sitzt (Abb. 35). Auch dies bedarf einiger Eingewöhnungszeit.
- Der Abstand zwischen Arbeitsposition und Shuttle ist ziemlich gering. Dies kann bei unbedachten Bewegungen des Arbeiters zu Verletzungen führen. Auch hier wurde konstruktiv nicht eingegriffen, da die Verletzungswahrscheinlichkeit sehr gering ist. Im Falle einer industriellen Verwendung der Anlage wäre dies sicherlich nicht akzeptabel.
- Der Durchgang zwischen Scara-Roboter und Außenmauer ist ziemlich schmal (Abb. 36). Hier könnten einige Zentimeter durch Versetzen des Roboters gewonnen werden, was sich jedoch negativ auf den Prozessablauf ausgewirkt hätte. Auch hier wurde deshalb nichts unternommen, da die andere Seite ohnehin durch die Sicherheitstür erreichbar ist.
- Die Greifzange des Scara wirkt überdimensioniert. Eine Modifikation zwecks Gewichtsreduktion ist empfehlenswert.

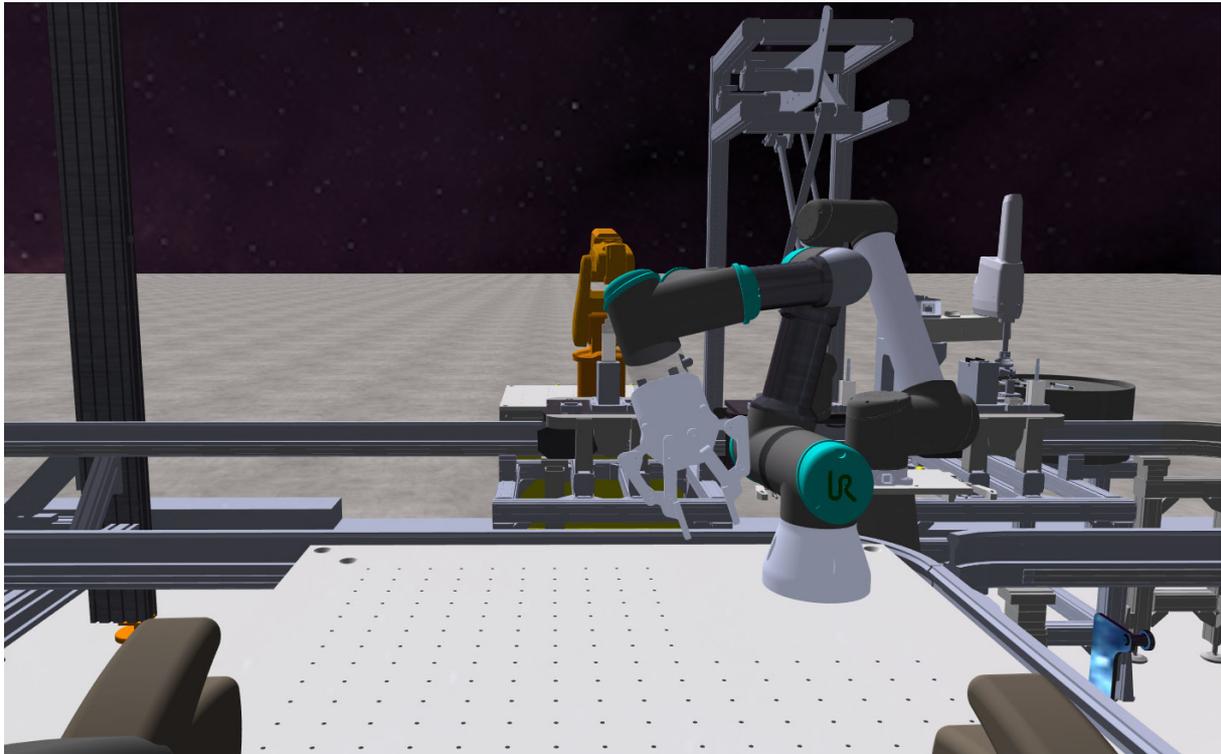


Abbildung 35 Perspektive des Werkers

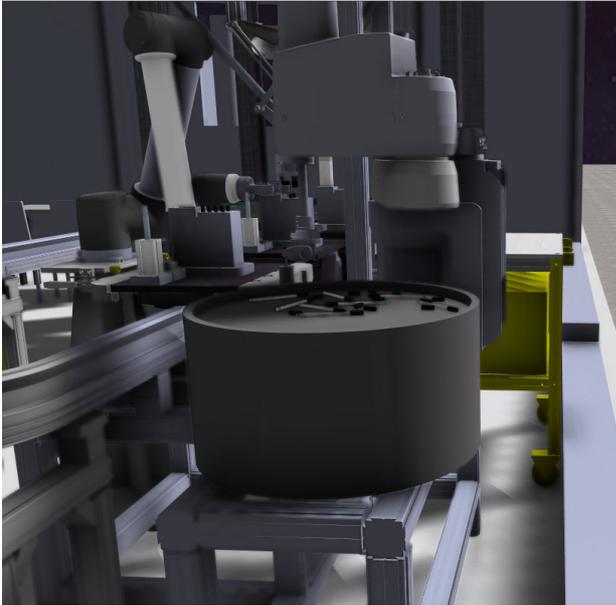


Abbildung 36 Durchgang zwischen Scara-Station und Glaswand

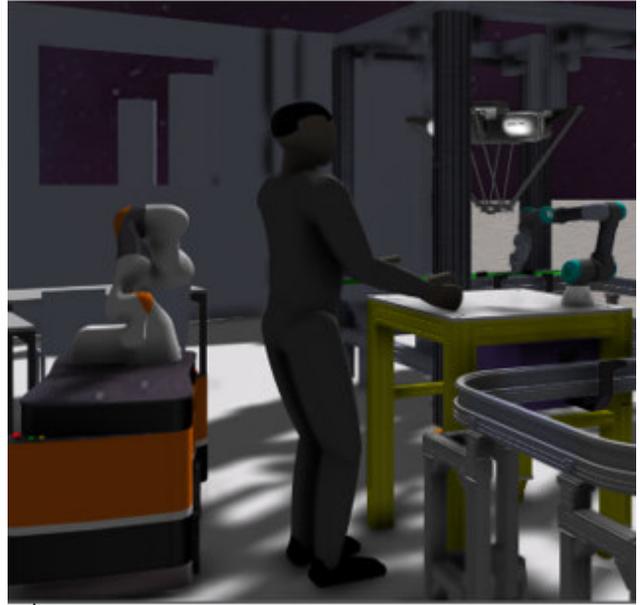


Abbildung 37 Geringer Abstand zwischen KUKA KMR und Werker

4.3 Fazit der digitalen und virtuellen Prüfung

Anhand der Animation und Virtuellen Prüfung konnten einige Unstimmigkeiten erkannt werden, welche im Laufe der Realisierung zu großen Problemen geführt hätten. Dazu zählen vor allem teure Anpassungskosten der Anlage und Roboter sowie Prozessinstabilität. Auf virtueller Ebene konnten vor allem psychologische Aspekte fassbarer gemacht werden. Dadurch kann der Arbeitsplatz und die Arbeitsumgebung ergonomischer und arbeitsfreundlicher gestaltet werden, was sich auf das Wohlbefinden und dadurch auch auf die Leistungsfähigkeit auswirkt.

5 Bewertung und Nutzenanalyse

Im folgenden Kapitel wird das digitale Modell nach qualitativen und quantitativen Kriterien bewertet und darauf basierend ein Fazit gezogen. Dabei bezieht sich die qualitative Bewertung auf alle Kriterien, die nicht quantifizierbar sind.

5.1 Qualitative Bewertung des Montagekonzepts

Das digitale Modell der teilautomatisierten Montagelinie konnte auf statischer und dynamischer Ebene auf seine Funktionstüchtigkeit geprüft werden. Im Folgenden eine Validierung der Systemelemente in Prozessablauffolge.

Der Kuka KMR iiwa wurde für die Kommissionierung beauftragt. Ausgehend davon, dass er bereits alle benötigten Teile auf seiner Transportplattform hat und im Milk-Run-Prinzip alle Stationen nachfüllt, sollte eine Umlaufzeit unter 5x92 Sekunden (ein Satz Bauteile besteht aus fünf Stück) locker machbar sein.

Die hybride Montagestation mit Mensch und UR3 wurde laut Aufgabenbeschreibung platziert und taktunabhängig integriert. Auf diese Weise ist der UR3 bei Produktionsstillstand immer noch für andere Forschungstätigkeiten verfügbar. Des Weiteren sind keinerlei mechanischen Änderungen notwendig.

Dem Scara-Roboter wurde zusammen mit Kameratechnik und seiner Flexbowl ein passender Prozessschritt zugewiesen. Im Gegensatz zu den restlichen Prozessschritten muss hier acht Mal pro Takt annähernd dieselbe Tätigkeit ausgeübt werden, also mit wesentlich höherer Geschwindigkeit. Durch die eigens konstruierte Zange eignet sich der Scara für die Handhabung von gleich zwei verschiedenen Einzelteilen. Die Realisierung der neuen modularen Roboterbasis und der Abtransport der Bestehenden sorgt für Freiraum.

Die Integration des Parallelroboters erwies sich aufgrund seiner begrenzten Bewegungsfreiheit als schwierig. Ob er laut Konzept für die Einführung der Zugstangen verwendet wird, ist fragwürdig. Die Rahmenstruktur erfordert vor den Einbau einige Modifikationen, Hardware und Software der Steuerung muss auf Schnittstellen geprüft werden und aufgrund der ungünstigen Positionierung muss ein Programm zur dynamischen Positionskontrolle geschrieben werden, um Kollisionen mit dem UR3 zu vermeiden.

Der ABB wird mit einem Industrieschrauber ausgerüstet und übernimmt das Anziehen der Zugstangen. Dies erfordert zwar einiger Nachprüfung, sollte jedoch durchaus machbar sein.

Der Adept Quattro s650 konnte in diesem Konzept keine passende Montageaufgabe finden und wird nur zur Entnahme des fertigen Bauteils verwendet. Eine Alternative dazu wäre, diesen Prozessschritt dem UR3 zu überlassen. Allerdings ist dabei zu prüfen, ob dieser die nötige Kraft aufbringt.

Platznutzung im SMF Labor: Die gesamte Linie ist kompakt und wird nur unwesentlich durch die hybride Montagestation in die Breite gezogen. Der hintere Teil der Produktionslinie bleibt für Modifikations- und Reparaturarbeiten zugänglich, ist aber auch gleichermaßen vor unbefugtem Zugriff durch Türen und Lichtschranken gesichert.

5.2 Quantitative Bewertung

In folgenden Unterkapitel werden die quantifizierbaren Aspekte der geplanten Montagelinie behandelt. Dazu zählen die Montagezeiten und die Umbaukosten. Die Kalkulation beschränkt sich auf eine grobe Abschätzung des erforderlichen Material- und Modifikationsaufwandes.

Montagezeiten

Im Folgenden eine Auflistung der ermittelten Montagezeiten. Montiert wurde hierbei vom Autor persönlich. In einem weiteren Experiment wurde dies von insgesamt acht Mitarbeitern des SMF Labors wiederholt, um die Standardabweichung der Montagezeiten zwischen verschiedenen Werkern zu ermitteln. Die daraus resultierenden Zeiten wurden vom Autor auf MTM-Ebene analysiert und flossen ebenfalls in diese Arbeit ein.

Auf der Tabelle wurde die Aufteilung der Montagezeiten markiert. Die blauen Rahmen markieren dabei die Prozessstätigkeiten dar, welche immer noch von Hand oder in Kollaboration mit dem UR3 erledigt werden. Die Summe der verbliebenen Montagezeiten beträgt 91,8 Sekunden, das entspricht einer Montagezeitreduktion von 27,8%.

Nach Realisierung der Montagelinie kann es zu Abweichungen kommen, aufgrund der Entkoppelung der hybriden Montagestation und der Transferlinie ist der Werker nicht taktgebunden und kann daher auf voller Leistung arbeiten. Eine Taktzeit von 92 Sekunden sollte für die restlichen Stationen kein Problem darstellen (Abb. 38).

Beschreibung der Tätigkeit	Nr.	Durchgang Nr.					Mittelwert [s]	Std.-Abw. [s]
		1 [s]	2 [s]	3 [s]	4 [s]	5 [s]		
Kolbenstange in Haltevorrichtung einstecken und O-Ring platzieren	1	7,0	6,5	6,8	6,3	5,9	6,5	0,13
Magnetring an Kolben anbringen	2	[8,6]	4,7	4,7	4,4	4,7	4,6	0,15
Kolbendichtung am Kolben anbringen	3	13,5	10,7	[19,7]	12,2	10,1	11,6	1,53
Kolben über den O-Ring auf die Kolbenstange aufchieben	4	5,3	5,2	[17,8]	5,7	3,7	5,0	0,88
Befestigungsschraube und Scheibe zusammenfügen und einführen	5	5,6	4,8	4,3	5,5	4,4	4,9	0,61
Befestigungsschraube zur Fixierung des Kolbens an der Kolbenstange festziehen und Teil weglegen	6	6,5	5,7	6,0	6,5	5,2	6,0	0,55
Führungsband am Kolben anbringen	7	5,3	4,3	4,7	4,4	5,9	4,9	0,67
Kolben in das Gehäuse einschieben und Teil weglegen	8	4,8	3,4	3,9	4,4	3,4	4,0	0,62
Dämpfungsichtung in den hinteren Zylinderdeckel einsetzen	9	13,3	11,7	13,4	14,7	12,9	13,2	1,08
Kolbenstangendichtung auf den vorderen Zylinderdeckel aufsetzen und einpressen	10	6,7	7,7	8,2	7,1	6,5	7,2	0,71
Dämpfungsichtung in den vorderen Zylinderdeckel einsetzen	11	9,8	8,5	10,1	10,7	9,3	9,7	0,83
Zugstangenmutter auf Werkstückhalterung aufstecken	12	9,4	8,3	8,1	7,4	9,7	8,6	0,95
Zylinderdeckel hinten auf die 4 Zugstangenmuttern aufstecken	13	2,2	2,4	2,7	2,3	2,4	2,4	0,19
Gehäuse mit eingestecktem Kolben auf Zylinderdeckel hinten anbringen	14	3,6	2,8	1,9	3,2	2,7	2,8	0,63
Zylinderdeckel vorne auf Gehäuse anbringen	15	4,1	2,2	3,0	2,5	2,3	2,8	0,78
4 Zugstangen einführen	16	7,9	7,6	10,4	9,2	8,1	8,6	1,15
Zugstangen mit Industrieschrauber festziehen	17	[14,3]	9,8	10,0	10,8	10,2	10,2	0,47
Kolbenstangenmutter ansetzen und bis zur Mitte aufdrehen	18	6,7	[14,2]	5,7	4,6	5,4	5,6	0,87
Schutznetz über den Zylinder ziehen	19	6,1	5,9	4,4	5,1	4,1	5,1	0,88
fertigen Pneumatikzylinder in die Fertigteilkiste legen	20	4,0	5,2	2,5	3,0	2,0	3,3	1,28
SUMME							127,2	

Abbildung 38 Aufteilung der Montagezeiten

Kosten für den Umbau

Die Kalkulation der Kosten kann erst nach der genaueren Konstruktion der für die Umsetzung erforderlichen Zangen, Werkstückträger und Roboteraufnahmen exakt quantifiziert werden. Nichtsdestotrotz wurde eine Schätzung gemacht. Diese wurde in eine Tabelle eingetragen. In Tabelle 3 werden zwecks Nachvollziehbarkeit kostenrelevante Hintergrundinformationen gegeben.

Tabelle 3 Kostenaufstellung

Baugruppe	Teil	Kosten
Werkstückträger	Alubasis	160,00 €
	Einsätze	160,00 €
	3D-Druckteil	50,00 €
Scara Greifer	3D-Druckteil	50,00 €
	Servomotor	10,00 €
	Servomotor 2	10,00 €
Scara-Basis	Aluminiumprofile	250,00 €
	Verbinder	150,00 €
	Basisplatte	150,00 €
	Füße	30,00 €
Rahmen Parallelroboter	Aluminiumprofile	300,00 €
	Verbinder	150,00 €
Schrauberhalterung	Frästeil	500,00 €
Greifer Quattro	Frästeil	1.000,00 €
Robotiq UR10	Kaufteil	4.000,00 €
Lichtbarriere SICK	Kaufteil	1500,00 €
		8.470,00 €

Folgende Auflistung erläutert die einzelnen Kostenabschätzungen:

- Der Werkstückträger muss auf der Mutterschraubposition aus einer massiven Aluminiumplatte bestehen, mit Inbuseinsätzen aus gehärtetem Stahl. Die restlichen Haltepositionen für Deckel vorne und hinten, Gehäuse mit Kolben und Zugstangen können mit dem 3D-Drucker des FabLabs gefertigt werden.
- Dem Greifer für den Scara Roboter sollte besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Die Aufnahme könnte wieder als 3D-Druckteil realisiert werden. Dies hätte mehrere Vorteile: der Konstruktionsaufwand ist wesentlich geringer als bei einer vergleichbaren Aluminiumvariante, die Realisierung kann hausintern erfolgen, die Materialkosten sind geringer und es bestehen praktisch keine Lieferzeiten. Darüber hinaus besteht aufgrund der niedrigen Festigkeit im Kollisionsfall keine Gefahr für den Roboter.

Die Aktuatoren für den Greifer, also die Schrittmotoren, können aus dem Arduino-Baukasten der FabLabs entnommen werden. Auch dies erweist sich als kostengünstige Lösung. Alternativ könnte auch eine pneumatische Variante in Erwägung gezogen werden.

- Die für die neue Basis des Scara-Roboters notwendigen Aluminiumprofile müssen bei Montratec nachgefragt werden, alternativ wird man sie auch nach einiger Recherche im Internet bei anderen Anbietern finden. Des Weiteren wird eine Aluminiumplatte als Basis benötigt. Auch der Stauraum für die Steuerungselektronik muss bedacht werden.
- Die Modifikation des Rahmens des Parallelroboters erfordert ebenfalls einige Aluminiumprofile, vorzugsweise desselben Typs wie die von Montratec verwendeten. Dies würde in Zukunft weitere flexible Umbauten ermöglichen.
- Die Schrauberhalterung des ABB IRB 120 erfordert ein CAD-Modell. Von einer Realisierung im 3D-Drucker ist aufgrund der hohen auftretenden Kräfte eher abzuraten, doch da sich die Größe und Komplexität der Konstruktion in Grenzen halten wird, sollten die Kosten im überschaubaren Rahmen bleiben.
- Der Greifer des Adept Quattro kann eingekauft oder selbst gebaut werden. Im Übrigen ist dessen Implementierung in den Prozessablauf nicht zwingend notwendig, da die Montage erst an der hybriden Montagestation abgeschlossen ist.
- Der UR10 benötigt zur Manipulation der Bauteile einen drucksensiblen Greifer. Dessen Kostenpunkt wurde vom UR3-Greifer der Marke Robotiq übernommen.

5.3 Fazit der Bewertung und Handlungsempfehlungen

Bei Betrachtung der Ergebnisse kann gesagt werden, dass sich das erarbeitete Konzept vor allem aufgrund seiner modularen Realisierbarkeit für das SMF-Labor eignet. Basis bildet hierbei die zur Kommissionierung eingesetzte Scara-Roboterstation. Der Abbau der Einhausung erfordert zwar einiges an Aufwand, entspricht aber durch Umrüstung auf optische Sicherheitstechnik wie Stereokameras oder handelsüblichen Lichtschranken wesentlich mehr den Prinzipien von Industrie 4.0. Der Arbeitsablauf scheint nach eingehender virtueller Prüfung störungsfrei und prozesssicher durchführbar zu sein. Aufgrund der hohen Zeitersparnis wäre eine Realisierung also sinnvoll. Darüber hinaus arbeitet diese Arbeitsstation autonom und kann auch bei Ausfall der restlichen Station betrieben werden.

Der Einsatz des Parallelroboters zum Einschieben der Zugstangen scheint eher eine Notlösung. Da es sich um eine reine Pick-and-Place Aufgabe an vordefinierten Punkten handelt, wäre hier aus wirtschaftlicher Perspektive eine Verwendung von zwei Pneumatikzylindern oder Linearaktoren zu empfehlen. Dies würde die Anpassung der Rahmenstruktur überflüssig machen. Alternativ könnte diese Aufgabe an der Scara-Station erledigt werden, was den Aufbau des Werkstückträgers vereinfachen würde.

Die Verschraubung durch den ABB mithilfe eines Industrieschraubers kann mit oder ohne Beihilfe des UR10 gelöst werden. Der Materialaufwand hält sich in Grenzen, eine Umsetzung ist darum zu empfehlen.

Die zentrale Positionierung der UR10 ermöglicht ein unterstützendes Eingreifen in drei Prozessschritten. Das Zusammenfügen von Deckel hinten, Gehäusebaugruppe und Deckel vorne hat weder in der manuellen Montage noch in der Prozesssimulation Schwierigkeiten bereitet. Die Möglichkeit, diesen Vorgang je nach Bedarf an der Scara-Station oder an der Parallelroboterstation durchzuführen, sorgt für Flexibilität. Da keine Investitionen notwendig sind ist auch dieser Teil des Konzeptes zu empfehlen.

Die Quattro-Station dient als Pufferspeicher. Vor der Realisierung sollte geprüft werden, ob der verschraubte Zylinder an der hybriden Montagestation vom UR3 Roboter entnommen werden kann. Dies würde die Durchlaufzeit reduzieren und die Quattro-Station frei für andere Aufgaben machen.

Die hybride Montagestation bleibt in ihrer derzeitigen Form bestehen und kann ihre volle Kapazität auf nicht automatisierbare Prozesse fokussieren. Der UR3 Roboter übernimmt den Teiletransfer zwischen Transportshuttle und Arbeitsfläche, wodurch dem Menschen ergonomisch ungünstige Bewegungen erspart werden.

Die Integration des Kuka KMR als mobile Kommissionierungsvorrichtung entspricht der Natur des Roboters.

6 Zusammenfassung

Das folgende Kapitel fasst die Arbeit zusammen. Dabei dient jeder einzelne Absatz als Kurzfassung eines Kapitels. Dieser Abschnitt ist in den Sprachen Deutsch, Italienisch und Englisch verfügbar.

6.1 Deutsche Fassung

Die vorliegende Arbeit hat als zentrales Element die Prozesskonzipierung und die Layoutplanung einer Montagelinie im Smart Mini Factory Labor. Basis hierfür bildete die Transferlinie Montrac und eine Vielzahl kollaborativer und nicht kollaborativer Roboter, sowie diverse manuelle Montagestationen von Bosch-Rexroth. Der Aufbau gliedert sich in einen theoretischen Literaturrechercheteil und einen praktischen Teil zur Konzepterstellung und digitalen Modellierung.

Der Fokus der Literaturrecherche liegt vor allem in der Vermittlung von Fachwissen im Bereich Montage. Begonnen wird mit der Begriffserklärung, um für eine einheitliche Sprache zu sorgen. Im Folgenden wird auf die aktuelle Lage der Industrie und deren bevorstehenden Herausforderungen eingegangen. Diese umfassen unter anderem die Anpassung bestehender Montagesysteme an einer sich kontinuierlich verbreiternden Produktpalette, Reduzierung von Rüstzeiten sowie die Anwendung von rekonfigurierbaren Montagekonzepten. Den Abschluss bildet eine Einführung in die Methodik der Montageplanung, speziell das 11-Schritte Modell von Lotter welches auch im praktischen Teil Anwendung findet. Im nächsten Unterkapitel werden die Stufen der Automatisierung behandelt. Hier werden manuelle, teilautomatisierte bzw. hybride und vollautomatisierte Montagesysteme behandelt, auf deren Vor- und Nachteile eingegangen und dienen so zu gesamtheitlichen Verständnis der Einsatzmöglichkeiten von hybriden Montagesystemen. Im letzten Abschnitt wird ein spezieller Teilbereich der hybriden Montagesysteme behandelt, der Mensch-Maschine Kollaboration. Diese bildet durch hohe Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit, kurze Amortisationszeiten und niedrigen Prozesskosten eine ideale Lösung für Produkte mit hoher Variantenvielfalt und mittleren Losgrößen.

Das dritte Kapitel behandelt die Ausarbeitung des Montagekonzeptes sowie dessen Übertragung in die Virtuelle Realität in Form eines digitalen Modells. Basis für die Ausarbeitung des Konzeptes bildet die Produktanalyse, die Analyse der manuellen Montageprozesse inklusive der Montagezeiten, sowie Analyse der Hardwarekomponenten, also Roboter, manuelle Montagestationen und Transferlinie. Anhand des angeeigneten Wissens im Bereich Montagetechnik, sowie einer präzisen Analyse des Ist-Zustandes, kann nun ein Prozessablauf ausgearbeitet werden, welcher der Aufgabenbeschreibung bestens gerecht werden sollte. Das Konzept wird mit dem bestehenden Layout abgeglichen, eine realisierbare Lösung erarbeitet und die verfügbare Hardware auf Basis ihres Fähigkeitsprofils den notwendigen Prozessschritten zugeordnet. Für eine weitere Konkretisierung des Konzeptes wurde ein 3D-Modell erarbeitet. Für dessen Erstellung wurden Einzelmodelle der Hardware besorgt oder konstruiert, um diese dann zu einem vollständigen digitalen Modell der Montagelinie zusammenzufügen.

Im darauffolgenden Kapitel wurde mithilfe der Software SolidWorks anhand des bestehenden digitalen Montagelinienmodells der komplette Montageablauf simuliert, auf

seine Durchführbarkeit überprüft, anfallende Probleme analysiert und konstruktive Maßnahmen abgeleitet. Im Abschluss wurde die VR-Brille Oculus Rift eingesetzt, um das Modell auf ergonomischer und praktischer Ebene zu überprüfen. Hier fielen besonders sicherheitsrelevante Aspekte ins Auge.

Im fünften Kapitel wurde das fertige Konzept und Modell nach qualitativen und quantitativen Kriterien bewertet. Dies beinhaltet eine Kalkulation der Montagezeiten und Materialkosten sowie eine Funktionsbewertung und Nutzenanalyse auf empirischer Basis. Als konkrete Handlungsempfehlung wurde eine teilweise Realisierung des Konzeptes empfohlen.

6.2 Italienische Fassung

L'elemento centrale del presente lavoro è la concezione del processo e la pianificazione del layout di una linea di montaggio nel laboratorio Smart Mini Factory. La base è stata la linea di trasferimento Montrac e una varietà di robot collaborativi e non collaborativi, oltre a varie stazioni di assemblaggio manuale di Bosch-Rotrex. La struttura è divisa in una parte di ricerca teorica sulla letteratura e una parte pratica.

Il focus della revisione della letteratura è principalmente sul trasferimento di conoscenze esperte nel campo dell'assemblaggio. Si inizia con una definizione dei termini per garantire un linguaggio uniforme. In seguito, verranno discusse la situazione attuale dell'industria e le sue prossime sfide. Questi includono l'adattamento dei sistemi di assemblaggio esistenti a una gamma di prodotti in continua espansione, la riduzione dei tempi di allestimento e l'applicazione di concetti di assemblaggio riconfigurabili. Segue un'introduzione alla metodologia di pianificazione dell'assemblaggio, in particolare il modello a 11 fasi di Lotter viene trattato e ripreso nella parte pratica. Il prossimo sottocapitolo si occupa delle fasi dell'automazione. Qui vengono esaminati i sistemi di assemblaggio manuali, parzialmente automatizzati, ibridi e completamente automatizzati e i loro vantaggi e svantaggi, fornendo così una comprensione generale delle possibili applicazioni dei sistemi di assemblaggio ibridi. L'ultima sezione si occupa di una speciale sottoarea dei sistemi di assemblaggio ibridi, la collaborazione uomo-macchina. Grazie alla sua alta flessibilità, riconfigurabilità, brevi tempi di ammortamento e bassi costi di processo, è una soluzione ideale per prodotti con un gran numero di varianti e lotti di medie dimensioni.

Il terzo capitolo si occupa dell'elaborazione del concetto di montaggio e del suo trasferimento alla realtà virtuale sotto forma di modello digitale. La base per l'elaborazione del concetto è l'analisi del prodotto, l'analisi dei processi di assemblaggio manuale inclusi i tempi di assemblaggio, così come l'analisi dei componenti hardware, cioè robot, stazioni di assemblaggio manuale e linea di trasferimento. Sulla base delle conoscenze acquisite nel campo della tecnologia di assemblaggio, così come un'analisi precisa dello stato attuale, si potrebbe elaborare un flusso di processo che dovrebbe soddisfare la descrizione del compito nel miglior modo possibile. Il concetto sarà ora confrontato con il layout esistente, sarà elaborata una soluzione fattibile e l'hardware disponibile sarà assegnato alle fasi del processo necessarie sulla base del suo profilo di capacità. Per un'ulteriore concretizzazione del concetto è necessario un modello 3D. Per la sua creazione, vengono procurati o costruiti modelli individuali dell'hardware per poi combinarli in un modello digitale completo della catena di montaggio.

Nel capitolo seguente, il processo di assemblaggio completo viene simulato con l'aiuto del software SolidWorks sulla base del modello di linea di assemblaggio digitale esistente e viene controllata la sua fattibilità e vengono risolti i problemi che si presentano. Infine, gli occhiali VR Oculus Rift sono utilizzati per verificare il modello a livello ergonomico e pratico. Qui, soprattutto gli aspetti rilevanti per la sicurezza hanno attirato l'attenzione.

Nel quinto capitolo, il concetto finito e il modello sono valutati secondo criteri qualitativi e quantitativi. Questo include un calcolo dei tempi di montaggio e dei costi dei materiali, nonché una valutazione funzionale e un'analisi dei benefici su base empirica. Come raccomandazione concreta per l'azione, si raccomanda una realizzazione parziale del concetto.

6.3 Englische Fassung

The present work has as its central element the process conception and layout planning of an assembly line in the Smart Mini Factory laboratory. The basis for this was the Montrac transfer line and a variety of collaborative and non-collaborative robots, as well as various manual assembly stations from Bosch-Rotrex. The structure is divided into a theoretical literature research part and a practical part.

The focus of the literature review is mainly on the transfer of expert knowledge in the field of assembly. It starts with a definition of terms in order to ensure a uniform language. In the following, the current situation of the industry and its upcoming challenges will be discussed. These include the adaptation of existing assembly systems to a continuously expanding product range, the reduction of set-up times and the application of reconfigurable assembly concepts. This is followed by an introduction to the methodology of assembly planning, in particular Lotter's 11-step model, which is examined and taken up again in the practical part. The next subchapter deals with the stages of automation. Here, manual, partially automated, hybrid and fully automated assembly systems and their advantages and disadvantages are discussed, thus providing an overall understanding of the possible applications of hybrid assembly systems. In the last section, a special subarea of hybrid assembly systems is treated: human-machine collaboration. Due to its high flexibility, reconfigurability, short amortization times and low process costs, it is an ideal solution for products with a large number of variants and medium batch sizes.

The third chapter deals with the development of the assembly concept and its transfer to virtual reality in the form of a digital model. The basis for the development of the concept is the product analysis, the analysis of the manual assembly processes including the assembly times, as well as the analysis of the hardware components, i.e. robots, manual assembly stations and transfer line. Based on the acquired knowledge in the field of assembly technology, as well as a precise analysis of the actual state, a process flow could be worked out, which should meet the task description in the best possible way. The concept will now be compared with the existing layout, a feasible solution will be worked out and the available hardware will be assigned to the necessary process steps based on its capability profile. For a further concretization of the concept, a 3D model is required. To create this, individual models of the hardware are

procured or constructed in order to then combine them into a complete digital model of the assembly line.

In the following chapter, the SolidWorks software is used to simulate the complete assembly process on the basis of the existing digital assembly line model, to check its feasibility and to solve any problems that arise. In the conclusion, the VR goggles Oculus Rift are now used to check the model on an ergonomic and practical level. Here, safety-relevant aspects in particular caught the eye.

In the fifth chapter, the finished concept and model are evaluated according to qualitative and quantitative criteria. This includes a calculation of assembly times and material costs as well as a functional evaluation and benefit analysis on an empirical basis. As a concrete recommendation for action, a partial realization of the concept is recommended.

7 Begriffe, Definitionen und Abkürzungen

CAD	Computer A ided D esign
CPS	Cyber- P hysisches S ystem
DIN	D eutsches I nstitutfür N ormung
KMR	K UKA M obile R obotic
MRK	M ensch- R oboter- K ollaboration
SMF	S mart M ini F actory Labor
SCARA	S elective C ompliance A ssembly R obot A rm

8 Literaturverzeichnis

ABELE ET AL., 2019

Abele, E., Metternich, J., & Tisch, M. (2019). Learning Factories. In Concepts, Guidelines, Best-Practice Examples. Springer Cham, Switzerland.

AKELLA ET AL., 1998

Akella, M.; Peshkin, M.; Colgate, E.; Wannasuphoprasit, W.: Cobots – A Novel Material Handling Technology. Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting. 1 – 7, 1998.

ALBU-SCHÄFFER ET AL., 2007

Albu-Schäffer, A.; Haddadin, S.; Ott, Ch.; Stemmer, A.; Wimböck, T.; Hirzinger, G.: Industrial Robot 34 (5): 376 – 385, 2007.

BARTENSCHLAGER ET AL., 1998

Bartenschlager, J.; Hebel, H.; Schmidt, G.: Handhabungstechnik mit Robotertechnik – Funktion, Arbeitsweise, Programmierung. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1998.

BAUER. 2016

Bauer, W., Bender, M., Braun, M., Rally, P., & Scholtz, O. (2016). Leichtbauroboter in der manuellen Montage–einfach einfach anfangen. IRB Mediendienstleistungen, Stuttgart.

BECKER, 2018

Becker J.H. (2018) Kreativitätstechniken. In: Praxishandbuch berufliche Schlüsselkompetenzen. Springer, Berlin, Heidelberg

BERNHARDT ET AL., 2007

Bernhardt, R.; Surdilovic, D.; Katschinski, V.; Schröder, K.: Flexible Assembly Systems through Workplace-Sharing and Time-Sharing Human-Machine Cooperation. IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'07), Alicante Spain, May. 23 – 25, 282 – 286.

BLEY ET AL., 2004

Bley, H.; Reinhart, G.; Seliger, G.; Bernardi, M.; Korne, T.: Appropriate Human Involvement in Assembly and Disassembly. CIRP Annals – Manufacturing Technology 53 (2): 487 – 509, 2004.

COLGATE ET AL., 1996

Colgate, J. E.; Wannasuphoprasit, W.; Peshkin, M.: Cobots Robots for Collaboration with Human Operator. Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol. 58. 433 – 440, 1996.

DIN 8593, 1996

DIN 8593, Fertigungsverfahren Fügen. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin, Köln: Beuth-Verlag, 1996.

DIN ISO/TS 15066, 2017

DIN ISO/TS 15066; DIN SPEC 5306:2017-04. Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter (ISO/TS 15066:2016). Berlin: Beuth Verlag

BEJARANO, 2019

Bejarano, R., Ferrer, B. R., Mohammed, W. M., & Lastra, J. L. M. (2019, July). Implementing a Human-Robot Collaborative Assembly Workstation. In 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN) (Vol. 1, pp. 557-564). IEEE.

FRUTIG, 2013

Frutig, M.: (Leichtbau-)Roboter sind im Kommen; Sie sind klein, flink, sicher und immer schneller und billiger – Leichtbauroboter im täglichen Einsatz. Technica – die Fachzeitschrift für die Maschinen-, Elektro- und Metallindustrie. ISSN 0040-0866, 62. Jahrgang 2013. 6/7.2013: 44 – 49, 2013.

GALIN, 2019

Galin R., Meshcheryakov R. (2019) Review on Human–Robot Interaction During Collaboration in a Shared Workspace. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) Interactive Collaborative Robotics. ICR 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11659. Springer

GUST, 2018

Gust, P.: Konstruieren: Produkte methodisch entwickeln. Buch Maschinenbau: Skolaut, W.; Wallaschek, J.; Maschinenbau-Ein Lehrbuch für das ganze Bachelor-Studium, Springer-Verlag; 2018, 811-845.

HELMS ET AL., 2002

Helms, E.; Schraft, R. D.; Hägele, M.: rob@work: Robot Assistant in Industrial Environments. Proceedings of the 11th IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication, ROMAN2002, Berlin, Germany, September. 25 – 27, 399 – 404, 2002.

HESSE UND SEITZ, 1996

Hesse, S.; Seitz, G.: Robotik – Grundwissen für die berufliche Bildung. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1996.

HESSE UND MALISA, 2010

Hesse, S.; Malisa, V. (Hrsg.): Taschenbuch Robotik – Montage – Handhabung. München: Carl Hanser Verlag, 2010.

HOLLE, 2002

Holle, W.: Rechnerunterstützte Montageplanung – Montageplanung und Simultaneous Engineering. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2002.

ISO TR 8373, 1993

ISO TR 8373: Manipulating industrial robots – Vocabulary. o.O., 1993.

IONESCU, 2021

Ionescu, T. B., & Schlund, S. (2021). Programming cobots by voice: A human-centered, web-based approach. *Procedia CIRP*, 97, 123-129.

KIRIGIS, 2016

Kirgis, F. P., Katsos, P., & Kohlmaier, M. (2016). Collaborative robotics. In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* (pp. 448-453). Springer, Cham.

KAGERMANN ET AL., 2013

Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., & Wahlster, W. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group. Forschungsunion

KONOLD UND REGER, 2003

Konold, P.; Reger, H.: Praxis der Montagetechnik – Produktdesign, Planung, Systemgestaltung. 2. Aufl. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GVWV Fachverlage GmbH, 2003.

KRÜGER ET AL., 2006

Krüger, J.; Bernhardt, R.; Surdilovic, D.; Seliger, G.: Intelligent Assist Systems for Flexible Assembly. Annals of the CIRP 55: 29 – 33, 2006.

KRÜGER ET AL., 2009

Krüger, J.; Lien, T. K.; Verl, A.: Cooperation of human and machines in assembly lines. CIRP Annals – Manufacturing Technology 58: 628 – 646, 2009.

LANDAU UND LUCZAK, 2001

Landau, K.; Luczak, H.: Ergonomie und Organisation in der Montage. München Wien: Hanser Verlag, 2001.

LIEN UND RASCH, 2001

Lien, T. K.; Rasch, F. O.: Hybrid Automatic-Manual Assembly Systems. CIRP Annals – Manufacturing Technology 50 (1): 21 – 24, 2001.

LOTTER 1982

Lotter, B.: Arbeitsbuch der Montagetechnik. Mainz: Vereinigte Fachverlage, 1982.

LOTTER, 1992

Lotter, B.: Wirtschaftliche Montage, 2. Aufl., Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992.

LOTTER, 2004

Lotter, B.: Marktorientierte Montagesysteme. Vortragsmanuskript IAO-Seminar Kundenindividuelle Montage, 2004.

LOTTER UND SCHILLING, 1994

Lotter, B.; Schilling, W.: Manuelle Montage. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.

LOTTER UND WIENDAHL, 2012

Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion – Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.

LOTTER ET AL., 1998

Lotter, B.; Hartel, M.; Menges, R.: Manuelle Montage wirtschaftlich gestalten. Remmingen: Expert Verlag, 1998.

MATT, 2014

Matt, D.: Produktionssysteme und Industrielogistik. Vorlesungsskriptum. Freie Universität Bozen, 2014

NACHTIGALL, 1998

Nachtigall, W.: Bionik, Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Springer-Verlag, 1998.

NEUGEBAUER, 2018

Neugebauer, R.: Digitalisierung - Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft. Springer-Verlag

OBERER UND SCHRAFT, 2007

Oberer, S.; Schraft, R.-D.: Robot-Dummy Crash Tests for Robot Safety Assessment. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, April. 10 – 14, 2934 – 2939, 2007.

SCHLATTMANN UND SEIBEL, 2017

Schlattmann J., Seibel A. (2017) Methodisches Vorgehen im Entwicklungsprojekt. In: Aufbau und Organisation von Entwicklungsprojekten. Springer Reference Technik. Springer, Berlin, Heidelberg

SCHERER, 2007

Scherer, J.; Kreativitätstechniken – In 10 Schritten finden, bewerten, umsetzen GABAL Verlag GmbH, Offenbach 2007.

SCHMIDT, 1992

Schmidt, M.: Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1992.

SCHRAFT ET AL., 2005

Schraft, R. D.; Meyer, C.; Parlitz, C.; Helms, E.: PowerMate – A Safe and Intuitive Robot Assistant for Handling and Assembly Tasks. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA, April. 18 – 22, 4074 – 4079, 2005.

STEIL, 2020

Steil, J. J., & Maier, G. W. (2020). Kollaborative Roboter: universale Werkzeuge in der digitalisierten und vernetzten Arbeitswelt. In Handbuch Gestaltung digitaler und vernetzter Arbeitswelten (pp. 323-346). Springer, Berlin, Heidelberg.

WINKELHOFER, 2006

Winkelhofer, G.; Kreativ managen. Leitfaden für Unternehmer, Manager und Projektleiter. Springer Verlag, 2006.

THIEMERMANN UND SCHRAFT, 2003

Thiemermann, S.; Schraft, R. D.: team@work – Mensch-Roboter-Kooperation in der Montage. Automatisierungstechnische Praxis atp Praxis der Mess-, Steuerungs- und Informationstechnik, Vol. 45 (11): 31 – 35, 2003.

VDI 2861, 1988

VDI 2861, Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.) VDI-Richtlinie 2861: Montage- und Handhabungstechnik; Kenngrößen für Industrieroboter; Bl. 1: Achsbezeichnungen; Bl. 2: Einsatzspezifische Kenngrößen; Bl. 3: Prüfung der Kenngrößen; Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988.

VDI 2860, 1990

VDI 2860, Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.) VDI-Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990.

WARNECKE, 1984

Warnecke, H.-J.: Der Produktionsbetrieb. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1984.

WARNECKE, 1992

Warnecke, H.-J.: Die fraktale Fabrik. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1992.

WARNECKE ET AL., 1975

Warnecke, H.-J.; Löhr, H.-G.; Kiener, W.: Montagetechnik – Schwerpunkt der Rationalisierung. Mainz: Krausskopf, 1975.

WIENDAHL ET AL., 2004

Wiendahl, H.-P.; Gerst, D.; Keunecke, L. (Hrsg.): Variantenbeherrschung in der Montage. Konzept und Praxis der flexiblen Endstufe. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2004.

ZAEH UND PRASCH, 2007

Zaeh, M. F.; Prash, M.: Systematic Workplace and Assembly Redesign for Aging Workforces. Production Engineering Research and Development 1: 57 – 64, 2007.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Struktur der Arbeit	3
Abbildung 2 Kostenverursachung und Kostenverantwortung (Lotter und Wiendahl, 2012).....	6
Abbildung 3 Planungssystematik nach Lotter (1992)	7
Abbildung 4 Do-It-Ideenprozess (Scherer,2007)	11
Abbildung 5 Auswahlkriterien für Montagesysteme (Lotter und Wiendahl, 2012)	12
Abbildung 6 Charakteristiken von Montagesystemen (Lotter, 2004)	13
Abbildung 7 Zu berücksichtigende Aspekte bei der Gestaltung eines manuellen Montagesystems (Lotter und Wiendahl, 2012)	14
Abbildung 8 Arten der Verkettung von mehreren Arbeitsstationen (Lotter und Wiendahl, 2012)	19
Abbildung 9 Einteilung der maschinellen Montageeinrichtungen (Hesse, 2010).....	19
Abbildung 10 Formen der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter (Bauer, 2016).....	22
Abbildung 11 Kooperative Montage einer Armauflage	23
Abbildung 12 Kollaborative Montage eines Doppelkupplungsgetriebes	23
Abbildung 13 Schnittbild des Kuhnke-Pneumatikzylinders.....	27
Abbildung 14 Explosionszeichnung des Kuhnke-Pneumatikzylinders (Quelle: Kuhnke).....	28
Abbildung 15 Montagevorranggraph des Pneumatikzylinders.....	32
Abbildung 16 Mögliche Umlaufbahnen der Transportshuttles.....	40
Abbildung 17 Abbildung 17 PU-4 (Montrac, 2020)	40
Abbildung 18 Supotrac (Montratec, 2020)	40
Abbildung 19 Einteilung in Bereiche.....	41
Abbildung 20 Prozesszuweisung	42
Abbildung 21 Zusammenfassung	43
Abbildung 22 Reichweite Roboter	44
Abbildung 23 KUKA KMR iiwa mit Einzelteilbehälter	45
Abbildung 24 Hybride Montagestation mit UR3.....	45
Abbildung 25 Vorläufige Version der Aufnahme der Mutterköpfe	47
Abbildung 26 User-Interface von SolidWorks.....	49
Abbildung 27 Positionierung der drei Industrieroboter und des UR10.....	51
Abbildung 28 Lichtraumprofil entlang des Pfades des Transfershuttles.....	52
Abbildung 29 Neukonstruktion der Basis des SCARA-Roboters.....	52
Abbildung 30 T-Bauform der Lichtschranken	53
Abbildung 31 Ansicht der kompletten Montagelinie im eDrawings.....	53
Abbildung 32 Kollision zwischen Parallelroboter und UR10	55
Abbildung 33 Scara-Station zur Platzierung von Muttern und Zugstangen	55
Abbildung 34 Ein Forscher des SMF-Labors nutzt das VR-Set zu Überprüfung des digitalen Modelles der Montagelinie	56
Abbildung 35 Perspektive des Werkers	57
Abbildung 36 Durchgang zwischen Scara-Station und Glaswand.....	58
Abbildung 37 Geringer Abstand zwischen KUKA KMR und Werker.....	58
Abbildung 38 Aufteilung der Montagezeiten	60