

# Schlussbericht des Verbundes

- öffentlich einsehbar -

## SimUltane Produkt- und Prozessentwicklung eines automatisierungsgerechten Ladestation-Outlet-Moduls (SUPPLY)

Wenn zur Wahrung berechtigter Interessen des Zuwendungsempfängers (ZE) oder Dritter oder aus anderen sachlichen Gesichtspunkten bestimmte Einzelheiten aus dem Bericht vertraulich zu behandeln sind (z. B. Wahrung der Priorität bei Schutzrechtsanmeldungen), so hat der ZE den Zuwendungsgeber (ZG) ausdrücklich darauf hinzuweisen.

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik	01MV19001C
Technische Universität Dortmund Institut für Produktionssysteme	01MV19001B
Kontakt Konsortialführer:	
Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke	Tel.: +49 9131 85-27569 Email: joerg.franke@faps.fau.de
Laufzeit des Vorhabens:	
von: 01.01.2020	bis: 31.12.2023
Datum Bericht:	
31.03.2024	

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis .....	VI
1 Kurzdarstellung.....	1
1.1 Aufgabenstellung .....	1
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	2
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	2
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	3
1.4.1 Ausgangssituation zur Projektbeginn – Manuelle Ladesäulenmontage .....	3
1.4.2 Wissenschaftlicher Stand der Technik und Forschung im Kontext der automatisierten Zuführung, Handhabung und Verdrahtung biegeschlaffer Bauteile .....	5
1.4.3 Wissenschaftlicher Stand der Technik und Forschung im Kontext der Produktions- und Montageplanung .....	7
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	23
2 Eingehende Darstellung .....	24
2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....	24
2.1.1 AutoPro <sup>2</sup> .....	24
2.1.2 SCALE .....	25
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	26
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	26
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	26
2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	30
2.6 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 der Nebenbestimmungen.....	30
2.7 Inhaltliche Darstellung der Ergebnisse nach Arbeitspaketen .....	31
2.7.1 AP1 - Ist-Analyse und Anforderungsspezifikation .....	31
2.7.2 AP2 - Referenzplanungsprozess für die skalierbare Montage.....	36
2.7.3 AP3 - Definition der technischen Spezifikation (Outlet-Modul und Montagekonzept) ..	46
2.7.4 AP4 - Konzeptentwicklung für das Outlet-Modul und Identifikation skalierbarer Prozessschritte .....	51
2.7.5 AP5 Hard- und Softwareentwicklung für das Outlet-Modul und das skalierbare Montagekonzept (FAPS).....	58
2.7.6 AP6 Test und Optimierungen des Outlet-Moduls .....	66
2.7.7 AP7 Prototypische Umsetzung .....	66

2.7.8	AP8 Virtuelle Absicherung und Optimierung des Fertigungskonzepts .....	75
2.7.9	AP10 Bewertung und Handlungsempfehlungen .....	79
	Literaturverzeichnis .....	VII

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektplan nach Verlängerung .....	3
Abbildung 2: Aufgaben der Arbeitssystemplanung i. A. a. (Eversheim, 1996).....	7
Abbildung 3: Auswahlkriterien für Montagesysteme i. A. a. (Hartel & Lotter, 2012).....	8
Abbildung 4: Planungsvorgehensweise nach Daenzer i.A.a. (Daenzer & Büchel, 1979).....	10
Abbildung 5: Planungsabfolge der 6-Stufen-Methode i. A. a. (REFA, 1991) .....	11
Abbildung 6: Allgemeiner Problemlösungsprozess nach Jakoby i. A. a. (Jakoby, 2015) .....	12
Abbildung 7: Montagesystemplanung nach Hartel und Lotter i. A. a. (Hartel & Lotter, 2012) .....	13
Abbildung 8: Ablaufabschnitte der Planungsmethodik nach Bullinger i. A. a. (Bullinger & Ammer, 1986) .....	14
Abbildung 9: Planungsstufen nach Konold und Reger i. A. a. (Konold & Reger, 2009).....	15
Abbildung 10: Angepasster MRK-Planungsablauf i. A. a. (Selevsek & Köhler, 2018).....	17
Abbildung 11: Schnittmenge des geeigneten MRK-Einsatzes i. A. a. (Köhler, 2017) .....	18
Abbildung 12: Modell zur fähigkeitsorientierten Montageplanung i. A. a. (Beumelburg, 2005) .....	19
Abbildung 13: Standardkomponenten eines Outlet-Moduls.....	31
Abbildung 14: Produktionsmorphologie .....	32
Abbildung 15: Flexibilität und Skalierung eines Produktionssystems.....	36
Abbildung 16: Prinzipien der Kapazitätsanpassung i. A. a. (Reinhart, 1999) .....	37
Abbildung 17: Schematische Gliederung des Referenzplanungsprozesses .....	40
Abbildung 18: Konventionelle Montagelinie.....	43
Abbildung 19: Darstellung einer typischen FML in U-Form .....	43
Abbildung 20: Darstellungsformen eines Vorranggraphen.....	44
Abbildung 21: Vergleich der Verfahren zur Austaktung eines Montagesystems .....	45
Abbildung 22: Beispielhafte Darstellung eines Austaktungsdiagramms.....	46
Abbildung 23: Auszug der Sammlung an Designregeln.....	51
Abbildung 24: B1-Muster Entwurft des Outlet-Moduls .....	52
Abbildung 25: Aspekte der Produktionsorganisation .....	52
Abbildung 26: Aufbau der automatisierten Montagestation.....	54
Abbildung 27: Prozessprototyp 1 - Automatisiertes Stecken biegeschlaffer Kabel .....	55
Abbildung 28: Prozessprototyp 2 - Automatisierte Zuführung ungeordneter Kabel.....	56
Abbildung 29: Prozessprototyp 3 – Automatisierte Platinenmontage im Outlet-Modul .....	57
Abbildung 30: Möglichkeiten des Liniendesigns zur Flexibilität und Skalierung.....	57
Abbildung 31: Erstentwurf eines MRI-Arbeitssystems der FML .....	58
Abbildung 32: Übersicht der notwendigen Steuerungs-, Aktor- und Sensorkomponenten .....	59
Abbildung 33: Erstes Konstruktionsmodell des Greifsystems zur Verarbeitung von Leitungen.....	59
Abbildung 34: Qualifikationsuntersuchung zur Steckkraft.....	60
Abbildung 35: Weiterentwickeltes Konstruktionsmodell des Greifsystems PP1.....	60
Abbildung 36: Numerische Analyse der Greifkraft.....	61
Abbildung 37: Flussdiagramm des Steckprozesses .....	61
Abbildung 38: Entwurf der Beschleunigungsstation für die Zuführung ungeordneter Kabel.....	62

Abbildung 39: Entwurf der Führungselemente für den Materialfluss .....	63
Abbildung 40: Entwurf der Kabelbremsvorrichtung an Achse 3 des Roboterarms .....	63
Abbildung 41: Schematischer Aufbau der Druckluftbremse für PP2 .....	64
Abbildung 42: Simulationsmodelle „Transportgeschwindigkeit konfektionierter Kabel“ .....	65
Abbildung 43: Entwurf und räumliche Anordnung der Komponenten zur Platinen Montage .....	66
Abbildung 44: 3D-Druck und Aluminium-Prototyp des PP1 Greifsystems für konfektionierte Leitungen .....	67
Abbildung 45: Prototypischer Test des weiterentwickelten PP1 Greifsystems.....	67
Abbildung 46: Positioniergenauigkeit der Kabelspitze durch den Prototyp .....	68
Abbildung 47: Dritter Prototyp des PP1 Greifsystems .....	68
Abbildung 48: Erfolg der Steckversuche (grün= erfolgreich, rot= nicht erfolgreich) unter Darstellung der erkannten Lageabweichung des biegeschlaffen Kabelendes.....	69
Abbildung 49: Prototypische Umsetzung der Steuereinheit „Automatische Kabel-Abbremsung“ .....	70
Abbildung 50: Versuchsaufbau zur Validierung von PP2 .....	71
Abbildung 51: Prototypische Umsetzung der Abbremsvorrichtung (PP2).....	71
Abbildung 52: Prototypische Greiffinger zu Bestückung der Platine mit el. Bauelementen (PP3).....	72
Abbildung 53: Prototypischer MRK-Arbeitsplatz (PP4) .....	72
Abbildung 54: Grafische Darstellungsform des Vorranggraphen .....	73
Abbildung 55: MTM-Analyse der Logikplatine .....	73
Abbildung 56: Quick-Check Analyseparameter für MRI-Szenarien.....	74
Abbildung 57: Virtuelle Absicherung der Fügeprozesse am Beispiel der Anschlussplatine.....	75
Abbildung 58: Digitales Modell der Montagelinie für das B1-Muster .....	76
Abbildung 59: Kinematiksimulation zur Entnahme von Bauteilen aus Kleinladungsträger .....	77
Abbildung 60: FML-Skalierungsstufe 1 .....	78
Abbildung 61: FML-Skalierungsstufe 2 .....	78
Abbildung 62: FML-Skalierungsstufe 3 .....	78

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht und Bewertung ausgewählter Planungsverfahren.....	22
Tabelle 2.1: Verwendung Teilvorhaben Konsortialführer FAPS .....	24
Tabelle 2.2: Verwendung IPS.....	25
Tabelle 2.3: Verwertung Teilvorhaben Konsortialführer FAPS .....	26
Tabelle 2.4: Verwertung Teilvorhaben B.....	27
Tabelle 2.5: Veröffentlichungen Teilvorhaben Konsortialführer .....	30
Tabelle 2.6: Veröffentlichungen Teilvorhaben B.....	30
Tabelle 2.7: Kurzübersicht von betrachteten Technologien .....	35
Tabelle 2.8: Anforderungen Automatisierungsgerechtes Produktdesign.....	49
Tabelle 2.9: Anforderungen Montage und Fertigung .....	50

## 1 Kurzdarstellung

### 1.1 Aufgabenstellung

Ausgehend von den aktuellen Entwicklungen im Kontext des zunehmenden Ressourcenverbrauchs sowie den klimapolitischen Rahmenbedingungen stellt die Elektromobilität eine Schlüsseltechnologie der Zukunft dar. Hierdurch ergeben sich umfassende Auswirkungen auf den Automobilbau in Deutschland sowie alle hiermit in Verbindung stehenden industriellen Bereiche. Um auch im Hinblick auf die internationale Konkurrenz langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben, gilt es, frühzeitig geeignete Handlungsstrategien anzustoßen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich diese Entwicklung aktuell noch in einer Vormarkphase befindet. Die Nachfrage nach entsprechenden Erzeugnissen ist dementsprechend noch auf einem vergleichsweise geringen Niveau, sodass umfangreiche Investitionen in Anlagen- und Automatisierungstechnik auf Seiten der Hersteller bislang nicht wirtschaftlich waren. Verschiedenen Prognosen zufolge (z. B. (Bdew, 2018; Nationale Plattform Elektromobilität, 2018; Schwarzer, 2018)) wird sich in den kommenden Jahren allerdings ein rapider und nachhaltiger Anstieg der Nachfrage einstellen, sodass eine fortschreitende Industrialisierung der Produkte und der entsprechenden Produktionsprozesse unabdingbar wird. Von besonderer Relevanz ist in diesem Kontext die Gewährleistung einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur, was bei einer steigenden Anzahl an Elektrofahrzeugen nur durch eine entsprechend umfangreiche Bereitstellung geeigneter Ladesäulen erreicht werden kann. Der Prozess zur Herstellung dieser Ladesäulen umfasst die Montage zahlreicher biegeschlaffer Komponenten und kleiner Elektronikbauteile, die ohne umfangreichen Aufwand nicht signifikant automatisiert werden können. Aufgrund des bis dato noch ungünstigen Aufwand-Nutzen-Verhältnisses erfolgte der Einbau und Anschluss der elektrischen, elektronischen, mechanischen und optischen Komponenten weitestgehend durch Produktionsmitarbeiter und / oder Techniker. Bedingt durch abzeichnende Stückzahlsteigerungen stößt die manuelle Produktion allerdings an ihre Grenzen. Des Weiteren ist zu erwarten, dass eine manuelle Herstellung mittelfristig aufgrund des vergleichsweise hohen Lohnkostenniveaus in Deutschland für Hersteller, Betreiber und letztendlich auch für die Nutzer der Ladesäulen wirtschaftlich unattraktiv wird. Der resultierende Zielkonflikt besteht in der Volatilität der Marktnachfrage sodass eine vollautomatisierte Produktion wirtschaftliche Risiken für Hersteller birgt und gleichzeitig das bisherige technologische Design der Ladestationen nicht kompatibel mit der Automatisierung von Montageprozessen ist.

Die nachhaltige Auflösung dieser Problemstellungen bildet vor dem Hintergrund der zu erwartenden Stückzahlsteigerungen einen Schlüsselfaktor und gleichzeitig die Grundvoraussetzung für das langfristige Bestehen deutscher Ladesäulenhersteller im internationalen Wettbewerb. Die Planung und Umsetzung entsprechender Handlungsmaßnahmen ist für Ladesäulenhersteller allerdings mit einem erheblichen Risiko verbunden, weshalb im Forschungsvorhaben SUPPLY Möglichkeiten einer zielgerichteten simultanen Produkt- und Prozessentwicklung untersucht und geeignete Planungs- und Automatisierungskonzepte entwickelt wurden.

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Zur erfolgreichen Durchführung des Projekts wurde ein heterogenes Konsortium, bestehend aus dem Anwendungspartner Compleo Charging Solution sowie den beiden Forschungseinrichtungen Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) und dem Institut für Produktionssysteme (IPS) der Technischen Universität Dortmund (TUDO) initiiert.

Der Ladesäulenanbieter Compleo Charging Solution fungierte bis zum 31.12.2022 als Konsortium Führer und Anwendungspartner zur praxisorientierten Ansatzentwicklung und Erprobung im industriellen Umfeld. Compleo ist verantwortlich für eine vollautomatische produktionsgerechte Hard- und Softwareentwicklung des Outlet-Moduls und dessen Integration in die Ladestation.

Der FAPS übernahm ab dem 01.01.2023 die Konsortialführung des Gesamtprojekts. Darüber hinaus bestanden die Aufgaben des FAPS in der Entwicklung eines automatisierungsgerechten Produktdesigns sowie der zugehörigen Prozessentwicklung und prototypischen Validierung zur Steigerung des Automatisierungsgrads in der Montage.

Erweiternd oblag dem IPS die Entwicklung eines Referenzplanungsprozesses zur Planung von Montagesystemen unter volatilen Marktbedingungen, sowie der prototypischen Entwicklung und Validierung eines flexiblen und skalierbaren Montagesystems anhand des Outletmoduls des Anwendungspartners Compleo.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Erarbeitung der Ergebnisse erfolgte in elf Arbeitspaketen (AP) in einer Projektlaufzeit von 4 Jahren vom 01.01.2020 - 31.12.2023. Im ersten Projektjahr wurden schwerpunktmäßig AP1 „Ist-Analyse und Anforderungsspezifikation“ abgeschlossen und AP3 „Definition der technischen Spezifikation“ bearbeitet. In diesem Zuge fanden zahlreiche Vor-Ort-Workshops beim Anwender statt. Weiterhin wurden AP2 „Referenzplanungsprozess für die skalierbare Montage“ und einzelne Untersuchungen im Rahmen von AP8 „Virtuelle Absicherung und Optimierung des Fertigungskonzeptes“ begonnen sowie der Transfer der Ergebnisse von AP1 und AP3 in AP4 „Konzeptentwicklung für das Outlet-Modul und Identifikation skalierbarer Prozessschritte“ initiiert.

Diese Arbeiten wurden im zweiten Projektjahr fortgesetzt und fokussierten zudem die ersten Schritte von AP5 „Hard- und Softwareentwicklung für das Outlet-Modul und das skalierbare Montagekonzept“ und AP7 „Prototypische Umsetzung“ insbesondere seitens des Produktionssystems.

Das dritte Projektjahr wurde geprägt durch den Abschluss von AP3 und AP4 sowie den konkreten technischen Umsetzungen in AP5 und AP7. Diese Entwicklungen liefen Hand in Hand zur virtuellen Absicherung im Rahmen von AP8. Weiterhin wurde AP6 „Test und Optimierungen des Outlet-Moduls“ begonnen. Zu Ende des dritten Projektjahres wurde der Verlängerung um 12 weitere Monate stattgegeben.

Im darauffolgenden vierten Projektjahr erfolgte die Finalisierung der Umsetzungsaktivitäten sowie eine Validierung der Anwendungen, Werkzeuge und Methoden durch den Abschluss aller laufenden Arbeitspakete. Im Rahmen von AP10 „Bewertung und Handlungsempfehlungen“ wurden zudem die Erkenntnisse des Projektes strukturiert gesammelt und aufbereitet.

Über die gesamte Projektlaufzeit erfolgten Projektmanagement- und Transferaktivitäten in AP 11. Dazu erfolgten wöchentliche Jour-Fixes sowie Konsortial- und Meilensteintreffen zur Konsolidierung der Ergebnisse. Hierdurch konnte auch zu Zeiten der Covid19-Pandemie, derentwegen insb. zu Projektbeginn Termine überwiegend online stattfanden, eine erfolgreiche Projektbearbeitung sichergestellt werden. Die Absicherung der Projektergebnisse erfolgte durch 4 Meilensteine, die jeweils in Meilensteintreffen abgenommen wurden. Abbildung 1 fasst den Projektablauf einschließlich der Verlängerung zusammen.

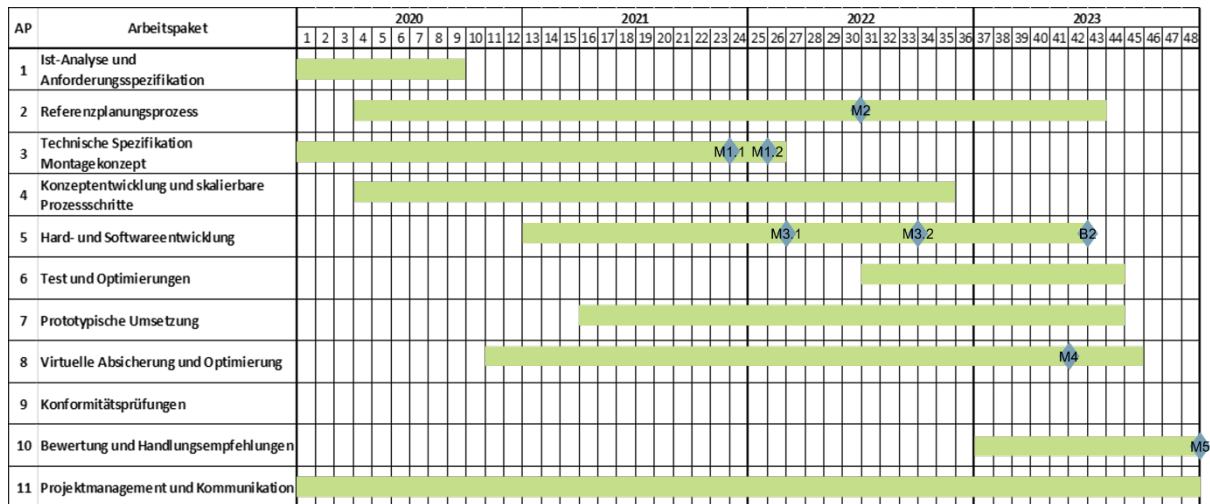


Abbildung 1: Projektplan nach Verlängerung

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

### 1.4.1 Ausgangssituation zur Projektbeginn – Manuelle Ladesäulenmontage

Die Prozesskette der Ladesäulenfertigung beinhaltet häufig ineffiziente und unergonomische manuelle Tätigkeiten. Medienbrüche erschweren die Abstimmung zwischen Entwicklung und Produktion. Dadurch unterlaufen Fehler, die wiederum kostenintensive Nacharbeiten mit sich bringen.

Vor diesem Hintergrund besteht der dringende Bedarf, die Effizienz entlang der Wertschöpfungskette zu steigern und damit die Herstellungskosten zu senken. Mit der Entwicklung eines modularen, automatisierungsgerechten Produktdesigns in Kombination mit dem zugehörigen robusten, skalierbaren Fertigungsprozess soll das Forschungsprojekt die hierfür notwendigen Voraussetzungen schaffen und die Unternehmen dabei unterstützen, die eingangs geschilderten Herausforderungen zu bewältigen.

Derzeit nimmt der Herstellungsprozess, beginnend mit der mechanischen Vorbereitung des Gehäuses bis zur Auslieferung einer Ladestation, ca. 10 Stunden in Anspruch. Hierbei entfällt der größte Arbeitszeitanteil auf die manuelle Montage und Prüfung. Es wird erwartet, dass mit den im Rahmen des Forschungsvorhabens angestrebten Entwicklungen die Prozesszeit um bis zu 50% erheblich reduziert werden kann, was zu einer deutlichen Senkung der Herstellkosten führt. Durch die Funktionsintegration können zusätzlich auch die Materialkosten gesenkt werden.

Planungssystematiken, die zur Analyse, Planung, Gestaltung und Verbesserung soziotechnischer Arbeitssysteme (REFA, 2013) angewendet werden können, bilden eine wichtige thematische Grundlage für die Entwicklung skalierbarer Montagekonzepte. Für SUPPLY sind insbesondere

konventionelle, produktionsbezogenen Systematiken sowie ausgewählte Verfahren aus der Produktentwicklung relevant.

Produktionsorientierte Herangehensweisen eignen sich in besonderem Maße zur Planung von Fertigungs- und Montagesystemen mit hohen Stückzahlen und geringer Produktvarianz. Diese Methoden sind in vielen Fällen auf kapitalintensivere Systeme ausgerichtet, um anhand hoher Automatisierungsgrade die geforderten Stückzahlen durch die Nutzung von Skaleneffekten möglichst wirtschaftlich zu fertigen. Zu den konventionellen Planungssystematiken gehört der Ansatz nach REFA (REFA, 1993). Dieser beinhaltet einen allgemeinen Leitfaden zur Planung komplexer Fertigungs- und Montagesysteme. Das Vorgehen nach Lotter (Lotter, 1986) stellt eine Alternative hierzu dar und fokussiert im Besonderen die Montageplanung. Ein zentrales Kennzeichen der von Rother und Harris (Rother & Harris, 2001) entwickelten Systematik besteht in einer möglichen Reduzierung des Automatisierungsgrads, um eine erhöhte Flexibilität und einen kontinuierlichen Mitarbeiterfluss zu ermöglichen. Neben den skizzierten Techniken existieren in der Literatur zahlreiche, ähnliche Planungsansätze mit verstärkt sequentiellm Charakter (Bullinger, Dungs, Ammer, Seidel & Weller, 1986; Schuster, 1992; VDI 2221, 1993; Westkämper, Spath, Constantinescu & Lentés, 2013) .

Methoden aus der Produktentwicklung können nicht unmittelbar zur Planung und Gestaltung skalierbarer Arbeitssysteme genutzt werden, bieten aber mitunter vielversprechende Funktionalitäten bezüglich des geplanten Forschungsvorhabens. Cooper (Cooper, 2001) entwickelte z. B. ein Prozessmodell, welches durch die Integration definierter Prüftore („Quality Gates“) in verschiedene Entwicklungsabschnitte unterteilt ist. Erlenspiel (Ehrlenspiel, 2009) beschreibt einen auf die Entwicklung und Konstruktion fokussierten Ansatz, der verstärkt auf die phasenübergreifende, simultane Planung eingeht. Analog hierzu liefert Bullinger (Bullinger, Warschat & Bading, 1997) einen Beitrag zum Simultaneous Engineering, der insbesondere auf Effizienz- und Kostenaspekte eingeht. Sobek (Durward K. Sobek II, Allen C. Ward & Jeffrey K. Liker, 1999) stellt einen Ansatz zur simultanen, variantenbezogenen Produktentwicklung vor. Nach der Generierung zahlreicher, initialer Groblösungen erfolgt im fortschreitenden Planungsverlauf eine kontinuierliche und simultane Detaillierung und Verdichtung der Lösungskonzepte.

Für die Erreichung des Forschungsziels in SUPPLY können die bis dato existierenden Planungsmethoden (Bullinger et al., 1986; Cooper, 2001; Durward K. Sobek II et al., 1999; Lotter, 1986; REFA, 1993; Rother & Harris, 2001; Schuster, 1992; VDI 2221, 1993; Westkämper et al., 2013) nicht unmittelbar eingesetzt werden. Ein zentrales Hindernis liegt darin begründet, dass ganzheitliche Ansätze zur Planung von skalierbaren Arbeitssystemen auf einem nicht mehr zeitgemäßen Verständnis der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine beruhen. Ausgehend von den jeweiligen Fähigkeiten erfolgt in der Regel eine fähigkeitsbezogene Zuteilung der Arbeitsvorgänge an den jeweils geeigneteren Funktionsträger. Das Zusammenwirken von Menschen und Robotersystemen im Zuge einer Kooperation oder direkten Kollaboration (Onnasch, Maier & Jürgensohn, 2016; Spillner, 2015) und den sich ergebenden Potentialen wird nicht berücksichtigt. Weiterhin werden auch die Unterscheidung der Automatisierungseignungen einzelner Arbeitsschritte und eine sich daraus ergebende Zuordnung zu verschiedenen Skalierungsstufen nicht berücksichtigt. So ist insbesondere die Gegenüberstellung des entstehenden Umsetzungsaufwands mit den mittelfristig erwarteten

Produktionsstückzahlen zur Ableitung einer geeigneten Skalierungsstufe nicht möglich. Auch eine flexible Anpassung roboter-basierter Automatisierungsstufen kann mit bestehenden Ansätzen bislang nicht erreicht werden.

Hubka (Hubka, 1996) versteht unter Design for X (DfX) ein Wissenssystem, welches Erkenntnisse sammelt und ordnet, wie während des Konstruktionsprozesses technische Systeme realisiert werden können, die bestimmte Eigenschaften aufweisen. Hierbei steht das X stellvertretend für die jeweilige Hauptzielsetzung die während der Produktentwicklung angestrebt wird (Ponn & Lindemann, 2011). Für das Forschungs-vorhaben „SUPPLY“ stehen vor allem Gestaltungsrichtlinien, die auf eine automatisierungsgerechte Produktgestaltung abzielen, sogenannte DFAA-Methoden (Design For Automatic Assembly), im Fokus. Shehab und Abdalla (Shehab & Abdalla, 2006) sehen diese als einen wichtigen Bestandteil des Concurrent Engineering um Herstellkosten und Durchlaufzeiten zu senken. Im Kontext von DFAA-Methoden, die eine Untermenge der DFA-Ansätze (Design for Assembly) darstellen (Eskilander, 2001), finden sich in der Literatur unterschiedlichste Ansätze für verschiedene Branchen (Barbosa & Carvalho, 2013; Cross, 1993; Kuo, Huang & Zhang, 2001; Roulet-Dubonnet, Sandøy & Schulte, 2018; Scarr & McKeown, 1986; Synnes & Welo, 2015). Diese stellen zwar eine gute Basis dar, können jedoch für das anvisierte Forschungsziel keine direkte Anwendung finden, da zum einen der technologische Fortschritt ständig neue Potentiale erschließt und zum anderen der vorliegende Anwendungsfall, der Montage von Ladesäulen, spezifische Charakteristika aufweist.

Im Bereich der Herstellung automotiver Bordnetze finden sich mehrere Forschungsaktivitäten, die aufgrund ähnlicher Anforderungen für das Forschungsvorhaben SUPPLY relevant sind. So entwickelt Schlaich Werkzeuge und Verfahren für den Verlege- und Anschlagprozess der Leitungen im Rahmen der Montage automotiver Kabelbäume (Schlaich, 1988). Reinhart entwickelt ein Modell welches die Konstruktion, Fertigung und Montage von Kabelsätzen umfasst, wobei er die Schneidklemmtechnik als eine automatisierungsfreundliche Anschlagtechnik identifiziert (Reinhart, 1988). Unter Verwendung des Fügeverfahrens Crimpen konzipiert und entwickelt Emmerich Verfahren und Werkzeuge, welche die flexible Leitungssatzmontage erlauben (Emmerich, 1992). Cankut beschreibt ein Konzept für einen Montagekopf welcher eine automatisierte Kabelbaum-Montage erlaubt (Cankut, 2011). Trotz einer umfassenden Recherche konnte kein Projekt identifiziert werden, welches die Produktionsprozesse zur automatisierten Herstellung von Ladesäulen adressiert. Obwohl sich bislang keiner der vorgestellten Ansätze zur Steigerung des Automatisierungsgrads bei der Bordnetzherstellung in der Serienproduktion etablieren konnte, stellen diese jedoch eine gute Ausgangsbasis zur Entwicklung eines automatisierungsgerechten Prozesses und des notwendigen Montagewerkzeugs dar.

### **1.4.2 Wissenschaftlicher Stand der Technik und Forschung im Kontext der automatisierten Zuführung, Handhabung und Verdrahtung biegeschlaffer Bauteile**

Die Fertigungsindustrie, insbesondere die Hersteller von Ladeinfrastruktur (LIS) bei der Herstellung von mechatronischen Geräten wie Wechselstrom (eng.: alternating current, AC)-Ladestationen für Elektrofahrzeuge, steht vor der Herausforderung, die Handhabung und Verdrahtung von flexiblen Komponenten zu automatisieren. Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Forschung und Entwicklung in diesem Bereich zu Beginn des Forschungsvorhabens herausgearbeitet. Es wird sich

konzentriert auf die Herausforderungen und Fortschritte bei der Automatisierung des Verdrahtungsprozesses und Einblicke in die Machbarkeit und das Potenzial automatisierter Lösungen für die Handhabung verformbarer linearer Objekte (eng.: deformable linear objects, DLO) in Fertigungsprozessen gegeben. Darüber hinaus werden die Auswirkungen der Automatisierung auf die Kosten, die Effizienz und die Widerstandsfähigkeit im Fertigungssektor erörtert.

Komplexe Kabelsysteme spielen in mechatronischen Geräten, zu denen auch Einrichtungen der Ladeinfrastruktur zählen, eine entscheidende Rolle, da sie die Kommunikation zwischen verschiedenen Komponenten und die Verteilung von Energie und Signalen ermöglichen (Braess & Seiffert, 2012; Frohlig et al., 2020). Die Herstellung dieser Kabelsysteme, insbesondere in Branchen wie der Automobilindustrie und dem Schaltschrankbau, ist jedoch traditionell ein arbeitsintensiver Prozess (Azme, Nguyen & Kuhn, 2022; Nguyen, Kuhn & Franke, 2021). Hier ist auch die jüngere Branche der LIS-Herstellung anzusiedeln. Mit der zunehmenden Nachfrage nach Automatisierung, die durch den Kostendruck und die Notwendigkeit der Ausfallsicherheit in den Lieferketten angetrieben wird, rückt die Automatisierung von Prozessen wie der Handhabung und Verdrahtung flexibler Komponenten immer mehr in den Mittelpunkt (Cankut, 2011).

Eine der größten Herausforderungen bei der Automatisierung des Verdrahtungsprozesses ist die Handhabung von verformbaren linearen Objekten wie Kabeln, die empfindlich und anfällig für Beschädigungen sind (Ripploh, 2019). Herkömmliche Greifer, die für starre Objekte ausgelegt sind, eignen sich nicht gut für die Handhabung von DLOs, so dass innovative Lösungen erforderlich sind (Henrici & Kämper, 1998). Darüber hinaus haben in der Vergangenheit die hohen Kosten von Automatisierungslösungen im Vergleich zu manuellen Prozessen eine flächendeckende Verbreitung und Industrialisierung behindert (Nguyen et al., 2021).

Für die Automatisierung der Handhabung und Verdrahtung flexibler Komponenten wurden bereits mehrere Ansätze aufgezeigt. Dazu gehören Mechanismen für die Kabelzuführung, -klemmung und -einführung (Bach, Jung & Bächler, 2019; Brökelmann, Jaeger & Busse GmbH & Co, 1994; Deprato, Chelini & Althaus, 2018). Während sich die meisten Lösungen auf mechanische Mechanismen konzentrieren, gibt es auch erste Ansätze sensitiver Greifmethoden (Busi et al., 2017). Die Herausforderungen in Bezug auf Flexibilität, Anpassungsfähigkeit und Kosteneffizienz bleiben jedoch bestehen.

Im Schaltschrankbau umfasst die Prozesskette verschiedene Schritte. Insbesondere der Verdrahtungsprozess ist arbeitsintensiv und macht einen erheblichen Teil der gesamten Fertigungszeit aus (Joppen & Kühn, 2017). Die Forschung in diesem Bereich hat sich auf Automatisierungslösungen wie Augmented Reality, Robotik und digitale Zwillinge konzentriert, um Effizienz und Genauigkeit zu verbessern (Hefner, Schmidbauer & Franke, 2020, 2021; Spies, Bartelt & Kuhlenkotter, 2019; Szajna, Stryjski, Woźniak, Chamier-Gliszczyński & Kostrzewski, 2020). Weitere Herausforderungen bestehen jedoch in einer nahtlosen Datenkontinuität über Prozesse hinweg und deren automatisierte Bereitstellung für den Fertigungsprozess sowie die Integration in softwarebasierte Lösungen.

Die Automatisierung der Handhabung und Verdrahtung flexibler Komponenten in Fertigungsprozessen bietet beträchtliche Möglichkeiten zur Verbesserung der Effizienz, zur Kostensenkung und zum Erhalt der Standortattraktivität in Deutschland. Obwohl bei der Entwicklung von Automatisierungslösungen

Fortschritte erzielt wurden, bleiben Herausforderungen in Bezug auf Kosten, Anpassungsfähigkeit und Datenkontinuität bestehen. Weitere Forschung und Innovation sind erforderlich, um diese Herausforderungen zu bewältigen und das volle Potenzial der Automatisierung in der Fertigung auszuschöpfen.

### 1.4.3 Wissenschaftlicher Stand der Technik und Forschung im Kontext der Produktions- und Montageplanung

Die Planung und Gestaltung von Arbeits- und Montagesystemen stellt für den industriellen Betrieb seit jeher eine besondere Herausforderung dar. Dabei ist ein detaillierter und vorausschauender Planungsansatz häufig ausschlaggebend für den zukünftigen Erfolg des Arbeitssystems. Insbesondere bei der Gestaltung interaktiver Mensch-Roboter-Systeme sind besondere Anforderungen im Hinblick auf die Sicherheit, die Wirtschaftlichkeit und Systemflexibilität zu beachten. Die Planungsthematik ist vor dem Hintergrund der Aufgabenstellung des Forschungsprojekts SUPPLY von zentraler Bedeutung, um den Stand der Forschung zu konstatieren und potentielle Lücken zu identifizieren. Im folgenden Kapitel werden verschiedene Planungsansätze sowohl für manuelle als auch für hybride Arbeitssysteme vorgestellt. Es werden die Ziele und Methoden der Arbeitssystemplanung näher thematisiert. Nach der Vorstellung verschiedener allgemeingültiger bzw. anwendungsneutraler Systematiken für die Systemplanung und montagebezogener Verfahren werden diese abschließend hinsichtlich ihrer Eignung für die beschriebene Ausgangssituation geprüft.

#### Aufgaben und Ziele der Arbeitssystemplanung

Im Zuge der Montagesystemplanung werden entweder neue Arbeitssysteme konzeptioniert und ausgearbeitet oder bestehende Systeme umgestaltet. (Eversheim, 1996) versteht unter der Arbeitssystemgestaltung die Schaffung des optimal aufeinander abgestimmten und fähigkeitsorientierten Zusammenwirkens von Mitarbeitern, Betriebsmitteln (auch Roboter) und sonstigen Arbeitsgegenständen. Wie in Abbildung 2 veranschaulicht, gilt es Planungsansätze auf technischer und organisatorischer Ebene sowie unter Berücksichtigung der Ergonomie zu verfolgen.

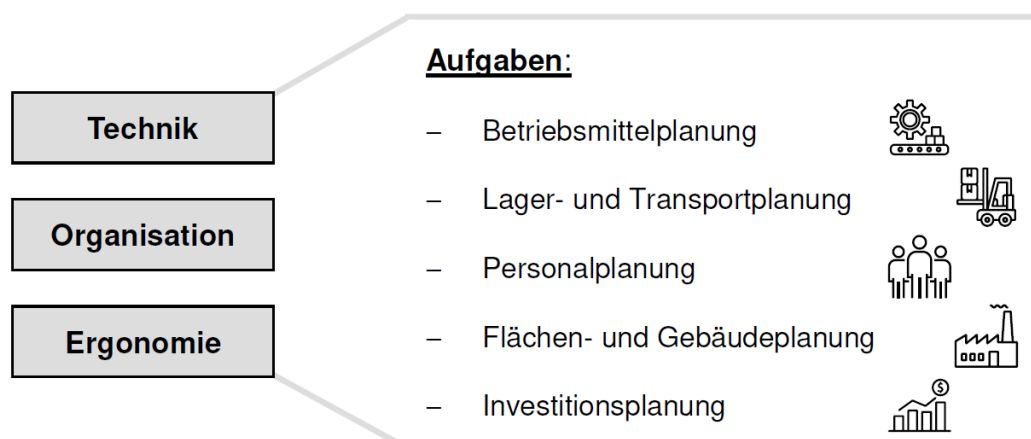


Abbildung 2: Aufgaben der Arbeitssystemplanung i. A. a. (Eversheim, 1996)

Die Leistungsfähigkeit des Menschen und dessen Bedürfnisse sind dabei von zentraler Bedeutung. Dies gilt insbesondere bei der Ausarbeitung hybrider Montagesysteme im Bereich der Mensch-Roboter-Kollaboration. (Westkämper, 2006) zufolge sind die Ziele der Arbeitssystemplanung die möglichst

wirtschaftliche Konzeptionierung und Gestaltung von Fertigungs- und Montagesystemen. Dementgegen steht bei der Arbeitsablaufplanung die konkrete Abbildung eines wirtschaftlichen Montagevorgangs für ein Produkt im Fokus. Die Systemgestaltung erfolgt demzufolge auf einer höher gelegenen Ebene als die Ablaufplanung und ist vielmehr auf die Fertigungsmittelplanung als auf die Prozessgestaltung fokussiert. Die Planung der benötigten Betriebsmittel umfasst insbesondere die Auswahl und gegebenenfalls auch die Konstruktion von erforderlichen Maschinen bzw. Robotern, Werkzeugen und sonstigen Montagevorrichtungen. Im Zuge der voranschreitenden Digitalisierung der Produktionshallen werden diese Hardware-Betriebsmittel heutzutage ergänzt durch Software-Produkte wie Steuerungseinrichtungen für Roboter oder Systeme zur Sicherheitsüberwachung (Westkämper, 2006). Als ein konkretes Ziel der Arbeitssystemplanung bezeichnet (Hartel & Lotter, 2012) die Auswahl des am besten geeigneten Montagesystems in Abhängigkeit der drei Aspekte Investment, Flexibilität und Losgröße. Anhand der gegebenen Fertigungsparameter ist Abbildung 3 zu entnehmen, dass sich beispielsweise ein automatisches Montagesystem nur für große Fertigungslosgrößen verbunden mit niedrigen Flexibilitätsanforderungen eignet und hohe Investitionskosten verursacht.

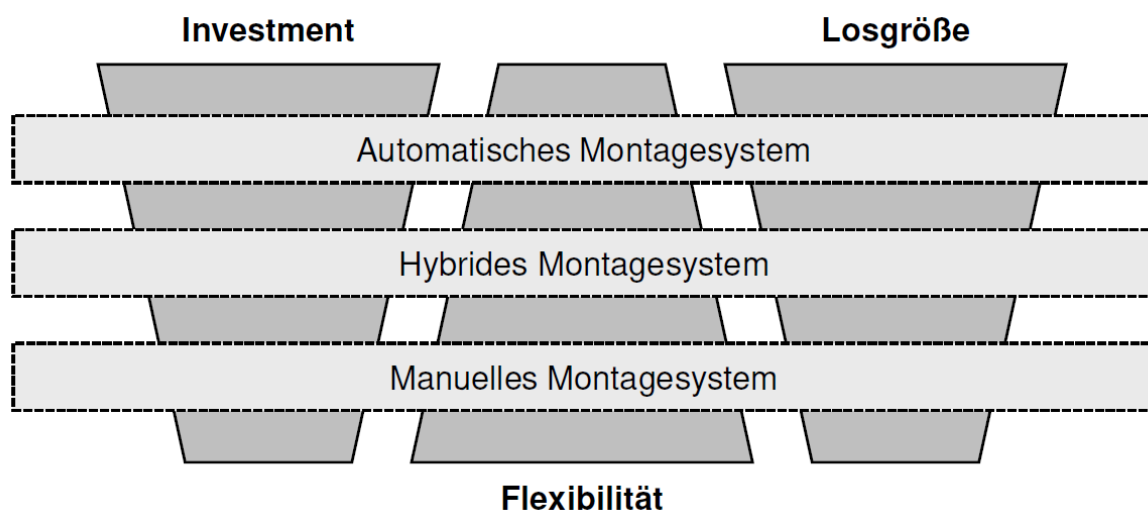


Abbildung 3: Auswahlkriterien für Montagesysteme i. A. a. (Hartel & Lotter, 2012)

Planungssysteme stellen eine wichtige thematische Grundlage für die Entwicklung von skalierbaren Montagekonzepten dar. Sie dienen der Analyse, Planung, Gestaltung und Verbesserung sozio-technischer Arbeitssysteme und können durch geschickte Anwendung zu effizienteren Prozessen führen (REFA, 2016). Aufgrund der thematischen Ausrichtung dieser Arbeit hinsichtlich der stückzahlflexiblen Montage im Bereich der Mensch-Roboter-Interaktion werden vollautomatisierte Arbeitssysteme im Folgenden nicht weiter betrachtet. Die Schwerpunkte stellen die humanorientierte sowie die technisch-wirtschaftliche Gestaltung von Arbeitssystemen dar.

Die humanorientierte Arbeitssystemgestaltung beinhaltet per definitionem die Auslegung und Optimierung der Gegebenheiten für den Menschen in der Arbeitsumgebung. Insbesondere die Schaffung ergonomisch verträglicher Arbeitsbedingungen sowie die Berücksichtigung sozialer Aspekte stehen hier im Fokus. Ein übergeordnetes Gestaltungsziel bildet der Arbeitsschutz der Mitarbeiter, welcher einerseits durch die Ausgabe persönliche Schutzausrüstung (z.B. Helm, Schutzbrille) und andererseits durch Vermeidung von Unfällen infolge betriebsbezogener Tätigkeiten gewährleistet

werden muss. Weitere humanorientierte Themen sind die Arbeitsmotivation im Kontext der mentalen Forderung und Auslastung der Mitarbeiter, die soziale Interaktion der Werker während der Arbeit sowie die allgemeinen beruflichen und persönlichen Entwicklungsmöglichkeiten (REFA, 1991; Schlick, Bruder & Luczak, 2018) .

Die technischen und wirtschaftlichen Ziele der Arbeitssystemgestaltung sind dagegen eher auf Merkmale wie Ökonomie und Effizienz ausgerichtet. Im Fokus steht die bestmögliche Erfüllung der Arbeitsaufgabe bei minimalem Ressourceneinsatz bzw. -verbrauch. Dies beinhaltet auf der einen Seite den herkömmlichen Bedarf an Material und Energie, auf der anderen Seite spielt auch die Energie bzw. die Ausdauer des Menschen eine entscheidende Rolle. Bei der Systemauslegung sind demzufolge die Bewegungsfolgen und Wiederholungen sowie der benötigte Krafteinsatz des Mitarbeiters zu beachten. Gemäß (REFA, 1991) kann eine Arbeitsmethode infolge der Vereinfachung und Verdichtung von Bewegungsabläufen wirtschaftlich optimiert werden. Auch eine Teilautomatisierung der Arbeitsprozesse führt zu einer nachhaltigen Entlastung der agierenden Personen und damit zu einem effizienteren System. Bedingt durch die Vielzahl an Randbedingungen und den umfangreichen Planungsprozess, von der Analyse der Ausgangssituation bis hin zur möglichen Implementierung, erfordert die Planung eines Arbeitssystems ein systematisches Vorgehen. Es existieren in der Literatur der vergangenen Jahrzehnte zahlreiche Methodiken, die sich mit der Planung und Gestaltung von Arbeitssystemen auseinandersetzen. Dabei sind diese Methodiken auf unterschiedliche planungsbezogene Schwerpunkte ausgerichtet. Zum einen gibt es allgemeingültige Verfahren, die unabhängig vom jeweiligen Anwendungsfall auf den gesamten Planungsprozess ausgerichtet sind. Diese haben den Nachteil, dass mit steigendem Detaillierungsgrad der einzelnen Planungsphasen bzw. -stufen die Allgemeingültigkeit abnimmt. Andere Planungsmethoden existieren hingegen speziell für die Gestaltung von manuellen oder hybriden Montage- und Produktionssystemen. Darüber hinaus fokussieren weitere Methoden die Produktentwicklungsprozesse oder die Investitionsverfahren (Bokranz, Landau & Becks, 2006).

### Bestehende Planungssystemmatiken

Die im Folgenden vorgestellten allgemeingültigen Planungsverfahren haben gemeinsam, dass sie auf keinen spezifischen Anwendungsfall zugeschnitten sind. Sie dienen für den Anwender lediglich als Leitfaden, um den Planungsprozess mit einer methodischen Vorgehensweise zu erleichtern. (Daenzer & Büchel, 1979) bezeichnet ein solches anwendungsneutrales Verfahren auch als klassische Problemlösetechnik. Diese dient dazu, bei der Planung eines Systems über die gesamte Entstehungs- und Nutzungszeit zu unterstützen. Dabei wird der Problemlösezyklus in jeder der sechs Lebensphasen des Systems (drei Planungs- und drei Realisierungsphasen) bei Bedarf mehrfach durchlaufen. Wie bei den meisten klassischen Problemlösungsansätzen (z. B. PDCA) ist das Vorgehen iterativ.

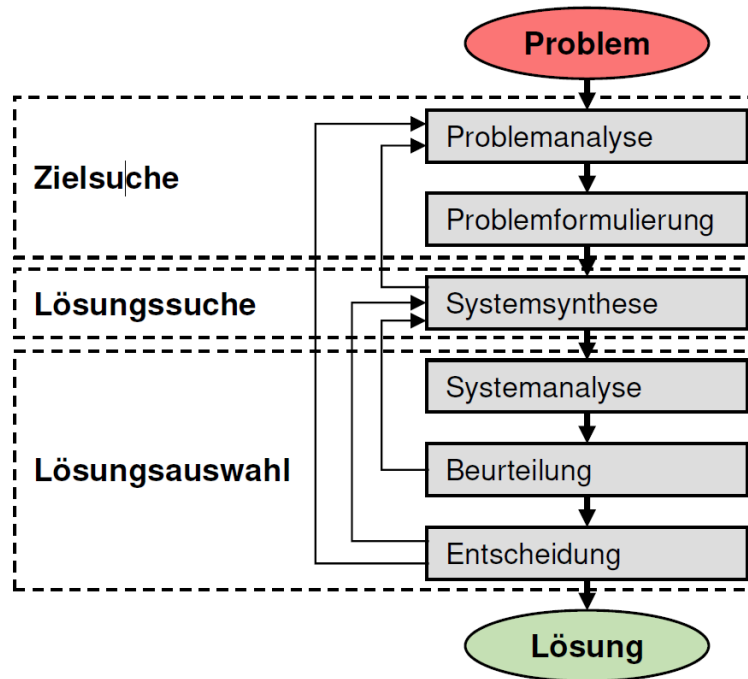


Abbildung 4: Planungsvorgehensweise nach Daenzer i.A.a. (Daenzer & Büchel, 1979)

Das Planungsvorgehen nach Daenzer ist in drei Hauptphasen mit insgesamt sechs Schritten unterteilt. Während der ersten Phase, der Zielsuche, erfolgt eine detaillierte Analyse der Situation und daraus abgeleitet die Formulierung der Problemstellung. Anschließend werden in der Phase der Lösungssuche verschiedene Handlungsalternativen erarbeitet, die zu einer Lösung des Problems beitragen. In der dritten und letzten Phase erfolgt eine Auswahl der vorab formulierten Problemlösungsmöglichkeiten anhand der drei Schritte Analyse, Beurteilung und Entscheidung. Auf Basis der Entscheidung wird nun die gewählte Systemvariante umgesetzt oder der gesamte Prozess von Neuem angestoßen. Grundsätzlich weist die Form der Planungsmethodik keine spezielle inhaltliche Ausrichtung auf und kann aus diesem Grund eher als Basis für eine Methodik zur Montagesystemplanung angesehen werden. (Daenzer & Büchel, 1979)

Die sechsstufige REFA-Planungssystematik (REFA, 1991) auch unter der Bezeichnung 6-Stufen-Methode bekannt, enthält einen allgemeinen Leitfaden für die Planung komplexer (Fertigungs-) Systeme. Wie bei (Daenzer & Büchel, 1979), liegt der Fokus auch hier auf der systematischen Herangehensweise, um für Problemstellungen von erhöhter Komplexität Lösungsalternativen zu erarbeiten. Die Systematik dient sowohl der Gestaltung von ganzen Arbeitssystemen, bietet für den Anwender aber auch eine praxisnahe Unterstützung bei der Produkt- oder Prozessplanung. Besonders deutlich werden bei der 6-Stufen-Methode die Abhängigkeiten zwischen Mensch, Technik, Organisation und Information beim Zusammenwirken innerhalb eines Systems. Dabei wird aufgrund der strukturierten Vorgehensweise eine hohe Planungsqualität gewährleistet. Wie die Namensgebung vermuten lässt, ist die Systematik aus sechs aufeinander folgenden, distinkten Planungsstufen aufgebaut. Diese sind inhaltlich so gestaltet, dass im Anschluss an jeden Analyse- oder Konzeptionsschritt eine Entscheidung bezüglich des weiteren Planungsverlaufs getroffen wird. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass die nächsthöhere Planungsstufe erst nach der Verabschiedung eines zufriedenstellenden Ergebnisses erreicht wird. Die Planungssystematik ist

gekennzeichnet durch eine umfassende Dokumentation der einzelnen Stufen und Entscheidungen, um diese möglichst transparent nachvollziehbar zu gestalten. Ausgehend von einem konkreten Planungsanstoß gilt es zunächst die Ist-Situation zu analysieren und eine grobe Planungsaufgabe zu formulieren. Diese wird im nächsten Schritt konkretisiert und abgegrenzt. Ebenso können die entsprechenden (Teil-)Ziele unterschiedlich gewichtet werden. Im dritten Planungsschritt, der Grobplanung, erfolgt die Konzeption des Arbeitssystems hinsichtlich der planmäßigen Abläufe, der Betriebsmittel, des Personals und der allgemeinen Arbeitsbedingungen. Hierbei werden verschiedene alternative Lösungsansätze erarbeitet, von denen letztlich eine Vorzugslösung im folgenden Schritt detailliert ausgearbeitet wird. Während der Einführung des Arbeitssystems werden zunächst sämtliche Beschaffungs- und Vorbereitungsmaßnahmen durchgeführt, um das System schließlich für den Einsatz freizugeben. Die letzte Planungsstufe beinhaltet neben der Erstellung einer Abschlussdokumentation die Durchführung einer Erfolgskontrolle sowie die Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen und Best-Practices (REFA, 2015). In Abbildung 5 ist die Abfolge der einzelnen Planungsschritte des sechsstufigen Verfahrens vom Planungsanstoß ausgehend skizziert.

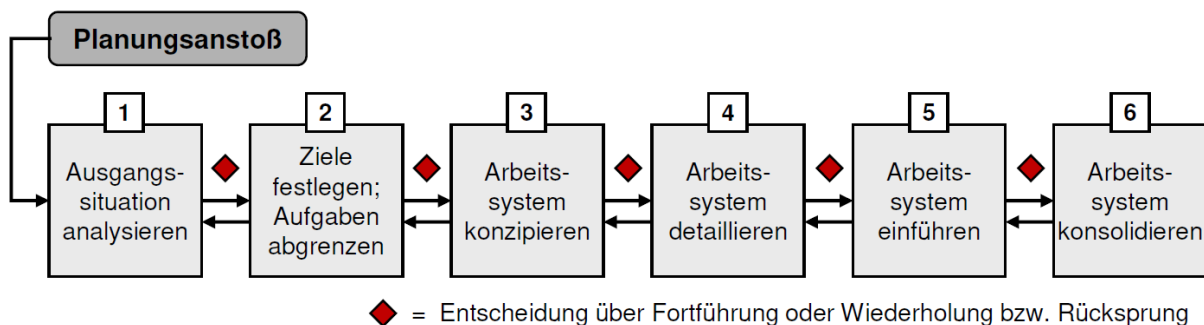


Abbildung 5: Planungsabfolge der 6-Stufen-Methode i. A. a. (REFA, 1991)

Grundsätzlich sind bei jedem einzelnen Planungsschritt Rücksprünge zu vorherigen Stufen möglich. Diese Rücksprünge sind der Übersichtlichkeit halber nicht in Abbildung 5 enthalten. Darüber hinaus kann auf jeder Planungsstufe auch ein neuer Planungsanstoß beispielsweise für ein alternatives Vorhaben erfolgen. Die Entscheidungen sind rasch zu treffen aber gleichzeitig sorgfältig abzuwägen. Es empfiehlt sich im Zuge des Planungsanstoßes einen Zeitplan für das Planungsvorhaben zu definieren, um das Projekt entgegen des Bedarfs zeitlich zu stark zu erstrecken. (REFA, 1991)

(Jakoby, 2015) beschreibt einen allgemein gehaltenen Prozess zur Lösungserarbeitung komplexer Probleme. Die Vorgehensweise ist in die vier Hauptphasen: Problemanalyse, Lösungsentwurf, Realisierung und Validierung unterteilt. Von der Grobstruktur und der inhaltlichen Ausrichtung sind insbesondere die ersten beiden Phasen vergleichbar mit den Schwerpunkten des REFA-Planungsansatzes vgl. Abbildung 6. Das Verfahren stellt dem Anwender verschiedene Methoden zur Seite, mit welchen eine existierende Problemstellung vollständig erkannt und strukturiert werden kann. Ausgehend von der Problemerkennung erfolgt die Formulierung eines konkreten Planungsziels. Im Zuge der Lösungserarbeitung werden zunächst verschiedene Handlungsalternativen skizziert, von denen letztendlich eine Idee detailliert ausgearbeitet und bewertet wird. Während der Realisierungs- und Validierungsphase werden jeweils problemspezifische Aufgaben bearbeitet. Darüber hinaus

zeichnet sich die Systematik dadurch aus, dass allgemeine und oft etwas vage formulierte Zielvorstellungen auf konkrete, messbare Teilziele heruntergebrochen werden (Jakoby, 2015).

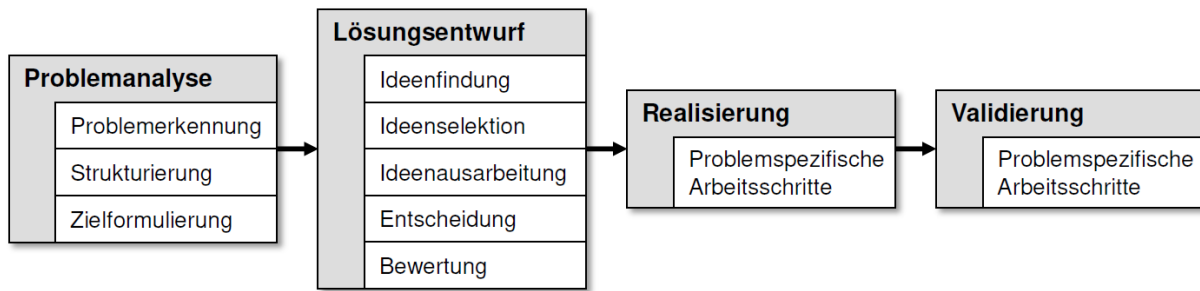


Abbildung 6: Allgemeiner Problemlösungsprozess nach Jakoby i. A. a. (Jakoby, 2015)

Neben den hier vorgestellten allgemeingültigen Planungsverfahren existiert in der Literatur noch eine Vielzahl weiterer Systematiken, die jedoch insgesamt eine sehr ähnliche Struktur aufweisen. (Bokranz et al., 2006) beschreibt in einer dreistufigen Systematik die Vorbereitung, Gestaltung und Umsetzung einer Systemplanung. Dagegen beinhaltet der Problemlösungsansatz von (Bransford & Stein, 1995) insgesamt fünf Planungsphasen, die inhaltlich eine große Ähnlichkeit zur Struktur der 6-Stufen-Methode nach REFA aufweisen. Namensgebend für den als ‚IDEAL Problem Solver‘ betitelten Ansatz sind die Anfangsbuchstaben der einzelnen Planungsphasen: Identify, Define, Explore, Act und Look(back). Einen konkreten Bezug zur Montagesystemplanung enthält der Ansatz hingegen nicht.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die beschriebenen Planungsverfahren aufgrund ihrer hohen Anwendungsneutralität sowohl für die Planung stückzahlflexibler als auch hybrider Arbeits- und Montagesysteme geeignet sind. Die Planungsvorgehensweise der anwendungsneutralen Verfahren ist generell sehr ähnlich aufgebaut. Die Unterschiede lassen sich in erster Linie durch die unterschiedliche Anzahl an Planungsschritten und verschiedene Formulierungen erklären. Um den Eignungsgrad einer ausgewählten Systematik für den jeweiligen Anwendungsfall (z. B. hybride Montage) zu verbessern, sind jedoch im Vorfeld einige Anpassungen bzw. Konkretisierungen notwendig.

Um die Entwicklung eines neuen Referenzplanungsprozesses zu ermöglichen werden im folgenden Abschnitt weiter verbreitete Planungssystematiken vorgestellt, welche konkret für die Gestaltung von Montagesystemen prädestiniert sind.

Die Systemgestaltung nach (Hartel & Lotter, 2012) ist speziell auf die Montageplanung ausgerichtet und besteht aus elf Schritten, die gegebenenfalls an die individuellen Anforderungen der Fertigungsumstände angepasst werden müssen. Aufgrund dessen gilt dieses Verfahren in einer Vielzahl industrieller Branchen als bewährter Planungsleitfaden. Grundsätzlich ist die Planungssystematik auf die drei Themenfelder Produktgestaltung, Komplexität und Produktionsvolumen ausgerichtet und bietet somit die Möglichkeit der Anpassbarkeit an die vorliegenden Produktionsparameter. Abbildung 7 skizziert die elf Ablaufschritte der Montagesystemplanung, ausgehend von einer Anforderungsliste, in welcher Soll-Zustände und Leistungsanforderungen definiert werden. Es folgen Analyseprozesse hinsichtlich des Produkts, des Montageablauf und der Funktion inklusive der Bestimmung der planmäßigen Durchführungszeit. Auf dessen Basis wird im fünften Schritt die Taktzeit des Arbeitssystem errechnet. Auf Grundlage der Layout- und Personalbedarfsplanung sowie einer generellen Verfügbarkeitsermittlung von Personal,

Material und Betriebsmitteln wird schließlich ein Pflichtenheft für das zukünftige Montagesystem erstellt. Die abschließenden Schritte (10 & 11) fokussieren die wirtschaftlichen Aspekte des Systems. Zu diesem Zweck werden die Investitionskosten kalkuliert und fließen gepaart mit verschiedenen weiteren Varianten der Wirtschaftlichkeitsrechnung in den Bewertungs- und Auswahlprozess mit ein. Im Wesentlichen zeichnet sich die Planungssystematik nach Lotter durch ihre ausgeprägte Anwendungsflexibilität und Anpassungsfähigkeit aus.

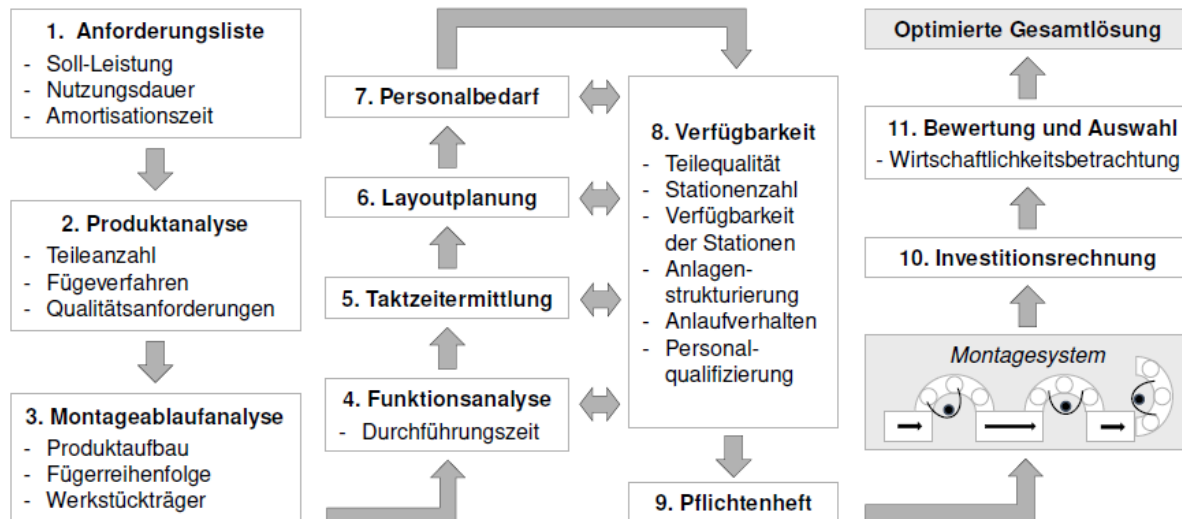


Abbildung 7: Montagesystemplanung nach Hartel und Lotter i. A. a. (Hartel & Lotter, 2012)

Als eine weitere in der Industrie hinreichend anerkannte Planungsmethodik gilt das Verfahren zur Planung komplexer Montagesysteme nach (Bullinger & Ammer, 1986). Der vollständige Planungsablauf wird durch sieben Abschnitte abgebildet. Die Methodik zeichnet sich dadurch aus, dass der Planungsansatz ganzheitlich im Unternehmensumfeld betrachtet wird. Dies zeigt sich beispielsweise dadurch, dass der erste Abschnitt die Bestimmung eines Projektleiters und die Zusammenstellung eines passenden Teams einschließt. Darüber hinaus werden verschiedene weitere Unternehmensbereiche wie das Marketing (Neuproduktplanung), die Konstruktionsabteilung (Produktänderung) und die Geschäftsführung miteinbezogen. Zudem wird die Phase des laufenden Betriebes mit abgebildet und stellt dem Anwender Methoden zur Kennzahlenerhebung sowie diverse Problemlösetechniken zur Seite. Unterstützt wird der Planungsverantwortliche bei der Vorgehensweise durch ein detailliertes Flussdiagramm, in welchem alle erforderlichen Planungsschritte, Entscheidungsinstanzen und mögliche Rückkopplungen übersichtlich dargestellt werden (Bullinger & Ammer, 1986). Die sieben Planungsabschnitte und deren inhaltliche Gestaltung sind in Abbildung 8 zusammengefasst.

Nr.	Planungsabschnitt:	Inhalt:
1)	<b>Projektorganisation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bildung eines Projektteams</li> <li>– Festlegung eines prinzipiellen Planungsablaufs</li> <li>– Ausarbeitung der Projektplanung und -steuerung</li> </ul>
2)	<b>Konzeption</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Planungsdaten beschaffen &amp; Ziel definieren</li> <li>– Erarbeitung von Prinziplösungen</li> <li>– Kalkulation der Montagekosten</li> </ul>
3)	<b>Ablaufplanung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ausarbeitung der Erzeugnisstruktur (Stückliste)</li> <li>– Planung des Montageablaufs (Vorranggraphen)</li> <li>– Zeit- und Kapazitätsermittlung</li> </ul>
4)	<b>Montagesystementwurf</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Planung der Betriebsmittel &amp; Materialbereitstellung</li> <li>– Layoutplanung</li> <li>– Festlegung und Bewertung des Montagesystems</li> </ul>
5)	<b>Ausarbeitung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Gestaltung der manuellen und / oder automatischen Montagestationen</li> <li>– Überprüfung der Vorgabezeiten</li> </ul>
6)	<b>Realisierung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Beschaffung der Betriebsmittel &amp; Personal</li> <li>– Montagesystemaufbau und -anlauf</li> </ul>
7)	<b>Betrieb</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kennzahlenermittlung</li> <li>– Problemanalyse &amp; Maßnahmenableitung</li> </ul>

Abbildung 8: Ablaufabschnitte der Planungsmethodik nach Bullinger i. A. a. (Bullinger & Ammer, 1986)

In einem späteren Ansatz beschreibt (Bullinger, 1995) die Planung flexibler Montagesysteme anhand von lediglich vier Planungsphasen. Diese setzen sich aus der Formulierung der Planungsaufgabe, der Planung des Montagesystems und der Arbeitsplätze sowie der Einführung des Systems zusammen. Auch diese Systematik verfolgt einen ganzheitlichen, bereichsübergreifenden Ansatz und stellt eine detaillierte Vorgehensweise mit einem starken Fokus auf die Phase der Konzeptentwicklung dar. Bei der Planungssystematik nach (Konold & Reger, 2009) gliedert sich die Vorgehensweise, wie in Abbildung 9 dargestellt, in fünf Planungsstufen. Weiterhin sind jeder Planungsstufe eine Reihe von Teilschritten zugeordnet, deren Bearbeitung im Regelfall chronologisch erfolgt. Ein Kernziel der Methodik ist die Einwicklung einer möglichst flexiblen Montagestruktur in Bezug auf Stückzahlen, Produktvarianten und Fügeprozesse. Zudem liegt der Fokus auf der automatisierungsfreundlichen Gestaltung von Bauteilen und Produkten, um ebenso den Planungsprozess von automatischen und hybriden Systemen abbilden zu können. Auf Basis der Zielformulierung werden in der Grobplanung Montagestrukturen entwickelt und Arbeitsabläufe geplant. Die ausgewählte Lösungsvariante wird im Zuge der Feinplanung detailliert ausgearbeitet, bevor das Montagesystem in der Folgestufe installiert werden kann. Während der Realisierung gilt es Betriebsmittel zu beschaffen, das Personal zu schulen und die Arbeitsplätze z. B. nach MTM (Methods-Time Measurement) zu gestalten. Erfolgt der Systemanlauf erfolgreich, kann die Abnahme durchgeführt und gegebenenfalls auftretende Fehler / Probleme beseitigt werden. Die Ergebnisse bzw. Lösungen einer jeden Planungsstufe sollten im Anschluss an diese nochmals kritisch überprüft werden, um Korrekturen zeitnah vornehmen zu können und Zeitverluste zu minimieren (Konold & Reger, 2009).

Planungsstufen					
	1. Aufgabenstellung	2. Grobplanung	3. Feinplanung	4. Realisierung	5. Anlauf
Planungsschritte	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziele festlegen</li> <li>- Terminrahmen erstellen</li> <li>- Verantwortlichkeiten klären</li> <li>- Projektablauf festlegen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Systemausbringung errechnen</li> <li>- Montagestruktur entwickeln</li> <li>- Arbeitsabläufe und Personalbedarf planen</li> <li>- Systemlösungen bewerten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- System detailliert ausarbeiten</li> <li>- Terminplan erstellen</li> <li>- Ausschreibungen durchführen</li> <li>- Wirtschaftlichkeitsnachweis überprüfen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Beschaffung veranlassen</li> <li>- Arbeitsplatzgestaltung (MTM)</li> <li>- Personal schulen</li> <li>- Montagesystem installieren</li> <li>- Probelauf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Systemanlauf analysieren</li> <li>- Fehler beseitigen</li> <li>- Abschlussdokumentation</li> <li>- Abnahme des Systems</li> </ul>

Abbildung 9: Planungsstufen nach Konold und Reger i. A. a. (Konold & Reger, 2009)

In Bezug auf die Planung und Gestaltung (stückzahlflexibler) Mensch-Roboter-Systeme ist der Methodik nach (Konold & Reger, 2009) eine vergleichsweise gute Eignung zuzuschreiben. Die Bewertung des Automatisierungsgrades ist nicht explizit vorgesehen, ließe sich aber unkompliziert in die Grob- und Feinplanungsstufen integrieren. Darüber hinaus werden verschiedene Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung (technisch, personell und organisatorisch) präsentiert, um bei der Neuplanung eines Montagesystems dieses „stufenweise mittels modular aufgebauter Montagesystemkomponenten“ zu erweitern.

Einen Planungsleitfaden zur Gestaltung von Arbeitssystemen stellen (Grob & Haffner, 1982) vor. Der Planungsablauf ist in acht Schritte unterteilt und ist vergleichsweise allgemein gehalten, da keine konkreten Analyse- oder Umsetzungsmethoden präsentiert werden. Im ersten Schritt erfolgt eine systematische Schwachstellenanalyse auf dessen Basis daraufhin die Zielsetzung in qualitativer und quantitativer Hinsicht formuliert wird. Die Aufgabenstellung wird im dritten Schritt konkretisiert, indem die Planungsaufgabe eingegrenzt wird und Verantwortlichkeiten geklärt werden. Auch die Auswahl geeigneter Kennzahlen sowie die Gewichtung der Systemkriterien dienen der Planungsvorbereitung. Der fünfte Schritt fokussiert die konkrete Planung des Arbeitssystems bzw. mehrerer Lösungsalternativen, welche anschließend auf Basis der Zielformulierung bewertet werden. Der vorletzte Planungsschritt beinhaltet die Präsentation der alternativen Planungskonzepte inklusive der Auswahl der favorisierten Variante. Sobald entschieden wurde, welche Systemlösung installiert werden soll, folgt im achten Schritt die Realisierung und Inbetriebnahme des Systems. Es empfiehlt sich zudem die Durchführung einer Erfolgskontrolle sowie die Erstellung einer Abschlussdokumentation. Der Fokus des Verfahrens liegt Grob und Haffner zufolge auf der Gestaltung des eigentlichen Arbeitssystems unter Berücksichtigung sämtlicher Planungsgrößen hinsichtlich Arbeitsumgebung und -organisation, Personal und Werkstattsteuerung.

Ein Planungsleitfaden für die Gestaltung von hybriden Montagesystemen wurde von (Slama & Bauer, 2004) entwickelt. Wie bei einem Großteil der Planungsprozesse wird auch dieses Verfahren in eine Grob- und eine Feinplanungsphase unterteilt. Während der Grobplanung gilt es systematisch eine Zielsetzung zu definieren sowie die Anforderungen erforderlicher Aufgaben zur Zielerreichung abzuleiten. Auf Basis der grundlegenden Planungsziele wird im weiteren Verlauf eine oder mehrere Prinzip Lösungen erarbeitet. Die Feinplanungsphase ist auf die Auslegung und Realisierung des Montagesystems ausgerichtet. Die Festlegung der Planungsziele erfolgt dabei mithilfe eines zu

erarbeitenden Zielsystems, welches Muss- und Sollkriterien beinhaltet. Dabei wird zwischen komplementären, konkurrierenden und indifferenten Kriterien bzw. Zielen unterschieden. Um den Montageplanern diese Aufgabe zu erleichtern, steht ihnen eine Reihe allgemeingültiger und bewährter Zielsetzungen zur Vorauswahl. Im Anschluss werden die Randbedingungen des Montagesystems beschrieben, um im nächsten Schritt die Layout- und Arbeitsplatzgestaltung für sämtliche Prinzip Lösungen zu entwerfen. Im Zuge der Montageablaufplanung ist das Planungsteam dazu aufgerufen, für jede Tätigkeit eine Einschätzung hinsichtlich der Automatisierbarkeit abzugeben.

Die Bewertung erfolgt anhand der folgenden fünf Abstufungen:

- Tätigkeit ohne Aufwand automatisierbar (++)
- Tätigkeit mit geringem Aufwand automatisierbar (+)
- Tätigkeit nur mittels frei programmierbarer Systeme automatisierbar (O)
- Tätigkeit nur unter Einsatz spezieller Sensorik automatisierbar (-)
- Tätigkeit nicht sinnvoll automatisierbar (--)

Auch nach (Slama & Bauer, 2004) endet die Grobplanungsphase mit der Bewertung der Umsetzungsvarianten und der Auswahl einer favorisierten Prinzip Lösung. Die Bewertung wird rechnerunterstützt mit einem Planungstool durchgeführt und stellt eine Entscheidungshilfe bei der Wahl des Automatisierungsgrades dar. Dazu werden sämtliche Teilaufgaben mittels MTM Verfahren analysiert und für die zulässigen Handhabungsoperatoren bewertet. Anhand der unterschiedlichen Zeitwerte für Mensch und Roboter lässt sich eine Gesamtdurchführungszeit des Montagevorgangs für manuelle, hybride und automatisierte Prinzip Lösungen berechnen. Darüber hinaus kann bei der Gewichtung der Planungsziele die Relevanz der Flexibilität bei Stückzahlschwankungen eingestellt werden.

Das Planungsverfahren nach (Slama & Bauer, 2004) integriert die Thematik der skalierbaren Montage mit variablem Automatisierungsgrad in gewisser Weise. Zu beachten ist jedoch, dass erst durch die Verwendung der Software ‚planAs‘ die Stückzahlflexibilität berücksichtigt wird. In der eigentlichen Planungsmethode ist der Aspekt der skalierbaren Fertigung nicht enthalten. Auch (Selevsek & Köhler, 2018) erkannten, dass die geringe Marktdurchdringung echter Kollaborationsanwendungen in der Industrie auf ein mangelndes Planungsverständnis zurückzuführen sei. Aufgrund dessen entwickelten sie unter der Berücksichtigung besonderer Anforderungen an die Mensch-Roboter-Kollaboration eine angepasste Planungssystematik für MRK-Systeme auf Basis des klassischen Planungsverfahrens nach (Konold & Reger, 2009).

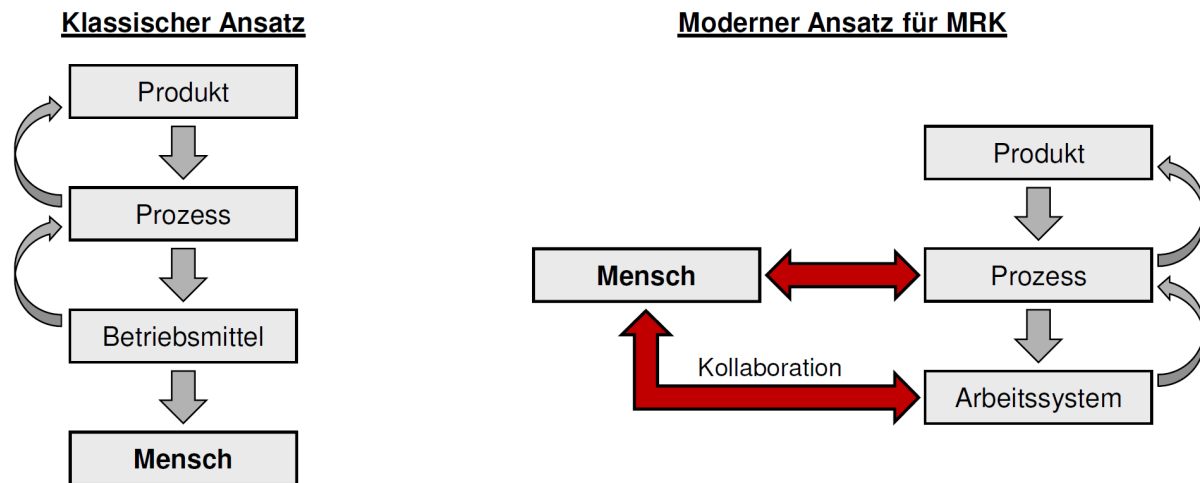


Abbildung 10: Angepasster MRK-Planungsablauf i. A. a. (Selevsek & Köhler, 2018)

Die Ausrichtung des Planungsablaufs wird dahingehend angepasst, dass der Faktor Mensch deutlich früher in die Planung integriert wird. Während beim klassischen Ansatz der Produktionsablauf sukzessive erarbeitet wird und der Mensch erst am Schluss im Zuge der Arbeitsplatzgestaltung berücksichtigt wird, bildet beim modernen MRK-Planungsansatz die optimale Funktionsteilung von Mensch und Roboter einen Schwerpunkt. Dieser neuartige Fokus auf den Menschen im Fertigungsprozess, welcher in Abbildung 10 dargestellt ist, wirkt sich signifikant auf die Gestaltung des Arbeitssystems aus und ist daher frühzeitig im Planungsverlauf zu berücksichtigen.

Grundsätzlich bleibt der fünfstufige Planungsablauf von (Konold & Reger, 2009) (vgl. Abbildung 9) erhalten. Die im Zuge der ersten Planungsstufe (Untersuchung der Aufgabenstellung) festgelegten Ziele können jedoch aufgrund der MRK-Anwendung deutlich umfangreicher sein. Zu den klassischen Zielformulierungen wie Produktivitäts- oder Flexibilitätssteigerung kommen nun Optimierungsansätze hinsichtlich Ergonomie oder physischer Entlastung hinzu. Es folgen die Grob- und die Feinplanungsphase, in denen neben Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen auch Sicherheitsaspekte der Mensch-Roboter-Interaktionen eine wichtige Rolle spielen. Auch wird während dieser Phasen geprüft, inwiefern eine Kollaboration in Bezug auf Arbeitsabläufe und Funktionsteilung von Mensch und Roboter tatsächlich realisierbar ist. (Köhler, 2017) definiert in diesem Zusammenhang die Schnittmenge der in Abbildung 11 dargestellten Bereiche als potentielle Einsatzbereiche für eine Mensch-Roboter-Kooperation. Ein echte kollaborative Interaktion sei demnach nur dann möglich, wenn alle vier Elemente die jeweiligen Anforderungen erfüllen.

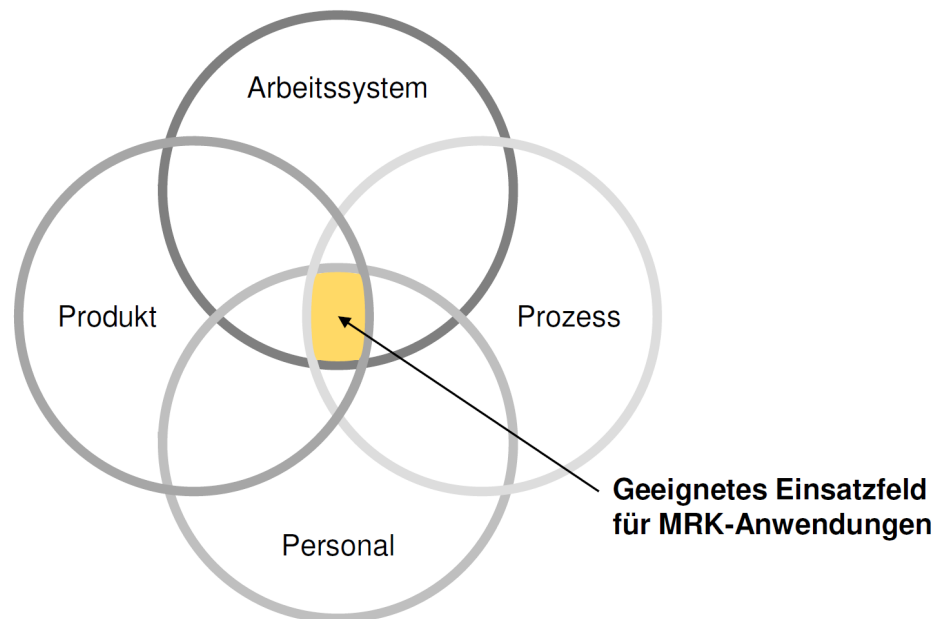


Abbildung 11: Schnittmenge des geeigneten MRK-Einsatzes i. A. a. (Köhler, 2017)

Die Realisierungsphase weist gegenüber dem klassischen Ansatz einen erhöhten Dokumentationsaufwand auf, welcher auf die gestiegenen Sicherheitsanforderungen im Zuge der Mensch-Roboter-Kollaboration zurückzuführen ist. Die Planungssystematik endet mit dem Fertigungsanlauf, in welchem die Abnahme des Arbeitssystems durchgeführt und gegebenenfalls auftretende Fehler und Probleme beseitigt werden. Die MABA-MABA-Liste (auch Haba-Maba-Liste) ist den fähigkeitsorientierten Planungsverfahren zuzuordnen und verfolgt den Ansatz, dass sämtliche Prozessschritte im Fertigungsablauf den spezifischen Fähigkeitsmerkmalen von Mensch und Maschine zugewiesen werden können. Auf diese Weise kann für jeden Teilvorgang der am besten geeignete Funktionsträger ermittelt werden. Mit der Entwicklung der industriellen Automatisierung erschien von 1960 bis 1990 eine Vielzahl dieser ‚Men are better – Machines are better‘ Vergleichslisten (Dekker, S., Woods, D, 2002). Dekker und Woods argumentieren, dass mit dieser Art der Montagegestaltung keine Fortschritte im Bereich der Aufgabenkoordination von Mensch und Maschine möglich seien. Den Kernkritikpunkt bildet die Tatsache, dass der Soll-Zustand lediglich durch eine automatisierte Version der Ist-Prozesse gebildet wird und keinen Raum für Innovationen zulässt. Die Abbildung und Integration moderner kollaborativer Systemlösungen ist demnach kaum möglich. Ein weiterer Ansatz zur fähigkeitsorientierten Ablaufplanung wurde von (Beumelburg, 2005) erarbeitet. Der dreistufige Aufbau des Systemmodells ist in Abbildung 12 dargestellt und dient der Entwicklung einer Montagablaufstruktur für die Mensch-Roboter-Kooperation in einer Arbeitszelle. Auf Basis der Beschreibung der einzelnen Fertigungsteilprozesse erfolgt eine Beurteilung des jeweils möglichen Automatisierungsgrades bzw. der Eignung von Mensch und Roboter. Zusammen mit den ermittelten Montagevorranggraphen und den hinterlegten Prozesszeiten dienen sie als Eingangsgrößen des Systemmodells. Die Vorgehensweise der Montageablaufentwicklung und die angewandten Methoden werden im zweiten Schritt, dem Vorgehensmodell, beschrieben. Mit der Zuordnung der jeweiligen optimalen Funktionsträger und der zeitlichen Prozessabstimmung wird schließlich ein Montageablaufmodell erarbeitet.

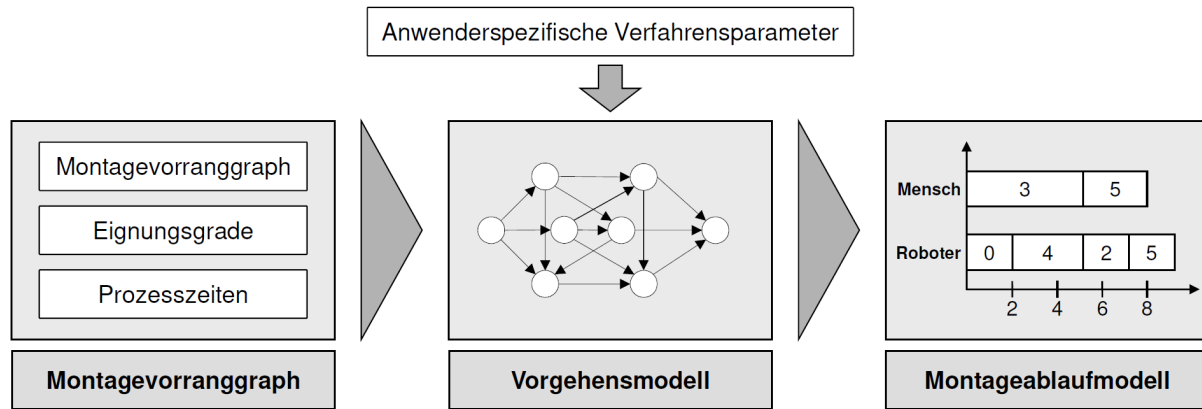


Abbildung 12: Modell zur fähigkeitsorientierten Montageplanung i. A. a. (Beumelburg, 2005)

In seiner Methodik zur Bestimmung des Automatisierungsgrades von Montageprozessen beschreibt (Ross, 2002) einen wirtschaftsfokussierten Planungsansatz, der bereits in der frühen Phase der Montageplanung zur Anwendung kommt. Ausgehend von den grundlegenden Produkt- und Prozessinformationen durchlaufen sämtliche Montageprozesse eine Art Eignungsprüfung, mit dem Ziel, die nicht wirtschaftlich automatisierbaren Prozesse herauszufiltern. Der Detaillierungsgrad steigt mit zunehmendem Planungsfortschritt. Durch die frühzeitige Anwendung der Methodik im Planungsverlauf ergibt sich die Möglichkeit die Automatisierbarkeit bereits bei der Produktgestaltung zu berücksichtigen. Die Bewertung der technischen Automatisierbarkeit erfolgt durch Anwendung der Nutzwertanalyse, die monetäre Bewertung wird mithilfe einer Kostenvergleichsrechnung bestimmt. Grundsätzlich dient das Verfahren nach Ross der Ermittlung und Bewertung eines wirtschaftlich optimalen Automatisierungsgrades für die Montagesystemplanung. Die Thematik einer flexiblen Automatisierbarkeit im Zuge von schwankenden Produktionsmengen ist nicht weiter von Bedeutung. Darüber hinaus existiert noch eine Vielzahl weiterer Planungssystematiken mit unterschiedlich ausgerichteten Schwerpunkten. (Deuse, Weisner & Hengstebeck, 2015) sieht ein hohes Potential in der Realisierung von cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS), bei denen die Fähigkeiten des Menschen durch den intelligenten Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien erweitert werden. Zu diesem Zweck sind neue, kollaborative Formen der Arbeitsorganisation zu entwickeln, innerhalb derer der Mensch als aktiver Träger von Entscheidungen und Optimierungsprozessen agieren kann. Ein zentrales Merkmal der von (Rother & Harris, 2001) entwickelten Methodik ist die mögliche Reduzierung des Automatisierungsgrades, um eine erhöhte Flexibilität und einen kontinuierlichen Mitarbeiterfluss zu ermöglichen. Grundsätzlich ist der Leitfaden in erster Linie auf die Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitssysteme ausgerichtet. Der Einsatz von Mensch-Roboter-Interaktionslösungen wird nicht näher thematisiert.

Da Produktionssysteme als Ganzes zunehmend zeitdynamischen Einflussfaktoren ausgesetzt sind, ist die Planung wandelbarer und anpassungsfähiger Systeme von zunehmender Bedeutung. In diesem Kontext thematisiert der Simultaneous Engineering Ansatz von (Dietz, 2014) die hohe und sich dynamisch verändernde Variantenvielfalt in Produktionssystemen im Zeitverlauf und liefert Anregungen für die produktstrukturabhängige Gestaltung von Fertigungssystemen.

Anhand dieser Zusammenstellung unterschiedlich ausgerichteter Planungssystematiken wird deutlich, welche Relevanz das Thema Arbeits- und Montagesystemplanung in der Vergangenheit hatte und bedingt durch neuartige Automatisierungsmöglichkeit auch weiterhin haben wird.

### Eignungsanalyse bestehender Planungssystematiken

Wie in Kapitel 1 beschreiben ändern sich Produktlebenszyklen, Marktentwicklungen und Stückzahlen sind immer schwieriger vorherzusagen so wie dies aktuell bei der Herstellung von Komponenten der Elektromobilität der Fall ist. Aus diesen Gründen gewinnen skalierbare Montagekonzepte mit einem anpassungsfähigen Automatisierungsgrad immer mehr an Bedeutung. Derzeit werden Produkte zu Beginn des Produktlebenszyklus häufig noch manuell gefertigt. Bei steigenden Stückzahlen ist diese manuelle Fertigung jedoch nicht mehr wirtschaftlich abzubilden und stößt auch hinsichtlich der Losgrößenentwicklungen häufig an ihre Kapazitätsgrenzen. Innovative Technologien wie die Leichtbau-Robotik und die Mensch-Roboter-Kollaboration bieten ein hohes Potential, die Produktion hinsichtlich der Stückzahlen flexibler zu gestalten. Derzeit gibt es jedoch keine Planungsverfahren oder Handlungsempfehlungen, die die Anforderungen an die Systemplanung gegebenenfalls unter Einbeziehung der Produktentwicklung von Anfang an berücksichtigen. Auf Basis dieser Ausgangssituation erfolgt in die Analyse bestehender Referenzplanungsprozesse. Planungssysteme stellen eine wichtige thematische Grundlage für die Entwicklung von skalierbaren Montagekonzepten dar. Sie dienen der Analyse, Planung, Gestaltung und Verbesserung sozio-technischer Arbeitssysteme und können durch geschickte Anwendung zu effizienteren Prozessen führen.

Ein Großteil derzeitiger Montagesysteme weist hinsichtlich einer stückzahl- oder auch variantenflexiblen Montage deutliche Defizite auf. Herkömmliche Planungsverfahren berücksichtigen spätere Anpassungen des Fertigungssystems infolge volatiler Absatzmengen insbesondere auf technischer Ebene nur unzureichend. Dies ist unter anderem bedingt durch die fehlende Modularität und unzureichende Standardisierung auf der Ebene der Anlagen bzw. Fertigungszellengestaltung. Darüber hinaus fehlt es den etablierten Planungsmethoden häufig an einer konkreten Zieldefinition in Bezug auf die erforderliche Stückzahlflexibilität während des Produktlebenszyklus. (Reinhart, 2003)

Für die Bewertung mussten zunächst geeignete Kriterien entwickelt werden, anhand derer die Verfahren in Bezug auf für diese Arbeit relevante Thematiken verglichen werden können. Die Kernkriterien ergeben sich dabei zum Teil bereits aus der übergeordneten Zielstellung. Demzufolge gilt es zu untersuchen, ob ein Verfahren für die konkrete Planung eines Montagesystem geeignet ist und ob der Fokus auf einer nachträglichen Skalierbarkeit liegt, sprich ob das System für flexible Stückzahlen ausgelegt ist. Auch die Integration von interaktiven Mensch-Roboter-Montageprozessen sollte in der Methodik thematisiert werden. Darüber hinaus haben die Recherchen zum Stand der Technik gezeigt, dass insbesondere in Bezug auf MRI die Aspekte Arbeitssicherheit und Ergonomie in der heutigen Zeit eine herausragende Bedeutung einnehmen.

Vor dem Hintergrund eines wandlungsfähigen Produktionssystems ist es demzufolge von großer Bedeutung, dass der Automatisierungsgrad der Prozesse hinsichtlich der erforderlichen Ausbringungsmenge an die jeweiligen Kapazitätsanforderungen angepasst werden kann. Die angesprochene Wandlungsfähigkeit ist grundsätzlich vermeintlich simpel zu realisieren, indem Arbeitsbereiche bedarfsmäßig mit Personal und Betriebsmitteln aufgestockt werden. Ab einem

gewissen Grad ist diese Anpassung jedoch nicht mehr wirtschaftlich umsetzbar bzw. birgt Gefahren bei stärkeren Stückzahlveränderungen. Der Vorteil skalierbarer bzw. stückzahlflexibler Montagesysteme besteht in der wirtschaftlichen und bedarfsorientierten Anpassung der Kapazität an die aktuellen Umweltbedingungen. Aus diesem Grund ist die Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit während des Planungsablaufs ein weiteres Bewertungskriterium. Basierend auf den obigen Kriterien erfolgt die Bewertung der Systematiken anhand der folgenden sechs Eignungsfragen:

- Eignet sich die Methodik für die Montagesystemplanung?
- Umfasst das Verfahren die Interaktion von Mensch und Roboter?
- Ist das Thema Skalierbarkeit für die Montagesystemplanung relevant?
- Eignet sich das Verfahren zur Realisierung eines (variablen) Automatisierungsgrades?
- Beinhaltet die Systematik eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung?
- Sind die Aspekte Ergonomie & Sicherheit (insbesondere bzgl. MRI) inbegriffen?

Eine Übersicht und Eignungsbewertung der vorgestellten Verfahren für die Arbeits- und Montagesystemplanung ist in Tabelle 1 zusammengestellt. Bezüglich der allgemeingültigen Planungsverfahren ist zu konstatieren, dass diese die wesentlichen Eignungskriterien nicht erfüllen. Aufgrund der zugrundeliegenden Anwendungsneutralität sind diese Methoden vielmehr als Basisplanungstechniken zu sehen, die bei Bedarf an einen spezifischen Fall angepasst werden können. Die anwendungsneutralen Verfahren greifen jedoch weder die Thematik der Skalierbarkeit, noch die Integration von Mensch-Roboter-Systemlösungen auf. Die bewerteten montagesystembezogenen Planungssystematiken bieten teils gute Ansätze für die (Teil-)Automatisierung der Fertigung. Darüber hinaus schließt der Großteil der Verfahren eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit mit ein. Insbesondere die Systematiken nach (Hartel & Lotter, 2012) und (Ross, 2002) sind in diesem Zusammenhang zu nennen. Häufig ist eine getrennte Gestaltung von manuellen und (teil-)automatisierten bzw. roboterbasierten Montageabläufen möglich. Die direkte Interaktion von Mensch und Roboter ist zumeist kein Bestandteil der Planungsmethoden oder wird nicht als wirtschaftliche Alternative dargestellt. Ein systematisches Verfahren für die ganzheitliche Planung von MRI-basierten Systemen unter der Berücksichtigung eines wirtschaftlichen Automatisierungsgrades fehlt bislang.

		Montagesystemplanung	Mensch-Roboter-Interaktion	Skalierbarkeit	(Variabler) Automatisierungsgrad	Wirtschaftlichkeit
Allgemeingültig	Daenzer	●	○	○	○	●
	REFA (6-Stufen)	●	○	○	○	●
	Jakoby	○	○	○	○	●
	Bokranz und Landau	○	○	○	○	●
	Bransford und Stein	○	○	○	○	●
Montagesystembezogen	Hartel und Lotter	●	○	●	●	●
	Bullinger	●	○	○	●	●
	Konold und Reger	●	●	●	●	●
	Grob und Haffner	●	○	○	●	●
	Slama und Bauer	●	●	●	●	●
	Selevsek und Köhler	●	●	○	●	●
	MABA-MABA	●	○	○	●	○
	Beumelburg	●	●	●	●	○
	Ross	●	○	●	●	●

● = vollständig behandelt   ● = teilweise behandelt   ○ = nicht behandelt

**Tabelle 1: Übersicht und Bewertung ausgewählter Planungsverfahren**

Gemäß (Oberer-Treitz & Verl, 2019) wird die Produktivität eines Fertigungssystems im Bereich der Mensch-Roboter-Interaktion maßgeblich durch die zugrunde liegenden Sicherheitsmerkmale beeinflusst. Die Beachtung arbeitssicherheitstechnischer und ergonomischer Planungsaspekte wird zumindest in Ansätzen größtenteils aufgegriffen. Hervorzuheben ist der Planungsablauf nach (Selevsek & Köhler, 2018), welcher dem Thema Arbeitssicherheit vor dem Hintergrund der Mensch-Roboter-Kollaboration eine bedeutende Rolle zuschreibt. Nach dem derzeitigen Stand der Forschung existieren noch keine Planungsverfahren, die speziell für die Gestaltung von stückzahlflexiblen Montagesystemen im Bereich der Mensch-Roboter-Kooperation entwickelt wurden. Der Großteil der etablierten Systematiken zur hybriden Systemplanung ist auf herkömmliche Teilautomatisierungslösungen fokussiert. Einige bereits existierende Methoden wurden jedoch um das Themenfeld der Mensch-Roboter-Interaktion erweitert. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang insbesondere die Planungsverfahren nach (Selevsek & Köhler, 2018) sowie (Beumelburg, 2005). Auch die Systematiken von (Konold & Reger, 2009) sowie (Slama & Bauer, 2004) bieten die Möglichkeit der Integration interaktiver Mensch-Roboter-Systemlösungen, sind jedoch ebenfalls nicht schwerpunktmäßig auf eine bestmögliche Skalierbarkeit ausgerichtet. Das Eignungskriterium der Skalierbarkeit wird von keinem der gelisteten Verfahren vollständig erfüllt. In der Literatur existieren diverse, teils moderne Ansätze zur Gestaltung wandlungsfähiger bzw. flexibler Produktionssysteme. Dazu zählen beispielsweise die Methoden von (Lanza, Stähr & Sapin, 2016) und (Kampker, Kohnhäuser, Kreisköther & Hehl, 2016) oder die Entwicklung einer skalierbaren Produktionsarchitektur von (Schuh & Gottschalk, 2004). Eine konkrete Planungsmethodik zur stufenweisen Konzeptionierung und Realisierung einer skalierbaren Montagelinie mit flexiblen Automatisierungslösungen existiert hingegen noch nicht. Demzufolge stellt die Entwicklung einer solchen Planungssystematik für die stückzahlflexible Montage im Bereich der Mensch-Roboter-Interaktion eine aktuelle Forschungslücke dar.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Verbreitung der Ergebnisse in der produzierenden Industrie über das Konsortium hinaus spielten zahlreiche beteiligte assoziierte Partner eine wichtige Rolle. Die branchenspezifische Verbreitung der Projektergebnisse erfolgt mit Unterstützung des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA). Über die Kanäle des VDMA konnten Konzepte zur flexiblen und skalierbaren Montage mit Experten diskutiert und weiter spezifiziert werden. Das Projekt wurde im Arbeitskreis vorgestellt und basierend auf den Unternehmensanforderungen in ein VDMA Einheitsblatt überführt. Die Forschungsergebnisse wurden in Zusammenarbeit mit dem FAPS und IPS in die universitäre Ausbildung angehender Ingenieure und Betriebswirte der FAU und TUDO integriert. Zudem fanden Transfer-Veranstaltungen zur Verbreitung der Projektinhalte und -ergebnisse statt. Einerseits erfolgte seitens IPS ein Wissenstransfer mit dem überwiegend aus KMU bestehenden Netzwerk „Industrie Ruhr Ost (NIRO)“ statt. Andererseits sicherte der FAPS den Transfer projektspezifischer Inhalte in das Netzwerk „Bayern Innovativ“ bestehend aus einer Vielzahl mittelständischer Unternehmen beispielsweise im Rahmen von Informationsständen am „Kooperationsforum Bordnetze“.

## 2 Eingehende Darstellung

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse zusammengefasst. Sie umfassen zum einen das Teilprojekt AutoPro<sup>2</sup> (2.1.1) und zum anderen das Teilprojekt SCALE (2.1.2). Die Beschreibung umfasst lediglich eine grobe Zusammenfassung zur Abgrenzung der beiden Teilprojekte im Projektkontext. Detaillierte Ergebnisse auf AP-Ebene sind Abschnitt 2.7 zu entnehmen.

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

#### 2.1.1 AutoPro<sup>2</sup>

Zur Steigerung des Automatisierungsgrades in der Produktion von Ladeinfrastruktur wurde im Teilvorhaben „Automatisierungsgerechte Produkt- und Prozessgestaltung (AutoPro<sup>2</sup>)“ entsprechend der Zielstellung ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt. Zum einen erfolgte eine Analyse der bestehenden Ladesäule sowie einzelner, vergleichbarer Benchmarking-Produkte mit Fokus auf automatisierungsgerechtes Design sowie die zur Herstellung einsetzbaren Montageprozesse und Fertigungstechnologien. Aus den Erkenntnissen erfolgte die Unterstützung des Partners Compleo bei der Erstellung eines Konzeptes für das zu entwickelnde Outlet-Modul in Form mehrerer Workshops, der Entwicklung von Designregeln und konkreten Empfehlungen von Anordnungen, Komponenten und Technologien. Zum anderen wurden passend zur Produktentwicklung geeignete Montageprozesse konzipiert, für das Outlet-Modul spezifisch ausgelegt und konstruiert sowie prototypisch validiert. Drei Prozessprototypen (PP) sind hierbei zu nennen: PP1: Automatisierte Verdrahtung, PP2: Zuführung ungeordneter Kabel, PP3: Platinen Montage; Durch die praktische Validierung der Prozessprototypen konnte die Prozessfähigkeit nachgewiesen werden und die bestehenden, vorrangig manuellen Tätigkeiten zur Ladeinfrastrukturmontage durch hochautomatisierte Prozesse substituiert werden. Neben der praktischen Validierung zentraler, neuartiger Montageprozesse wurde zudem ein digitales Modell einer gesamtheitlichen Prozesskette zur automatisierten Herstellung des Outlet-Moduls, Stand B2-Muster, entwickelt. Somit konnten alle Zielsetzungen aus dem Antrag erfüllt werden (vgl. Tabelle 2.1

Tabelle 2.1: Verwendung Teilvorhaben Konsortialführer FAPS

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
Produktanalyse	Bestehende Produkte analysiert, einzelne Optimierungsvorschläge konzipiert
Leitfaden	Katalog an Designregeln erstellt, die einen positiven Einfluss auf die Automatisierbarkeit der Produktion aufweisen
Prozessanalyse	Bestehende Prozesse analysiert und bewertet, geeignete Prozesse mit hohem Automatisierungspotential identifiziert
Prozessgestaltung	Konzept einer gesamtheitlichen Fertigungslinie mit Fokus auf die Skalierbarkeit mit Partner IPS entwickelt.

Automatisierungsgrad [%]	Digitales Modell einer gesamtheitlichen Fertigungslinie aufgebaut und Automatisierungsgrad skalierbar gestaltet
Prozesssicherheit	Kritische Montageprozesse (PP1, PP2, PP3) durch physischen Demonstratoraufbau auf Prozessfähigkeit überprüft

### 2.1.2 SCALE

Um den in Kapitel 1 beschriebenen Herausforderungen zu begegnen und die Herstellungskosten einer Ladesäule zu reduzieren, zielt das Teilforschungsvorhaben nicht darauf ab, einzelne Prozessschritte zu verbessern, sondern fokussiert nicht nur die Montageplanung, sondern auch die vorausgehende Produktentwicklung einer Ladesäule. Neben einem modularen, automatisierungsgerechten Produktdesign wurde der zugehörige robuste, skalierbare Fertigungsprozess durch den durchgängigen Einsatz digitaler Werkzeuge, entwickelt.

Darüber hinaus entstehen technische Synergiepotentiale, die zum Auf- und Ausbau der Kernkompetenzen deutscher Unternehmen beitragen und somit neue Marktchancen eröffnen, die wiederum die Sicherung und Schaffung von Arbeitsplätzen ermöglichen. Die wissenschaftlich-technische Verifizierung neuer Technologien und Produkte in dem in der Projektskizze beschriebenen Forschungsverbund und der Transfer von Wissen und Technologien aus der Forschung in die Anwendung ist dabei die essentielle Voraussetzung für die langfristige Konkurrenzfähigkeit der Wirtschaft. Um die internationale Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen in diesem Bereich sicherzustellen, ist umfangreiche industrielle Forschung zwingend erforderlich. Vor dem Hintergrund der erzielten Forschungsergebnisse leistet das Teilprojekt SCALE einen Beitrag zur Befähigung der Industrie zur Montagesystemplanung unter volatilen Marktbedingungen. Das Teilprojekt ist an der Erarbeitung von Lösungen in 9 Arbeitspaketen beteiligt. Die inhaltliche Zusammenfassung auf Arbeitspaketebene wird in Kapitel 2.7 beschrieben.

**Tabelle 2.2: Verwendung IPS**

<b>Geplantes Ergebnis</b>	<b>Erzieltes Ergebnis</b>
Entwicklung eines Referenzplanungsprozesses zur stückzahlflexiblen Montage	Erstellung der VDMA 66426:2024-02
Entwicklung eines skalierbares Montagekonzepts	Entwicklung eines skalierbares Montagekonzepts für die Ladesäulenproduktion abgeschlossen
Digitale Validierung des Produkt- und Produktionskonzepts	Digitale Validierung des Produkt- und Produktionskonzepts anhand des B1-Musters abgeschlossen
Abschließende Bewertung der Forschungsergebnisse	Abschließende Bewertung der Forschungsergebnisse abgeschlossen

## 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die relevanten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises umfassen schwerpunktmäßig Personal-, Sach- und Investitionskosten. Alle verwendeten Mittel werden in den zahlenmäßigen Nachweisen der Projektpartner detailliert aufgeführt.

Die **Personalkosten** stellten den überwiegenden Teil der Gesamtkosten dar. Sie umfassten insb. die Arbeiten der beteiligten Ingenieure, Prozessexperten, IT-Abteilungen und Forschungseinrichtungen.

Die **Sachkosten** beinhalteten größtenteils Reisemittel und zur Versuchsdurchführung notwendige Komponenten und Verbrauchsmittel geringen Wertes.

Die **Investitionskosten** unterscheiden sich zwischen den Forschungspartnern aufgrund der thematischen Ausrichtung der Teilprojekte. Der FAPS benötigte Investitionen in Form eines Roboteraufbaus mit dreidimensionaler Präzisionskamera und den jeweilig notwendigen Werkzeugen zur Umsetzung von PP1, PP2, PP3. Das IPS benötigte Greifer und Roboter zum Aufbau eines prototypischen Arbeitssystems (PP4). Das IPS investierte in die Anschaffung eines mobilen Arbeitstisches, welcher einen Leichtbauroboter einschließlich eines Greifer Systems beherbergt um eine Montagelinie im Umfeld der universitären Laborumgebung abzubilden.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten waren notwendig und angemessen.

## 2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Im Folgenden werden die konkreten wissenschaftlichen Verwertungspotentiale je Forschungspartner aufgezeigt. Eine wirtschaftliche Verwertung ist nicht vorgesehen.

**Tabelle 2.3: Verwertung Teilvorhaben Konsortialführer FAPS**

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Produktanalyse Ladesäule	Wissenstransfer an "Compleo Charging Solutions AG"; Übernahme Inhalte in Vorlesung „Wertschöpfungsprozesse von Kabelsystemen für die Mobilität der Zukunft“
Leitfaden Automatisierungsgerechtes Produkt design	Wissenstransfer an "Compleo Charging Solutions AG"; Übernahme Inhalte in Vorlesung „Handhabungs- und Montagetechnik“
Prozessanalyse Ladesäulenmontage	Wissenstransfer an "Compleo Charging Solutions AG"; Übernahme Inhalte in Vorlesung „Wertschöpfungsprozesse von Kabelsystemen für die Mobilität der Zukunft“
Prozessgestaltung PP1: Optische Erkennung von Kabelenden	Veröffentlichung der Bildverarbeitungsergebnisse und der zugehörigen Algorithmen auf 55th CIRP CMS (2022)
Prozessgestaltung PP1: Automatisierte Verdrahtung	Transfer der Ergebnisse in Projektantrag „Pneumatische Schaltschrank-Intralogistik und optische MONTageassistenz“ (DS0088, Datipilot, BMBF); Promotionsvorhaben; Veröffentlichung des Verdrahtungswerkzeuges und des zugehörigen Prozesses auf 56th CIRP CMS (2023)
Prozessgestaltung PP2: Zuführung ungeordneter Kabel	Transfer der Ergebnisse in Projektantrag „Pneumatische Schaltschrank-Intralogistik und optische MONTageassistenz“ (DS0088, Datipilot, BMBF)

Prozessgestaltung PP3: Platinenmontage	Transfer der Ergebnisse in Projektantrag „Hochautomatisierte Montage einer DC-Wallbox mit Einzelphasenregelung zur vollständigen Nutzung des dreiphasigen Stromnetzes“ (01MV23018B, Elektromobil, BMWK)
Automatisierungsgrad [%]	Fortlaufende Veröffentlichung von mit dem Versuchssystem gewonnenen Erkenntnissen; s. Prozessgestaltung
Prozesssicherheit	Fortlaufende Veröffentlichung von mit dem Versuchssystem gewonnenen Erkenntnissen; s. Prozessgestaltung
Demonstratoraufbau	Fortlaufende Veröffentlichung von mit dem Versuchssystem gewonnenen Erkenntnissen; Umbau und Nutzung des Demonstrators im Projekt „Hochautomatisierte Montage einer DC-Wallbox mit Einzelphasenregelung zur vollständigen Nutzung des dreiphasigen Stromnetzes“ (01MV23018B, Elektromobil, BMWK)

Tabelle 2.4: Verwertung Teilvorhaben B

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Entwicklung eines Referenzplanungsprozesses zur stückzahlflexiblen Montage	Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft anhand des VDMA Einheitsblatts 66426:2024-02; Überführung der Ergebnisse in nationale oder internationale Normdokumente
Entwicklung eines skalierbares Montagekonzepts	Stärkung des Wirtschaftsstandorts Deutschland mittels Produktivitätssteigerung der Ladesäulenmontage anhand skalierbarer Montagesysteme; Adaption auf weitere Branchen in Deutschland
Digitale Validierung des Produkt- und Produktionskonzepts (PP4)	Nachweis der Funktionalität und der möglichen Flexibilitätskorridore zur wirtschaftlichen Produktion innerhalb flexibler Stückzahlenszenarien; Überführung von Inhalten in Lehrveranstaltungen des Instituts und zur Nutzung der Akquirierung zukünftiger Forschungsprojekte
Abschließende Bewertung der Forschungsergebnisse	Evaluierung des Einflusses des Produktdesigns auf die Möglichkeiten zur Flexibilität und Skalierung von Montagesystemen anhand eines simultanen Planungsansatzes
Demonstrator Aufbau	Fortlaufende Veröffentlichung von mit dem Versuchssystem gewonnenen Erkenntnissen; Umbau und Nutzung des Demonstrators im Projekt „Smart Assembly“ zur Erforschung von Optimierungsmöglichkeiten MRI-basierter Arbeitsplätze mittels KI-Einsatzszenarien (KK5072203W00, ZIM, BMWK); Akquirierung zukünftiger Forschungsprojekte; Einbindung in die universitäre Lehre zur Steigerung des Praxisbezugs

Die Verwertungspläne der Partner FAPS (F) und IPS (I) des Gesamtvorhabens SUPPLY werden zusammenfassend in folgender Tabelle aufgeführt.

Verwertungspläne SUPPLY				
Lfd. Nr.	Ergebnis (orientiert an Zielsetzung)	Verwertungsmöglichkeit, -aktivität nach Art und Wirkung/Nutzen	Zeithorizont Realisierung	Status

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans



I1	Automatisierung von Elektronikmontageprozessen	Realisierung eines vom BMWK geförderten Forschungsprojekts mit dem Fokus der THT-Bauteilmontage: Smart Assembly - FKZ: KK5072203W00	Q4/2021	Projektlaufzeit bis Q2/2024
I2	Wissenschaftliche Veröffentlichungen, Konferenzbeiträge	Wissenstransfer in die Industrie und Forschung von Ergebnissen	Q1/2021, Q4/2023	Durchgeführt
I3	Demonstratoraufbau	Durchführung von prototypischen Laboruntersuchungen	Kontinuierlich	Durchgeführt
I4	Flexible und skalierbare Montagesysteme	Transfer in die universitäre Lehre mittels Lehrveranstaltungen	Kontinuierlich	Durchgeführt
I5	Flexible und skalierbare Montagesysteme	Transfer in universitäre Lehre mittels Wissenschaftlicher Abschlussarbeiten	Kontinuierlich	Durchgeführt
I6	Vorstellung der Projektergebnisse im Netzwerk RuhrOst e.V. (NIRO)	Transfer der Forschungsergebnisse in die regionale Industrie	Q4/2023	Durchgeführt
I7	Veröffentlichung eines VDMA Einheitsblatts	Referenzplanungsprozess überführt in die VDMA 66426	Q1/2024	Durchgeführt
I8	Veröffentlichung des Abschlussberichts	Transfer der Forschungsergebnisse in die Wissenschaft und Forschung	Q2/2024	Geplant
I9	Demonstratoraufbau	Kontinuierliche Einbindung in die universitäre Lehre mittels Lehrveranstaltungen; Nutzung zur Akquirierung und Durchführung zukünftiger Forschungsprojekte	Ab Q1/2024	Begonnen
I10	Flexible und skalierbare Montagesysteme	Kontinuierlicher Transfer in die universitäre Lehre mittels Lehrveranstaltungen	Q4/2024	Geplant
I11	Referenzplanungsprozesse	Vorstellung des Planungsansatzes im Rahmen von Austauschformaten mit der Industrie und Forschung	Q1/2025	Geplant
I12	Flexible und skalierbare Montagesysteme	Überführung der Forschungsergebnisse in aufbauende Forschungsanträge zur Fortführung der Forschungsideen	Q2/2025	Geplant
F1	Handhabung und Erkennung biegeschlaffer Bauteile	Transfer in universitäre Abschlussarbeiten	Kontinuierlich	Durchgeführt

F2	Handhabung und Erkennung biegeschlaffer Bauteile	Transfer in universitäre Lehrveranstaltungen (WeKaMo; HUM)	Kontinuierlich	Durchgeführt
F3	Teilergebnisse	Fachzeitschriften und Fachkongresse	Kontinuierlich	Veröffentlicht
F4	Three-dimensional pose estimation of deformable linear object tips based on a low-cost, two-dimensional sensor setup and AI-based evaluation	55th CIRP Conference on Manufacturing Systems	11/2022	Veröffentlicht
F5	Innovative robot tool for full-automatic handling and wiring of deformable linear cables	56th CIRP Conference on Manufacturing Systems	10/2023	Veröffentlicht
F6	Platinenmontage	Transfer der Ergebnisse in Projektantrag „Hochautomatisierte Montage einer DC-Wallbox mit Einzelphasenregelung zur vollständigen Nutzung des dreiphasigen Stromnetzes“ (01MV23018B, Elektromobil, BMWK)	2023	Durchgeführt
F7	Intralogistik biegeschlaffer Bauteile	Transfer in universitäre Abschlussarbeiten	Kontinuierlich	Durchgeführt
F8	Intralogistik biegeschlaffer Bauteile	Transfer in universitäre Lehrveranstaltungen (WeKaMo)	Kontinuierlich	Durchgeführt
F9	Veröffentlichung des Abschlussberichts	Transfer der Forschungsergebnisse in die Wissenschaft und Forschung	Q2/2024	Geplant
F10	Demonstratoraufbau	Umbau und Nutzung des Demonstrators im Projekt „Hochautomatisierte Montage einer DC-Wallbox mit Einzelphasenregelung zur vollständigen Nutzung des dreiphasigen Stromnetzes“ (01MV23018B, Elektromobil, BMWK)	2024-2026	Im Aufbau
F11	Demonstratoraufbau	Kontinuierliche Einbindung in die universitäre Lehre mittels Lehrveranstaltungen und fortlaufende Veröffentlichung von mit dem Demonstrator gewonnenen Erkenntnissen	2024-2026	Geplant

F12	Promotion	Promotion des wiss. Personals durch Vertiefung des Prozessprototyps „Transport ungeordneter Komponenten“	2025	Geplant
F13	Automatisierte Verdrahtung und Zuführung ungeordneter Kabel	Transfer der Ergebnisse in Projektantrag „Pneumatische Schaltschrank-Intralogistik und optische MONTageassistenz“ (DS0088, Datipilot, BMWF)	2025	Geplant

## 2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens sind keine Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant waren.

## 2.6 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 der Nebenbestimmungen

Tabelle 2.5: Veröffentlichungen Teilvorhaben Konsortialführer

Titel	Datum	Ort (Zeitungsnamen, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Three-dimensional pose estimation of deformable linear object tips based on a low-cost, two-dimensional sensor setup and AI-based evaluation	2022	55th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Lugano DOI: <a href="https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.015">https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.015</a>	Erkennung der Position und Ausrichtung von Kabelenden als Grundlage für den darauffolgenden Fügeprozess, zugehörige Methoden und Implementierung
Innovative robot tool for full-automatic handling and wiring of deformable linear cables	2023	56th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Cape Town DOI: <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2023.12.006">http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2023.12.006</a>	Automatisiertes Fügen von flexiblen Kabeln in Federklemmverbindungen, zugehöriger Prozess und Werkzeug

Tabelle 2.6: Veröffentlichungen Teilvorhaben B

Titel	Datum	Ort (Zeitungsnamen, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Scalability of Assembly Line Automation Based on the Integrated Product Development Approach	2021	Tagungsband des 6. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter, Hannover, 2021. DOI: <a href="https://doi.org/10.1007/978-3-030-74032-0_23">https://doi.org/10.1007/978-3-030-74032-0_23</a>	Flexible und skalierbare Montagesystemansätze mittels Mensch-Roboter-Kollaboration
Green Digital Twins in the Product Life Cycle	2023	Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und	Rolle der Produktionsplanung im Kontext des Produktentstehungsprozesses

		Betriebsorganisation (WGAB) e.V. Jahrgang 2023. DOI: <a href="https://doi.org/10.30844/wgab_2023_10">https://doi.org/10.30844/wgab_2023_10</a>	
VDMA 66426:2024-02	2024	<a href="https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdma-66426/375477540">https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdma-66426/375477540</a>	Referenzplanungsprozess für stückzahlflexible Montagesysteme

## 2.7 Inhaltliche Darstellung der Ergebnisse nach Arbeitspaketen

### 2.7.1 AP1 - Ist-Analyse und Anforderungsspezifikation

Das Ziel des ersten Arbeitspakets ist eine mehrdimensionale Ist-Analyse einschließlich der Spezifikation der Anforderungen an den Referenzplanungsprozess. Innerhalb des Berichtszeitraums wurden die Arbeitsinhalte in fünf Arbeitsschritten erarbeitet, deren Inhalte nachfolgend dokumentiert sind. Zur Analyse der Bestandteile von Ladesäulen wurden die notwendigen Komponenten betrachtet und in Bezug auf deren Verwendung hin analysiert.

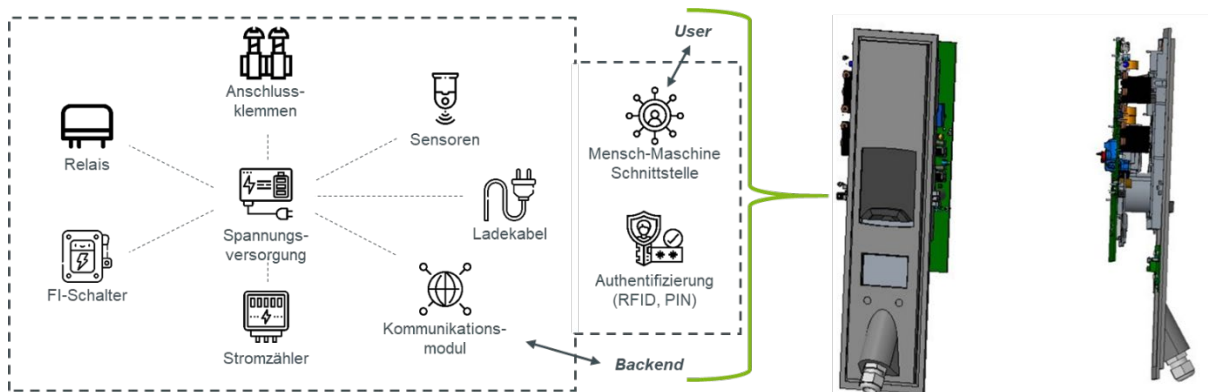


Abbildung 13: Standardkomponenten eines Outlet-Moduls

Dabei wurde eine Potenzialanalyse in Bezug auf die Automatisierungsgerechtigkeit der aktuellen Prozesse vorgenommen. Der Montageprozess gliedert sich in die beiden Bereiche elektrische und mechanische Bestückung sowie der erforderlichen Verkabelung. Bei den aktuellen Arbeitsplätzen handelt es sich um Einzelarbeitsplätze nach dem Prinzip der Mengenteilung mit einem geringen Standardisierungsgrad an denen sehr viele Produktvarianten montiert werden. Diese Art der Fertigungsorganisation ist aufgrund der hohen Varianz nicht gut für eine Automatisierung geeignet. Für das Outletmodul ist daher eine Artteilung mit hohem Standardisierungsgrad anzustreben. Die weiteren Analysen beziehen sich entsprechend auf die Prozesse ohne Einbeziehung der aktuellen physischen Arbeitssysteme. Die mechanische Bestückung umfasst neben der Gehäusevorbereitung vor allem die Montage von Zukaufteilen wie Sensoren, Schaltungen, Relais und Versorgungsmodulen. Die Tätigkeiten sind in diesem Bereich durch eine hohe Reproduzierbarkeit mittels biegesteifer Komponenten gekennzeichnet. Entsprechend ist eine Automatisierbarkeit mit vertretbarem Aufwand realisierbar. Im Bereich der elektrischen Verkabelung findet überwiegend die Montage biegeschlaffer Kabel und Komponenten mit teilweise komplexen Führungen statt. Der aktuelle Prozess ist nicht im Rahmen der Wirtschaftlichkeit von Ladesäulen automatisierbar und bedarf einer generellen

Neuplanung in Bezug auf Produktdesign und Verdrahtung zur Generierung von Automatisierungspotentialen.

Die Analyse der bestehenden Ladesäulenproduktionsprozesse wurde auf Basis einer Produktionsbegehung beim Partner Compleo durchgeführt. Neben der Aufnahme aller relevanten Produktionsschritte wurden Experteninterviews mit Produktionsmitarbeitern und -planern durchgeführt, um ein tieferes Verständnis der Prozesse aufzubauen. Beim betrachteten Produkt handelt es sich um AC-Ladesäulen für die Elektromobilität des Projektpartners Compleo.

Der Fokus liegt auf der Analyse der aktuellen Produktstruktur sowie der zugehörigen Fertigungsstruktur. Hierzu wurden folgende Inhalte erarbeitet:

- Analyse der Produktstruktur und -varianten auf Basis von Konstruktionsdaten und Produktmustern
- Analyse der Ist-Prozesse und der Produktvarianten des AC-Bereichs von „Rampe zu Rampe“
- Aufnahme eines Wertstroms zur Schaffung einer einheitlichen Diskussions- und Verständnisgrundlage im Rahmen des Projektes
- Typologisierung zur Charakterisierung der Produktionsmerkmale
- Auswertung der Produktionscharakteristika hinsichtlich der Projektzielstellung

Innerhalb des Arbeitsschritts wurde die bestehende Produktion typologisiert und quantifizierbar dokumentiert. Dies ermöglicht es innerhalb der aufbauenden Arbeitsschritte eine einheitliche Diskussionsgrundlage für die Ausarbeitung zu nutzen (vgl. Abbildung 14).

Nr.	Merkmal	Merkmalsausprägungen			
1	Art der Auftragsauslösung	Produktion auf Bestellung mit Einzelaufträgen	Produktion auf Bestellung mit Rahmenaufträgen	Kundenanonyme Vorproduktion / kundenauftragsbezogene Endproduktion	Produktion auf Lager
2	Beschaffungsart	Fremdbezug unbedeutend	Fremdbezug in größerem Umfang	Weitgehender Fremdbezug	
3	Fertigungsart	Einmalfertigung	Einzel- und Kleinserienfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung
4	Ablaufart in der Fertigung	Baustellenfertigung	Werkstattfertigung	Gruppen-/Linienfertigung	Fließfertigung
5	Kundenänderungseinflüsse während der Fertigung	Änderungseinflüsse in größerem Umfang	Änderungseinflüsse gelegentlich	Änderungseinflüsse unbedeutend	
6	Erzeugnispektrum	Erzeugnisse nach Kundenspezifikation	Typisierte Erzeugnisse mit kundenspez. Varianten	Standarderzeugnisse mit Varianten	Standarderzeugnisse ohne Varianten
7	Variantenanzahl	Hoch	Mittel	Gering	keine
8	Erzeugnisstruktur	Geringteilige Erzeugnisse	Mehrteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur	Mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur	
9	Materialflusskomplexität	Komplexer Materialfluss mit Rückflüssen	Komplexer Materialfluss ohne Rückflüsse	Linearer Materialfluss	
10	Schwankungen des Kundenbedarfs	Große Schwankungen	Mittlere Schwankungen	Geringe Schwankungen	stetig
11	Produktlebenszyklus	Kurz	Mittel	lang	

Abbildung 14: Produktionsmorphologie

Das Ladesäulenmodell „Advanced Solo 22 kW“ wurde auf Basis einer multikriteriellen Analyse als geeignetes Referenz-AC-Ladesäulenmodell aus dem Produktportfolio von Compleo identifiziert. Als geometrische Referenz wurde das CAD-Modell der Ladesäule „Advanced Fleet 22 kW“ eingesetzt, deren Komponenten, mit denen das Solo-Modell übereinstimmen. Die Kernpunkte, die aus der Analyse von Geometrie und Architektur hervorgehen, sind im Folgenden aufgelistet.

**Positiv**

- Modularer Aufbau der Ladesäule mit freien Komponentenslots für Zusatzfunktionen

- Mehrstufiger Aufbau (Gehäusefertigung, Montageplattenbestückung und -verdrahtung, Hochzeit, Gehäusebestückung, Endverdrahtung) ermöglicht einen größeren Montagefreiraum insb. bei der Montageplattenbestückung.
- Einsatz eines vorkonfektionierten Kabelsatzes

### **Negativ**

- Vorrangige Umsetzung in Differentialbauweise
- Großteil der elektronischen Komponenten mit Schraubanschlüssen
- Physische Trennung von Steuerung und Netzteil (Tür) von den restlichen Bauteilen (Tragschiene, Schrank) erfordert größere Kabelsätze und erhöht Montageaufwand
- Hohe Anzahl an Antriebs- und Justagesystemen für Schraubverbindungen

### **Neutral**

- Eine Montageplatte bietet Platz für Komponenten von zwei Ladepunkten
- Nutzung eines standardisierten Tragschienensystems (35mm) für den Großteil der elektronischen Komponenten

Die Analyse der bestehenden Produktion brachte positive, negative und neutrale Aspekte der manuellen Ladesäulenmontage hervor. Mit Hinblick auf die automatisierte Durchführbarkeit wurden diese kritisch hinterfragt. Auf Basis der Produktionsbegehung und mehrerer Experteninterviews wurden die folgenden Erkenntnisse bezüglich der Montage gewonnen:

### **Positiv**

- Einsatz von Fügehilfen in der Montage
- Verdrahtung mit erhöhtem Montagefreiraum (vgl. mehrstufiger Aufbau)
- Spezialisierungseffekte durch Trennung der Bestückung und Verdrahtung in der Montage

### **Negativ**

- Kein Einsatz von Automatisierungs-technik in der Montage
- Hohe Anzahl biegeschlaffer Bauteile benötigen ca. 41% der gesamten Montagezeit
- Unterschiedliche Fügerichtungen und -ebenen
- Komplexer Verlegeweg und Einfädeln der Kabel in die Montageplatte

### **Neutral**

- Hohe Fertigungstiefe für Gehäuse und die mechanischen Hilfsbauteile
- Herstellung von Einzelteilen nach dem Werkstattprinzip
- Montage der funktionalen Einheiten weitgehend in Gruppenfertigung

Das Projektziel einer skalierbaren Montagelinie beruht auf der Anforderung den Kundenbedarf trotz ungewisser Stückzahlentwicklungen bedienen zu können. Die Skalierung einer Produktion geht mit ihrer Produktionskapazität einher. Entsprechend ist das übergeordnete Ziel den Bedarf zu erfüllen, sowohl für geringe als auch hohe Stückzahlen. Deren Schwankungen beruhen auf externen Einflussfaktoren, die produkt- beziehungsweise branchenspezifisch sind. Entsprechend steht eine hohe Produktionsflexibilität im Fokus. Im Detail wurden folgende Anforderungen identifiziert.

- Maximierung der Flexibilitätskorridore der Montagelinie zur wirtschaftlichen Herstellung von Ladesäulen für ein breites Stückzahlenspektrum
- Schaffung von Flexibilitätskorridoren durch organisatorische, technische und personelle Maßnahmen
- Organisatorische Maßnahmen: Veränderung der Schichtanzahl, Variation der Arbeitszeit, Fertigwarenlager, variantenflexible Montage
- Technische Maßnahmen: Haupt- und Nebensystemgestaltung, Ausbau und Rückbau von Anlagen, Anpassung des Automatisierungsgrads
- Personelle Maßnahmen: Veränderung der Mitarbeiteranzahl, Einsatz von Springerpersonal
- Manuell und automatisierte Ausführbarkeit der zeitintensiven Prozesse, um Skalierbarkeit zu gewährleisten
- Einheitliche Einlege- und Fügerichtung für möglichst alle Komponenten
- Reduktion der Varianz von Verbindungssteilen, deren Antriebsformen und Anzugsmomenten
- Definition eines Grundbauteils zur Umsetzung eines flussorientierten Montageablaufs

Auf Basis der erarbeiteten Ergebnisse wurden Anforderungen an den Produktentstehungsprozess zusammengestellt und dokumentiert. Auf Grund der im frühen Projektstadium fehlenden Outletmodul-Spezifizierung konnten wesentliche Einflussfaktoren von Beginn an nicht analysiert und in die Dokumentation überführt werden. Um den Fortschritt des Anforderungskatalogs voranzubringen, wurde ein zusätzlicher Arbeitsschritt durchgeführt. Dieser beinhaltet eine Marktanalyse bestehender Elektronikprodukte, welche ebenfalls unsicheren Absatzprognosen unterliegen. Damit konnten wesentlich präzisere Ergebnisse erarbeitet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in einem späteren Projektstadium auf das Outlet-Modul übertragen. Der resultierende Anforderungskatalog enthält Informationen zu den folgenden Schwerpunkten:

- Anpassung an Stückzahlenschwankungen mittels Gleichlaufprinzip
- Bildung eines großen Flexibilitätskorridors zur wirtschaftlichen Produktion bei unterschiedlichsten Stückzahlanforderungen
- Berücksichtigung von kurzen Produktlebenszyklen im Umfeld der Elektromobilität
- Berücksichtigung der technischen Rahmenbedingungen von Leichtbaurobotern bezüglich der Arbeitsplatzgestaltung und dem Produktdesign
- Anforderungen an das Produktdesign zur Steigerung der Flexibilitätskorridore
- Schnittstellendefinition für unterschiedliche Planungsstufen und Kompetenzen
- Reduktion der Produktvarianz durch Definition vorgefertigter Konfigurationen
- Reduktion der Anzahl an biegeschlaffen Bauteilen (Kabeln)
- Formgleiches Modul für Ladedose und Ladekabel zur späten Variantenbildung
- Hoher Integrationsgrad elektronischer Bauteile auf Platine
- Montagefreundliche Bauweise (Nest-, Schachtel- oder Schichtbauweise)
- Integrale Bauweise zur Reduktion von Verbindungssteilen
- Push-In Anschlussklemmen für alle elektronischen Komponenten

Durch den entwickelten Anforderungskatalog wurden die produktionstechnischen Belange hinsichtlich der genannten Schwerpunkte berücksichtigt. Dies ermöglicht somit eine Maximierung der

Produktionsflexibilität zur wirtschaftlichen Fertigung von Ladesäulen unter schwankenden Marktanforderungen. Es wurden verschiedene Technologien aus unterschiedlichen Branchen herangezogen, um mögliche Anforderungen für die Ladesäulenproduktion abzuleiten und auf Basis dessen die Entwicklung des Referenzplanungsprozesses zu fördern. Zu den betrachteten Technologien gehören insbesondere modulare Produktgestaltungsstrategien wie beispielsweise der modulare Längs- bzw. Querbaukasten der Volkswagen AG und das modulare Produktdesign von modernen Desktop-Computern. Durch diese Aufbaustrategien entsteht die Möglichkeit, verschiedene Modelle auf einer Produktionslinie zu fertigen. Zudem lässt sich so eine Kundenindividualisierung beliebig festlegen, ohne dass die Variabilität großen Einfluss auf die Montageprozesse nimmt. Dadurch kann die Flexibilität weiter gesteigert werden. Aufgrund dieser Vorteile wurde im Rahmen von SUPPLY ein modulares Produktdesign als „enabler“ für eine hohe Montageflexibilität identifiziert.

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurde zudem ein Benchmarking von nutzbaren Technologien und ähnlichen Produkten durchgeführt. Die identifizierten Technologien und Produkte ermöglichen eine beschleunigte Erstellung von Outlet-Modul-Konzepten. Zudem lässt sich aus dem Aufbau der untersuchten Produkte, die vergleichbare, hochintegrierte, elektromechanische Module darstellen, implizites Designwissen als Designregeln ableiten. In der folgenden Tabelle findet sich eine kurze Übersicht über zur Verfügung stehende Technologien.

**Tabelle 2.7: Kurzübersicht von betrachteten Technologien**

Technologie / Produkt	Ebene	Vorteil	Nachteil	Eignung
Push-In	Anschluss	Automatisiertes Stecken möglich	Einzelleiter-Verdrahtung	2.0
Wirelaid	Leiterplatte	Drähte ersetzen Dickkupfertechnik Reduktion der Kupferdicke und Kosten	Komplexes Design und Fertigung	3.5
Stanzbiegetechnik	Kabelbaum	Biegestarke Einlegeteile zur Signal- und Leistungsvernetzung	Anzahl der Einzelteile entspricht den substituierten Kabeln	3.0
SLIM.flex	Leiterplatte, Kabelbaum	Kompakte, geordnete Signalübertragung; Reduktion der Teilezahl	Kostenintensiv Manueller Eingriff notwendig	4.0
Flachbandkabel + Schneidklemmen	Kabelbaum	Kompakte, geordnete Signalübertragung; Reduktion der Teilezahl	Vorzugsweise manuelle Verdrahtungstätigkeit	2.5
Stromschiene + Anschlussklemme	Kabelbaum	Kompakte, geordnete Signalübertragung; Reduktion der Teilezahl	Offene, stromführende Leiter	2.0

Neben dem produkt- und prozessbezogenen Benchmarking wurde auch der Referenzplanungsprozess in der Praxis näher untersucht. Klar definierte Verantwortlichkeiten und ein strukturiertes Vorgehen bilden die Basis für einen erfolgreichen Produktentstehungsprozess (PEP). Klare Kommunikationswege und kurzzyklische interdisziplinäre Entscheidungsrunden sind in diesem Kontext erfolgskritisch. Diese Erkenntnisse sind in die Entwicklung des Referenzplanungsprozesses (AP 2) eingeflossen.

### 2.7.2 AP2 - Referenzplanungsprozess für die skalierbare Montage

Auf Basis der vorangegangenen Analyse hinsichtlich bestehender Planungssystematiken (vgl. Kapitel 1.4) wurde aufgezeigt, dass kein Ansatz vollumfänglich die wirtschaftliche Fertigung von Ladesäulen unter der aufgezeigten Ausgangssituation in Kapitel 1 ermöglicht. In AP2 wurden die Rahmenbedingungen für einen skalierbaren Referenzplanungsprozess definiert, welcher unter volatilen Marktbedingungen die Planung von stückzahlflexiblen Montagesystemen ermöglicht. Die folgenden Ausführungen umfassen die wichtigsten Aspekte des Referenzplanungsprozesses, welche erforderlich sind, um die wissenschaftliche Vorgehensweise nachzuvollziehen. Für Detaillierte Planungsaspekte sei an dieser Stelle auf VDMA 66426:2024-02 verwiesen. Diese beinhaltet über die hier beschriebenen Aspekte der Planung zusätzliche Informationen zur montagegerechten Produktentwicklung sowie zur Auslegung von MRK-Szenarien.

Unter dem Begriff Flexibilität versteht man die Eigenschaft eines Systems (beispielsweise eines Produktionssystems) zur fortlaufenden Größenveränderung. Unter betriebswirtschaftlichen Aspekten ist damit in der Regel die Fähigkeit zum Wachstum gemeint, ohne die bestehenden Strukturen erneuern und weitere Investitionen tätigen zu müssen. Mitunter kann jedoch auch eine Verkleinerung des Systems sinnvoll sein, um wirtschaftlich erfolgreich zu skalieren. Der Begriff der Skalierung beschreibt erweiternd den Zustand der Neuinvestition, welche getätigt werden müssen, sofern der bestehende Flexibilitätskorridor eine wirtschaftliche Produktion nicht ermöglicht. Abbildung 15 stellt den Investitionsverlauf eines Systems im Rahmen der Flexibilität und der Skalierung einander gegenüber.

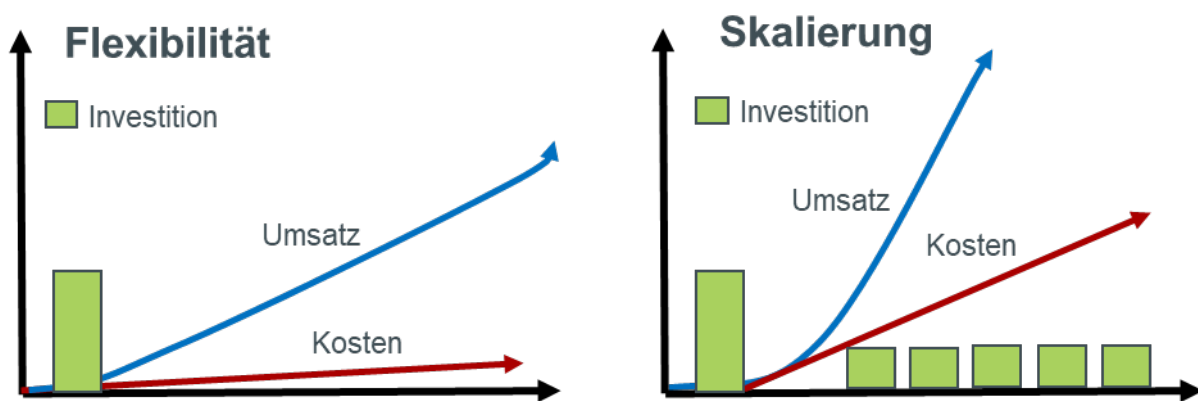


Abbildung 15: Flexibilität und Skalierung eines Produktionssystems

(Stegmüller & Zürn, 2014, S. 104) grenzen die Skalierung von der Flexibilität dahingehend ab, dass die Flexibilität einer Anlage bereits zu ihrem Planungszeitpunkt bekannt ist. Wird nun auf Änderungen reagiert, kann dies nur innerhalb vorab definierter Grenzen und unter vorgehaltenem Ressourceneinsatz erfolgen. Mit zunehmender Volatilität der Absatzmärkte ist der Flexibilitätspuffer jedoch nicht mehr ausreichend hinsichtlich einer wirtschaftlichen Organisation der Produktion. Im Folgenden wird der Begriff „skalierbares Montagesystem“ im Zusammenhang mit der Flexibilität und Skalierung verwendet.

Das übergeordnete Ziel bei der Realisierung skalierbarer Montagesysteme ist die kontinuierliche und bedarfsorientierte Anpassung der erforderlichen Produktionskapazität an die veränderlichen

Anforderungen der Absatzmärkte. Für den Fall schwankender Stückzahlen existiert eine Reihe verschiedener Strategien zum Angleichen der Fertigungskapazitäten.

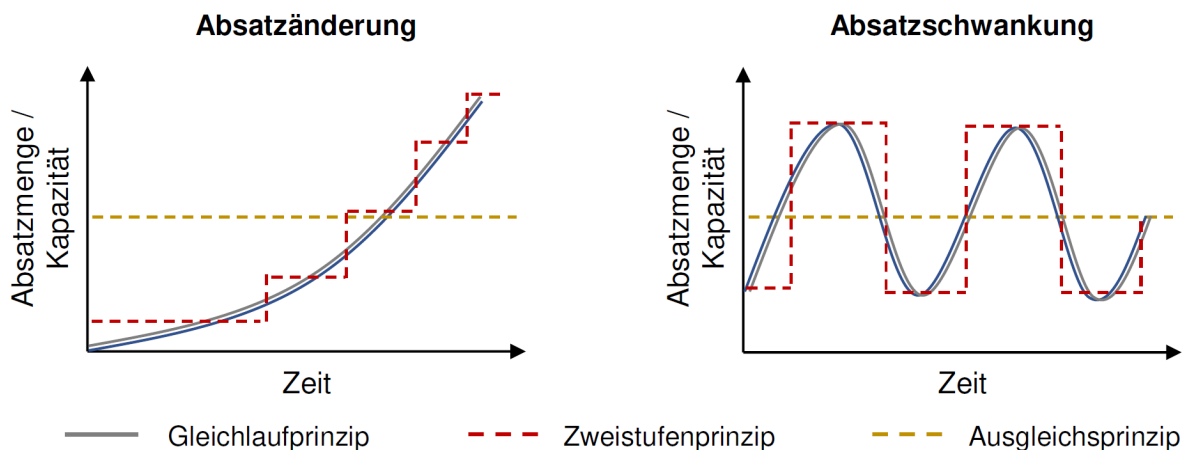


Abbildung 16: Prinzipien der Kapazitätsanpassung i. A. a. (Reinhart, 1999)

(Hoitsch, 1993) und (Reinhart, 1999, 2003) unterscheiden drei verschiedene Prinzipien, mit welchen die Produktionskapazität an die Nachfrage angepasst werden kann: Das Gleichlaufprinzip (synchronisierte Anpassung), das Zweistufenprinzip (stufenweise Anpassung) und das Ausgleichsprinzip (keine Kapazitätsanpassung). Dabei wird grundsätzlich unterschieden, ob es sich um eine langfristige und damit schwierig zu prognostizierende Absatzänderung oder um eine regelmäßige (z. B. saisonale) Absatzschwankung handelt. Die Anpassung mittels einer der drei Strategien ist jedoch nicht davon abhängig, ob es sich um eine Änderung oder Schwankung handelt. Das Ziel eines produzierenden Unternehmens sollte es sein, die Produktionskapazität möglichst kontinuierlich an den Absatzverlauf anzupassen. Abbildung 16 veranschaulicht exemplarisch die Prinzip Verläufe bei Absatzänderungen und -schwankungen.

Beim Gleichlaufprinzip erfolgt die Angleichung von Absatzvolumen und Produktionskapazität nahezu synchron. Demzufolge erfordert diese Strategie einen vergleichsweise hohen Monitoring- und Analyseaufwand. Nach dem Ausgleichsprinzip gibt es keine kontinuierliche Kapazitätsanpassung, vielmehr gleichen sich Über- und Unterkapazität und einen definierten Zeitraum aus. Dieses Prinzip findet in der Praxis größtenteils bei saisonalen Absatzschwankungen Anwendung (z. B. im Heizungssektor). Den Mittelweg der beiden Strategien bildet das Zweistufenprinzip, bei dem die Anpassung von Kapazität und Absatzmenge stufenweise erfolgt (Reinhart, 2003, S. 191).

Des Weiteren existieren zur Änderung der Montagekapazität Strategien auf organisatorischer, technischer und personeller Ebene. Für jede dieser drei Ebenen sind verschiedene Strategien zur Kapazitätsanpassung denkbar (vgl. AP 4). Bei der Planung eines Montagesystems wird der Aspekt der Flexibilität im Kontext schwankender Absatzzahlen häufig als eines der Kernziele ausgegeben. Allerdings wird dabei oft lediglich die maximale Ausbringungsmenge der Fertigungseinrichtung auf das Jahr gesehen definiert. Größere Stückzahlschwankungen gelten im Regelfall als nicht planbare Zustände und die angestrebte Flexibilität wird zu einer nicht quantifizierbaren Zielgröße. Ein weiteres Problem der Montagesystemplanung stellt die zunehmende Variantenvielfalt dar. (Köhler, 2004, 13 f.; Krüger, 2004, S.53 f.)

Aufgrund der vorherrschenden hohen Volatilität in gewissen Absatzmärkten ergeben sich spezifische Anforderungen an die Montagesystemplanung. Kurze Planungszyklen, gute Skalierbarkeit und ein flexibler Automatisierungsgrad stellen die Kernherausforderungen im Planungsprozess dar. Die herkömmliche sequenzielle Planung von Montagesystemen kann dieser Dynamik des Marktes nicht gerecht werden. Die Anforderungen einer stückzahlflexiblen Fertigungslinie mit variablem Automatisierungsgrad sind zudem bereits während der Produktentwicklung zu beachten. Speziell ein späterer Robotereinsatz im Zuge der Mensch- Roboter-Interaktion wird maßgeblich vom Produktdesign beeinflusst. Neben vielen klassischen Mechanismen zur Fertigungssteuerung bietet die Variation des Automatisierungsgrades infolge der Entwicklung kooperativer bzw. kollaborativer Robotersysteme einen vielversprechenden Ansatz. Ein großer Vorteil bei der Interaktion von Mensch und Roboter ist, dass sich deren ansonsten komplementären Fähigkeiten bei der Zusammenarbeit optimal ergänzen. Durch die Nutzung dieser Synergien kann die Ausbringungsmenge gesteigert werden, indem vormals manuelle Tätigkeiten nun mithilfe eines Roboters teilautomatisiert erledigt werden. Der Aufwand hinsichtlich Planung und Realisierung eines flexibel automatisierbaren Montagesystems ist vergleichsweise hoch. Es besteht zudem ein erhöhtes Investitionsrisiko, da sich die Systemplanung nur an prognostizierten Stückzahlen orientieren kann. Aus diesen Gründen ist verstärkt auf die Erweiterbarkeit des Montagesystems bzw. die Wiederverwendbarkeit von Komponenten zu achten. Es empfiehlt sich ein modularer Systemaufbau, um die anfallenden Kosten für Umbaumaßnahmen oder für den Wiederanlauf zu minimieren (Krüger, 2004, S. 85–86).

(Lanza et al., 2016, S. 615) zufolge wird eine Verbreitung skalierbarer Montagesysteme in der industriellen Produktion erst dann voranschreiten, wenn die finanziellen Systemvorteile ausreichend gut quantifizierbar sind. Demzufolge besteht eine der Kernherausforderungen an eine Planungsmethodik darin, auch die monetären Auswirkungen quantitativ darzustellen. Darüber hinaus muss das Verfahren eine zielgerichtete Unterstützung bei der technischen Ausgestaltung des Fertigungssystems leisten.

Das Potential skalierbarer Montagesysteme besteht in der wirtschaftlichen, bedarfsorientierten und synchronen Anpassung der Kapazität an die aktuellen Anforderungen des Marktes. Zu beachten ist, dass diese Wandlungsfähigkeit des Produktionssystems frühzeitig im Planungsprozess zu berücksichtigen ist, um spätere Zustandsänderungen so effizient wie möglich zu gestalten. (Reinhart, 1999, S. 514) zufolge kann die Anpassungsfähigkeit nur mithilfe vorab ausgearbeiteter Strategien und einem kontinuierlichen Monitoring der Absatzzahlen gewährleistet werden. Auf diese Weise kann ein produzierendes Unternehmen, insbesondere in Zeiten unsicherer Absatzprognosen und volatiler Kundennachfragen, seine Wettbewerbsfähigkeit stärken.

Um Montagesysteme stückzahlflexibel auszulegen und gestalten zu können, müssen bereits frühzeitig im Planungsprozess die entsprechenden Weichen dahingehend gestellt werden. Dies beinhaltet unter anderem eine Prognose des möglichen bzw. planmäßigen Absatzverlaufs und nicht nur, wie häufig üblich, die bloße Auslegung des Fertigungssystems auf eine maximale Produkt- oder Output Menge. Nur auf diese Weise kann der Produktionsbedarf adäquat an die jeweilige Situation am Absatzmarkt angepasst werden. Die Anforderungen an ein skalierbares Montagesystem sind vielfältig und umfassen neben der organisatorischen und personellen auch Kriterien der technischen Ebene. Um zu jedem

Zeitpunkt der Produktion einen wirtschaftlichen Betrieb sicherzustellen, ist eine effiziente Auslastung der Kapazität von entscheidender Bedeutung. Dies inkludiert neben der zur Verfügung stehenden Anlagenkapazität auch das Leistungsvermögen der Mitarbeiter. Des Weiteren ist eine bedarfsgerechte Produktion entscheidend, um die Stückzahlen an das aktuelle Absatzverhalten anzupassen. Das erfordert sowohl die Anpassbarkeit an kurz-, mittel und langfristige Absatzveränderungen (bspw. beim Produktionsanlauf) als auch die Anpassungsfähigkeit an die verschiedenen Arten der Absatzveränderungen (vgl. Abbildung 15). Eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit ist in diesen Fällen entscheidend, um auf der einen Seite Engpässe zu vermeiden und auf der anderen Seite keine Überschüsse zu produzieren. Zu diesem Zweck ist die vorherige Entwicklung geeigneter Strategien oder Handlungsalternativen vonnöten, welche an einen festgelegten Absatzverlauf gekoppelt sind. Auf diese Weise können beim Überschreiten eines definierten Absatzvolumens oder bei einer prozentualen Absatzsteigerung von beispielsweise 15 % vorab erarbeitete Maßnahmen unmittelbar ergriffen werden. Voraussetzungen hierfür sind ein kontinuierliches Monitoring und eine permanente Beobachtung der aktuellen Marktsituation. Darüber hinaus ist die Variabilität des Automatisierungsgrades von großer Bedeutung, wenn es um die technische Flexibilität des Montagesystems geht. Ziel ist es, die Modularität und Erweiterbarkeit des Arbeitssystems sowohl auf Zellen- und Anlagenebene als auch auf Betriebsmittelebene durchzusetzen.

Die Gewährleistung der Arbeitssicherheit und die Minimierung von physischer Belastung unter ergonomischen Gesichtspunkten bilden grundsätzlich die Basisanforderungen an ein jedes Montagesystem. Insbesondere vor dem Hintergrund der planmäßigen Zusammenarbeit von Mensch und Roboter gilt es die Sicherheitsanforderungen bei der Montagesystemplanung miteinzubeziehen. Ein generelles Ziel ist es, eine möglichst hohe Produktivität des Montagesystems zu generieren, obgleich die erhöhten Sicherheitsanforderungen beim Einsatz von MRI diese (negativ) beeinflussen können. Ein weiterer Punkt im Zusammenhang mit der Mensch-Roboter-Systemgestaltung ist die fähigkeitsorientierte Zuordnung und Verteilung der anfallenden Aufgaben und Tätigkeiten. Zu diesem Zweck ist für jeden Prozessschritt der (maximale) Grad der Automatisierbarkeit festzulegen, um so bei steigenden Absatzzahlen gegebenenfalls mit einer Erhöhung des Automatisierungsgrades entgegenzusteuern. Auch die Hinterlegung der benötigten Durchführungszeiten, sowohl vom Menschen als auch vom Roboter, ist erforderlich für eine spätere aufwandsarme Anpassung der Montageabläufe und gewährleistet eine bessere Vergleichbarkeit der Funktionsträger. Die Anforderungen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Effizienz (optimale Auslastung) beinhalten darüber hinaus die Sicherstellung der hinreichenden Fertigungs- bzw. Produktqualität, so dass Ausschuss oder Nacharbeit keine monetären Belastungen darstellen.

Der Aufbau des Referenzplanungsprozesses gliedert sich in vier Ebenen von null bis drei (Abbildung 17). Die Ebene null hat hierbei nur eine repräsentative Rolle und soll den Planungsanstoß für die Montagesystemplanung in den Gesamtkontext einordnen. Dieser resultiert auf der bereits in Kapitel 1 vorangegangenen Argumentationsführung. Im Folgenden werden die darauf aufbauenden Ebenen eins bis drei erläutert.

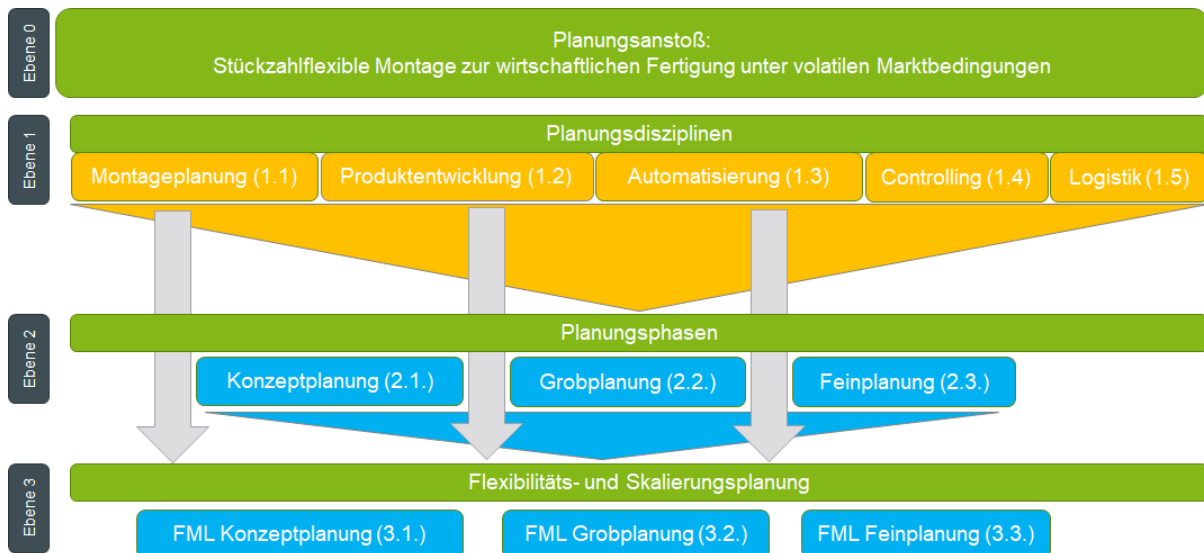


Abbildung 17: Schematische Gliederung des Referenzplanungsprozesses

Um ein allgemeingültiges Planungsverfahren zu entwickeln bedarf es einer entsprechenden Darstellungsweise. Daraus folgt, dass Planungsprozesse nicht durch ein konkretes Vorgehensmodell repräsentiert werden und somit keine zeitlich feste Reihenfolge befolgen müssen, sondern neutral die Aktivitäten und Akteure der jeweiligen Planungsschritte hinsichtlich ihrer Input- und Outputgrößen aufzeigt. Zur Visualisierung innerhalb der Ebenen eins und zwei wird im Rahmen des vorliegenden Dokuments auf die Darstellungsform mittels SADT Notation - Integration Definition for Function Modeling (IDEF0) (ISO / IEC / IEEE 31320-1) zurückgegriffen, welche eine neutrale Prozessmodellierung ermöglicht.

Zur inhaltlichen Strukturierung des Referenzplanungsprozesses sind die jeweiligen Planungsaktivitäten den beteiligten Kompetenzbereichen zuzuordnen, welche auf der ersten Planungsebene verortet sind. Diese im Folgenden als „Planungsdisziplin“ bezeichneten Bereiche werden im Folgenden kurz erläutert:

- **Produktentwicklung:** Die Produktentwicklung verwaltet und verantwortet das zu produzierende Produkt einschließlich dessen Varianten. Bei der Neuentwicklung werden die Phasen des A-, B und C-Musters, sowie über diesen Referenzplanungsprozess hinausgehend der abschließenden Serienreife durchlaufen. Die Produktentwicklung ermöglicht durch ein kompatibles Design die Automatisierung von Montageinhalten maßgeblich.
- **Montageplanung:** Die Montageplanung gestaltet den Montageprozess im Zusammenhang mit wertschöpfenden Tätigkeiten der Produktion dar. In der Regel handelt es sich hierbei um den letzten Schritt bis zum fertigen (Vor-)Produkt. In diesem Zusammenhang wird die Layout Planung durchgeführt. Schwerpunkt der Montageplanung die Auslegung von Montagesystemen für den vorgesehenen Einsatzzweck. Dabei ist innerhalb dieser Planungsdisziplinen die Ausgestaltung erforderlichen Flexibilitäts- und Skalierungsbausteine vorgesehen. Aufgrund der Zentralität des Themenbereichs kann die Montageplanung als übergeordneter Planungsprozesskoordinator betrachtet werden.
- **Automatisierung:** Die Automatisierung entwickelt und plant Lösungen zum Einsatz hybrider Montagesysteme auf Basis des bestehenden Produktmusters. Dabei unterstützt sie die

Montageplanung bei der Identifikation von MRI-Integrationsmöglichkeiten innerhalb einzelner Montagetätigkeiten. Dabei werden die zugehörigen Arbeitsplätze von der Automatisierung gestaltet und die resultierenden Zykluszeitwerte bereitgestellt. Erweiternd verantwortet die Automatisierung die besonderen Sicherheitsvorkehrungen bei der Gestaltung von MRI-Arbeitsplätzen im Umfeld der Montage.

- **Controlling:** Das Controlling unterstützt die Montagesystemplanung durch die Prognose von Absatzzahlen hinsichtlich der zukünftigen Produktnachfrage. Dabei ermöglicht er in der Planung die Eingrenzung von Flexibilitätskorridoren, welche anhand von minimalen und maximalen Stückzahlprognosen definiert werden können. Zudem stellt es wirtschaftlichkeitsvorgaben für das zu planende Montagesystem auf, welche durch die Montageplanung zu erfüllen sind.
- **Logistik:** Die Intralogistikplanung stellt alle für die Montage erforderlichen Halbzeuge und Baugruppen zur Verfügung. Sie versorgt das Montagesystem mit den erforderlichen Bauteilen innerhalb eines definierten Anlieferungszyklus. Die Betrachtung der Logistik stellt keinen Schwerpunkt innerhalb des vorliegenden Planungsprozesses dar, sondern wird lediglich grob dargestellt.

Zur Herstellung des planerischen Zusammenhangs zwischen den Planungsdisziplinen werden die Informationsflüsse durch IDEF0-Diagramme visualisiert. Die zeitliche Einordnung der einzelnen Planungsschritte der Planungsdisziplinen werden im Rahmen der zweiten Ebene betrachtet und weisen die folgenden Planungszustände auf:

- **Konzeptionsphase:** In dieser Phase existieren nur grobe Rahmenbedingungen, insbesondere geringe Fortschritte in der Produktentwicklung, welche es lediglich ermöglichen Montagesystemalternativen auf konzeptioneller Ebene zu erstellen. Diese Phase wird mit der Erstellung eines A-Produktmusters durch die Produktentwicklung abgeschlossen.
- **Grobplanungsphase:** Aufbauend auf den Ergebnissen der Konzeptphase werden die Montagesystemvarianten durch quantitative und qualitative Ansätze geprüft und bewertet. Zudem wird das Planungsszenario bedingt durch Stückzahlanforderungen konkretisiert und eine Planungsvariante weiter beplant. Dieses wird in einem konkreten Investitionsplan kontinuierlich hinsichtlich monetärer Kriterien bewertet und überwacht. Durch Bereitstellung eines B-Produktmusters wird die Planung detailliert und es können erste Montagesysteme, sowie MRI-Einsatzszenarien beplant werden.
- **Feinplanungsphase:** Auf Basis eines C-Produktmusters werden die montagespezifischen Rahmenbedingungen festgehalten und in eine Detailplanung überführt. Diese ermöglicht die Festlegung genauer Flexibilitäts- und Skalierungsbausteine zur Schaffung eines ganzheitlichen Montagesystems. Dabei stehen insbesondere die Produktvarianten im Fokus der Betrachtungen und ermöglichen die Planung finaler skalierbarer Montagesysteme. Im Anschluss kann dieses in die Serienbetreuung überführt werden.

Die dritte Ebene beschreibt die konkrete Montagesystemplanung Flexibilitäts- und Skalierungsplanung im Zusammenhang mit einem variablen Automatisierungsgrad. Diese Ebene definiert das detaillierte Vorgehen zur Schaffung eines skalierbaren Montagesystems unter Anwendung geeigneter Methoden.

Diese unterstützen den Anwender in der Adaption auf den eigenen Anwendungsfall und ermöglichen die spezifische Auslegung des Systems.

Die drei Planungsebenen des Referenzplanungsprozesses gliedern sich in die zeitlichen Planungsabläufe Konzept-, Grob- und Feinplanung ein mit Ausnahme der ersten Ebene. Diese stellt den gesamten Planungsprozess übergeordnet dar. Die erste Ebene des Referenzplanungsprozesses zeigt damit die allgemeinen Zusammenhänge hinsichtlich der Input-, Output-, sowie Steuerungs- und Methodenflüsse in einer ganzheitlichen Betrachtung aller Planungsdisziplinen auf. Dabei werden diese in einen ganzheitlichen Zusammenhang gesetzt und geben einen Überblick über die jeweiligen Zuständigkeiten. Auf der zweiten Planungsebene befinden sich die ganzheitlichen Planungsaktivitäten unterteilt nach den Fortschrittsstufen Konzept-, Grob- und Feinplanung. Im Rahmen der Konzeptplanung finden die vom Planungsanstoß ausgehenden ersten Aktivitäten statt, welche sich auf alle Disziplinen mit Ausnahme der Logistik erstrecken. Für diesen Bereich ist ein theoretischer Entwicklungsstand eines Montagesystems erforderlich, welcher erst zum Abschluss der Konzeptplanung erreicht wird, daher beginnt die Logistikplanung erst im Abschnitt der Grobplanung. Die Planungsebene drei beschreibt die Anwendung und Kombination von Methoden zur ganzheitlichen Planung eines skalierbaren Montagesystems, welche auf Ebene zwei innerhalb der IDEF0-Diagramme dargestellt wurde. Innerhalb der dritten Ebene wird ein konkretes Planungsvorgehen anhand allgemeingültiger Rahmenbedingungen beschrieben. Zur Orientierung innerhalb des Gesamtprozesses werden die Kodierungen der Ebene zwei angegeben.

Um die grundlegende Flexibilität innerhalb einer Skalierungsstufe zu ermöglichen, wird auf das Materialflussorganisationsprinzip der Flexible-Manpower-Line (FML) zurückgegriffen. Eine FML ist vor allem für Unternehmen bestimmt, bei denen eine vollständige Automatisierung aufgrund von schwankender Nachfrage, oder hoher Variantenvielfalt noch nicht wirtschaftlich ist. FMLs können sowohl manuelle als auch automatisierte Arbeitsplätze umfassen. Auch teilautomatisierte Arbeitsplätze in der Form von Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) sind möglich, wodurch die Roboter manuelle Tätigkeiten bei der Bewegung schwerer Werkstücke unterstützen oder redundanten Arbeiten übernehmen können.

Die Mitarbeiter sind zentral für die erfolgreiche Nutzung einer FML. Dabei werden jedoch auch höhere Anforderungen gestellt als bei herkömmlichen Produktionslinien. „Die Ausbildung und Fähigkeiten der Mitarbeiter“ sind von zentraler Bedeutung, da diese innerhalb der FML an allen Stationen angelernt werden müssen. Dies ist notwendig, um selbst bei Unterbesetzung flexibel arbeiten zu können. „In einer optimierten Fabrik beherrscht idealerweise jeder Mitarbeiter jedes Produkt an jeder Station“ (Bertagnolli, 2020, S. 177). FMLs setzen dadurch eine höhere Qualifikation als bei herkömmlichen Produktionslinien voraus.

Die letzte Voraussetzung ist die Flexibilität der Mitarbeiter bezogen auf die Arbeitszeit und Verfügbarkeit. Die FML ist nur dann sinnvoll, wenn auf eine veränderte Nachfrage auch die Mitarbeiteranzahl angepasst werden kann. Die Produktionssteuerung muss in der Lage sein, die Arbeitszeit der Mitarbeiter flexibel anzupassen. Einige Mitarbeiter sollten zum Beispiel auf Abruf verfügbar sein, um höhere Mengen produzieren zu können (Bertagnolli, 2020, S. 178). Für die Organisation sind „Zeitkonten für Mehr- und Minderarbeit sowie passende Lohnsysteme“ relevant, um

die Mitarbeiter flexibel einsetzen zu können (Bertagnolli, 2020, S. 177). Diese Flexibilität muss im Rahmen mit den gesetzlichen Vorgaben und in mit Absprache mit den Gewerkschaften umgesetzt werden.

Mit den zuvor aufgeführten Voraussetzungen wird die Implementierung einer FML ermöglicht. Bevor im späteren Verlauf auf die reale Umsetzung eingegangen wird, soll zunächst der prinzipielle Ablauf einer FML verdeutlicht werden.

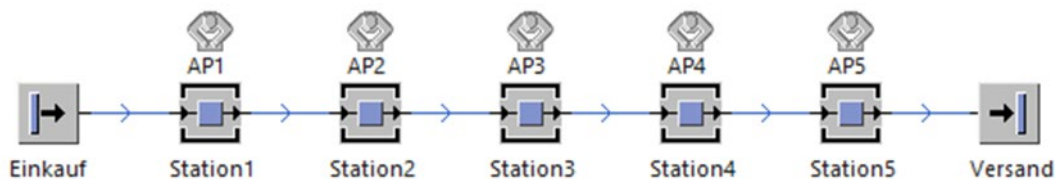


Abbildung 18: Konventionelle Montagelinie

Heutige konventionelle Montagelinien (Abbildung 18) nach dem Fertigungsprinzip der Fließfertigung zeichnen sich vor allem durch die Aneinanderreihung von Arbeitsplätzen hinsichtlich des Materialflusses aus. Dies bringt einige Nachteile mit sich, welche eine Produktivitätsminderung hervorrufen können. Die folgende Abbildung zeigt eine idealisierte Form einer solchen konventionellen Montagelinie.

Würde eine solche Montagelinie in Unterbesetzung betrieben werden, so würden am Ende eines Laufzyklus ein langer Laufweg entstehen. Aus diesem Grund kann bei einer solchen Montagelinie die Ausbringungsmenge nur schwer über die Anzahl der Mitarbeiter angepasst werden, da diese Laufwege einen erheblichen Anteil der Arbeitszeit der Mitarbeiter ausmachen werden. Dadurch werden selbst bei der Entfernung von nur einer Arbeitskraft die Durchlaufzeit eines Produkts erheblich erhöht. Dies reduziert die Möglichkeiten der Produktionsorganisation auf variierende Nachfragen zu reagieren, ohne die Stückkosten drastisch zu steigern (Gorecki & Pautsch, 2018, S. 171 f.).

Die Umgehung dieser Problemstellung erfordert eine andere Anordnung der Arbeitsplätze, welche auf die Minimierung der Laufwege zwischen den Stationen fokussiert ist. Daher wird vorzugsweise eine U-Zellen Anordnung für FMLs verwendet. Dadurch können FMLs mit unterschiedlichen Mitarbeiteranzahlen geplant und sinnvolle Laufwege erstellt werden. In der Folgenden Abbildung 19 wurde die in Abbildung 18 vorgestellte konventionelle Montagelinie in eine U-förmige FML umgebaut.

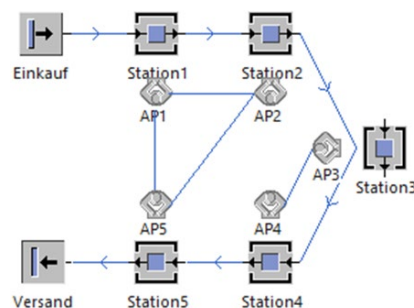


Abbildung 19: Darstellung einer typischen FML in U-Form

Bei einer geringeren Auslastung könnte die Montagelinie zum Beispiel mit zwei Mitarbeitern betrieben werden, indem die Arbeitsplätze 1-2-5 und 3-4 in zwei Laufzyklen unterteilt werden. Die Erstellung der Laufzyklen der Mitarbeiter kann in einer FML frei vorgenommen werden, sie werden lediglich durch die Restriktionen des Linientakts oder dem Stationslayout beschränkt.

Die Stationslayout Erstellung erfolgt in Verbindung mit der Planung der Laufzyklen, da die Erstellung der Laufzyklen in Abhängigkeit der einzelnen Stationszykluszeiten die weitere Laufwegplanung bestimmt. Allgemein wird die Planung des Layouts durch verschiedene Einflüsse eingeschränkt:

- **Fläche:** Fabrikfläche ist nicht schnell erweiterbar. Daher muss die Anordnung der Arbeitsstationen auch nach diesem Gesichtspunkt durchgeführt werden. Zudem wird die Erweiterung der FML durch parallele Arbeitsstationen eingeschränkt.
- **Taktzeit:** Hierdurch wird die Dimensionierung der Auslegung eingeschränkt. Um eine bestimmte Taktzeit zu unterschreiten ist eine gewisse Anzahl an Stationen notwendig. Diese Gedanken müssen sich insbesondere bei der Engpassstation gemacht werden, um diese u.U. parallel zu erweitern.
- **Zugänglichkeit:** Die Mitarbeiter sollten auch im Betrieb des Montagesystems schnell in der Lage sein ihren Arbeitsplatz zu verlassen. Die Mitarbeiter dürfen durch die Fließbänder oder Arbeitsplätze nicht auf dem Weg zum Notausgang behindert werden.
- **Mitarbeiterlaufzyklen:** Mobile Montagestationen können die Planung des Arbeitsstationslayouts in Abhängigkeit der Laufzyklen unterstützen.

Eine solche Montagelinie kann theoretisch von einem Mitarbeiter bis zu einer Vollbesetzung betrieben werden. Selbst bei einer Vollbesetzung besitzt dieser Aufbau Vorteile über der konventionellen Montagelinie, da die Mitarbeiter durch die kürzeren Laufwege besser in der Lage sind sich gegenseitig zu unterstützen.

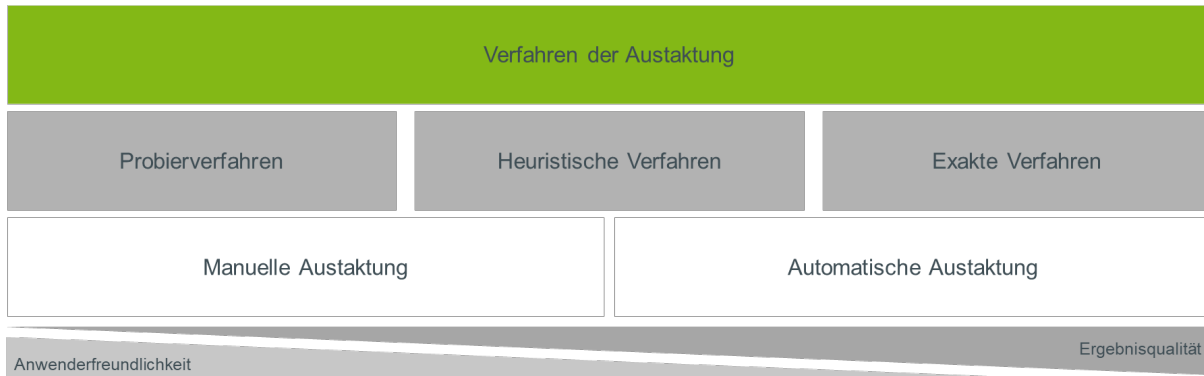
Um zwischen der Organisation eines Montagesystems und dem zu montierenden Produkt einen Zusammenhang herzustellen dient der Vorranggraph als Informationsgrundlage zur Entwicklung einer geeigneten Leistungsabstimmung. Der Vorranggraph dient als Informationsgrundlage zur Darstellung komplexer Montageprozesse. Dabei stellt der Vorranggraph die mögliche Montagefolge eines Produkts dar und dient damit als Planungsgrundlage für die Montagesystemplanung. Im Rahmen der Leistungsabstimmung können anhand des Vorranggraphen die Anzahl der erforderlichen Montagestationen sowie deren inhaltliche Zuordnung hinsichtlich der Montagevorgänge vorgenommen werden. Die Darstellungsform des Vorranggraphen kann zwischen grafisch, Matrixform und tabellarisch variieren. Abbildung 20 stellt die drei Darstellungsformen gegenüber.



Abbildung 20: Darstellungsformen eines Vorranggraphen

Je nach Form der Datenverarbeitung im Rahmen der Leistungsabstimmung ist die Darstellungsform entsprechend zu wählen. Die grafische Darstellung bietet sich insbesondere für manuelle Austaktungen an, da sie die Montageabläufe visuell in ein logisches Muster überführt und die Leistungsabstimmung visuell nachvollzogen beziehungsweise überprüft werden kann. Eine Matrixdarstellung vereinfacht die IT-gestützte Leistungsabstimmung (exakte Austaktungsverfahren)

bei der Lösungsfindung einer optimalen Austaktungsstrategie. Diese Darstellungsform ist zur Auswertung mittels Softwarelösungen geeignet. Die Tabellarische Form ist eine kompakte Darstellungsform für allgemeine Dokumentationsanforderungen. Sie lässt sich in einer üblichen Tabelle darstellen. Zur Austaktung anhand eines Vorranggraphen stehen entsprechend verschiedene Lösungsverfahren zur Verfügung, die sich erheblich in Exaktheit und Aufwand unterscheiden. Die folgende Abbildung 21 setzt die Verfahrenskategorien ins Verhältnis zur Anwenderfreundlichkeit und Ergebnisqualität.



**Abbildung 21: Vergleich der Verfahren zur Austaktung eines Montagesystems**

Probierv Verfahren stellen hierbei die einfachste Lösungsmöglichkeit dar. Sie verfolgen das Trial and Error Prinzip und bieten durch seine Flexibilität und manuellen Durchführung eine hohe Anwenderfreundlichkeit. Das Verfahren ist jedoch stark vom Erfahrungslevel des Anwenders abhängig weshalb sich die Ergebnisqualität stark unterscheiden kann. Heuristische Verfahren ermöglichen sowohl eine manuelle- als auch automatische Austaktung auf Basis von Verfahrensregeln. Sie bieten ein sinnvolles Maß an Flexibilität ab, stellen dabei aber gleichzeitig, bedingt durch ihre Verfahrensregeln, eine gewisse Ergebnisqualität sicher. Im Rahmen der rein automatischen Austaktung stellen exakte Verfahren die höchste Ergebnisqualität bereit. Durch IT-technische Unterstützung werden alle möglichen Lösungsvarianten hinsichtlich ihrer Eignung analysiert und die optimale im Rahmen einer Leistungsabstimmung definiert. Diese Verfahren erfordern hohes domänenspezifisches Wissen hinsichtlich der Softwareanwendung sowie ein hohes Maß an Berechnungszeit zur Lösungsfindung.

Zur Durchführung einer Leistungsabstimmung wird im Rahmen dieses Referenzplanungsprozesses auf heuristische Verfahren zurückgegriffen. Sie ermöglichen eine gute bis sehr gute Ergebnisqualität, schränken aber gleichzeitig nicht die Anwenderfreundlichkeit hinsichtlich des unabdingbaren Softwareeinsatzes ein und ermöglichen die Lösungsfindung in einem angemessenen Zeitintervall.

Im Rahmen der Leistungsabstimmung werden die Möglichkeiten der Austaktungen in den gesamtheitlichen Planungskontext überführt. Die Leistungsabstimmung wird durch Austaktungsdiagramme visualisiert und ermöglicht die Einordnung der Planungsergebnisse. Die folgende Abbildung 22 stellt dieses beispielhaft dar.

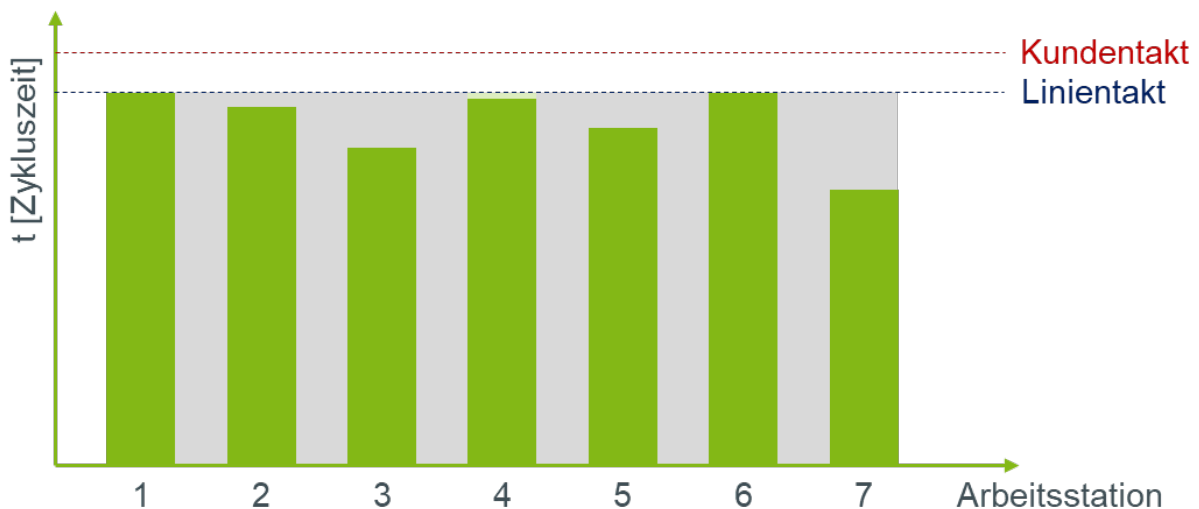


Abbildung 22: Beispielhafte Darstellung eines Austaktungsdiagramms

Zu sehen ist ein Säulendiagramm in welchem die einzelnen Arbeitsstationen (x-Achse) eines Montagesystems über die Zykluszeit (y-Achse) aufgetragen ist. Als Vorgabe für die maximale Zykluszeit pro Arbeitsstation dient der Linientakt, welcher abhängig vom Kundentakt und damit von der Marktnachfrage ist. Die Differenz zwischen Kundentakt und Linientakt ist insbesondere für die Systemneuplanung mit einem stabilen Sicherheitsfaktor zu wählen. Im Rahmen von KVP-Maßnahmen kann der Linientakt näher am Kundentakt ausgerichtet werden und sich somit ergebenes Verbesserungspotential in der Leistungsabstimmung genutzt werden. Die in Grün dargestellten Säulen repräsentieren die Zykluszeit der jeweiligen Arbeitsstationen. Sie ergeben sich auf Basis der Summe der Montagevorgänge, welche den jeweiligen Arbeitsstationen im Rahmen der Austaktung zugeteilt wurden. Das Ergebnis der Austaktung bestimmt maßgeblich das Layout der FML. Die Austaktung eines Montagesystems ist im Rahmen der Systemneuplanung eine prozessbegleitende Aufgabe. Für ein hohes Planungsergebnis bedarf es aktueller Eingangsdaten, welche sich im Laufe der Planung kontinuierlich verändern und daher im Zusammenspiel mit dem derzeitigen Planungsstand überprüft werden müssen. Daher sind Austaktungsergebnisse über den gesamten Planungsprozess als temporärer Zustand zu betrachten, welcher den finalen Zustand erst mit Abschluss der Feinplanungsphase erreicht. Damit einhergehend sind die Entwicklungen der Produktentwicklung hinsichtlich des Produktdesigns, der Varianten sowie der Montagereihenfolge abgeschlossen und für den Serienbetrieb freigegeben. Erweiternd wurde auf dieser Basis die Möglichkeiten zur Automatisierung im Rahmen hybrider Arbeitssysteme definiert und die resultierenden Zykluszeitwerte ermittelt. Aufgrund der hohen Komplexität und den vielfältigen Konfigurationsoptionen ist eine händische Auslegung der FML zur Entwicklung von Flexibilitäts- und Skalierungsbausteinen mit sehr hohem Aufwand verbunden. Daher ist bei deren Auslegung auf Simulationstools zurückzugreifen, wie beispielsweise der Materialflusssimulation (vgl. AP 8).

### 2.7.3 AP3 - Definition der technischen Spezifikation (Outlet-Modul und Montagekonzept)

Das dritte Arbeitspaket verfolgt das Ziel die technische Spezifikation einschließlich ein auf das Outletmodul abgestimmtes Montagekonzept abzuleiten. Auf Basis der durch Compleo bereitgestellten Information in Bezug des gegenwärtigen Stands der Ladesäulenproduktion wurden die einzelnen Schlussbericht SUPPLY

Funktionsbauteile in Standardkomponenten und Individualkomponenten unterteilt. Ersteres umfasst Komponenten, die für die grundlegende Funktionalität einer Ladesäule im öffentlichen Raum notwendig sind und damit in jeder Produktvariante verbaut werden. Entsprechend dieser Einteilung wurde ein theoretisches Modulkonzept entwickelt, welches grundlegende Funktionen vereint und als grobe Planungsgrundlage für die aufbauenden Planungsschritte dient. Bei der Entwicklung des neuen Outletmoduls ist die Verwendbarkeit in hybriden Arbeitssystemen entsprechend den in AP 1 erläuterten Rahmenbedingungen von hoher Relevanz. Das Ziel ist die Reduzierung der Montagezeit, um die Stückzahlen zu erhöhen und den Automatisierungsgrad je nach Marktnachfrage anpassen zu können. Eine der größten Herausforderungen ist die Reduzierung des Verkabelungsaufwands durch den Einsatz verschiedener Technologien. Es ist denkbar, ein Motherboard zu entwerfen, das die Montage mittels Steckverbindungen ermöglicht, wie es z. B. bei Desktop-Computern der Fall ist. Auf diese Weise könnten so optionale Schnittstellen geschaffen werden, die den Einbau von kundenspezifischen Modulen (z. B. eine Bedienoberfläche) ermöglichen, ohne den Einbau der Standardkomponenten zu beeinträchtigen. Durch die Reduzierung des manuellen Verdrahtungsaufwandes kann die Montagezeit zusätzlich reduziert werden, was wiederum hohe Stückzahlen begünstigt. Um die Nutzlast von Leichtbaurobotern zu berücksichtigen, kann die Modulgröße je nach Funktionskombination entsprechend angepasst werden, so dass unterschiedliche Handhabungsprozesse automatisiert werden können.

Für diverse elektrische Standardkomponenten könnte unter Umständen eine Eigenfertigung wirtschaftlich sinnvoll sein, da dies die Möglichkeit schaffen würde Einfluss auf die Beschaffenheit der Geometrie und der Oberfläche zu nehmen, um z. B. die Anzahl der notwendigen Greiferwechsel zu reduzieren und damit verbundene Rüstverluste zu eliminieren.

Das stückzahlflexible Montagekonzept basiert zum einen auf der Modularisierung der Produktstruktur und zum anderen auf der Skalierbarkeit der Fließbandautomatisierung. Um sehr hohe Stückzahlenszenarien bei gleichzeitiger Wirtschaftlichkeit zu ermöglichen, wird bereits bei der Erstellung eines ersten Planungsentwurfs die Fließfertigung als Grundaufbauprinzip eingesetzt. Aufgrund der vorherrschenden Rahmenbedingungen in der Ladesäulenfertigung muss die Produktion auf eine hohe Stückzahlflexibilität ausgelegt werden. Die Basis der Skalierung mit der Montagesystemkapazität erfordert die Erarbeitung von Prognosemodellen hinsichtlich der Stückzahlentwicklung des Marktes. Dies umfasst neben kurz- und mittelfristigen Absatzentwicklungen auch den Verlauf des Produktlebenszyklus. Im Rahmen der Flexibilitäts- und Skalierungsplanung wird auf Basis von Prognoseannahmen eine Wandlungsstrategie erarbeitet, um zu jedem Betriebszeitpunkt eine wirtschaftliche Fertigung zu gewährleisten. Dabei sind verschiedene Stückzahlenszenarien zu berücksichtigen. Die Anpassung der benötigten Produktionskapazität an die jeweilige Nachfrage erfolgt mittels Maßnahmen auf technischer, organisatorischer und personeller Ebene. Für den Fall, dass die manuelle Montage keine wirtschaftliche Produktion mehr erlaubt, sieht das Skalierungskonzept einen stufenweisen Ausbau vor. Folgende Aufgaben wurden für das Montagekonzept definiert:

- Realisierung geeigneter Mensch-Roboter-Interaktionslösungen zur Reduzierung der Taktzeit

- Fähigkeitsorientierte Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter (Bsp: Verkabelungen werden vom Menschen durchgeführt; Roboter übernehmen die Materialübergabe)
- Kapazitätserhöhung einer Ausbaustufe durch Steigerung des Automatisierungsgrades
- Flexibilisierung innerhalb einer Ausbaustufe erfolgt primär durch organisatorische Strategien (z. B. flexible Arbeitszeit- und Schichtmodelle) da diese eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit ermöglichen
- Entwicklung von Skalierungsbausteinen zur Steigerung der Ausbringungsmenge über die Flexibilitätsgrenze hinaus

Aufgrund der schwer planbaren Rahmenbedingungen innerhalb des Elektronibilitätsmarkts ist davon auszugehen, dass ein sehr hohes Maß an Flexibilität bei den Stückzahlen erforderlich ist, um eine wirtschaftliche Produktion zu ermöglichen. Bei der detaillierten Ausarbeitung des Skalierungskonzepts muss daher die Wandlungsfähigkeit der Ladesäulenmontage weiter begünstigt und gefördert werden.

Ausgehend vom festgelegten Funktionsspektrum ergeben sich sowohl allgemeine Anforderungen für die Produktentwicklung, Montage sowie für die Automatisierung von Montagevorgängen.

Für die elektrischen Standardkomponenten des Outlet-Moduls (vgl. Abbildung 13) war die Beschaffenheit der Geometrie und der Oberfläche von hoher Relevanz zur Realisierung einer Automatisierbarkeit. Diese Bauteileigenschaften haben u.a. einen Einfluss auf die Anzahl der notwendigen Greiferwechsel und damit verbundene Produktionszeitverluste durch Rüstvorgänge. Ein Großteil der Verkabelungsaufwände der gegenwärtigen Montage konnte durch Komponenten-Steckverbindungen eliminiert werden. Entsprechend wurden die sich ergebenden Optimierungsansätze zur Begünstigung des Einsatzes von Leichtbaurobotern als Anforderungen in das Lastenheft zur Produktentwicklung überführt.

Um die Nutzlast von Leichtbaurobotern zu berücksichtigen, wurde die Beschaffenheit von Modulen entsprechend vorgegeben, sodass unterschiedliche Handhabungsprozesse automatisiert werden können, wodurch eine Flexibilisierung der Montagelinie begünstigt wird. Zur Definition konkreter Anforderungen wurden Untersuchungen mittels Softwaretools und unter realen Bedingungen im Laborumfeld durchgeführt und in einem Lastenheft zusammengefasst. Die in Bezug auf SUPPLY relevanten Anforderungen sind in der folgenden Tabelle beschrieben.

Auf Basis der vorangegangenen Schritte und Erkenntnissen erfolgte die Erstellung eines Lastenhefts für das Ladesäulenmodul aus Sicht der Montage. Aus der gemeinsamen Betrachtung von Produkt und Prozess wurden im Rahmen von AP3 einige Anforderungen an das von Partner Compleo zu entwickelnde Outlet-Modul zur Steigerung der automatisierungsgerechten Produktgestaltung definiert, die in vier unterschiedlichen Kategorien eingeteilt sind:

- Allgemeine Anforderungen an Einzelbauteile und Zusammenbau
- Montageseitige Anforderungen an geplante Fügetechnologien
- Handhabungsseitige Anforderung an die Gestaltung starrer Bauteile insb. mit Hinblick auf die Abmessungen
- Handhabungs- und montageseitige Anforderungen an biegeschlaffe Bauteile insb. mit Hinblick auf Bauteilvarianz und Kontaktierungstechnologie

■ Anforderungen an den Bauraum zur Montagegerechtigkeit

Die definierten Anforderungen aus Montagesicht wurden in das Lastenheft des Partners Compleo, der den Produktfokus verfolgte, integriert. Im Rahmen mehrere Abstimmungsrunden und Workshop wurden die folgenden Anforderungen ergänzt (Tabelle 2.8 und Tabelle 2.9)

Tabelle 2.8: Anforderungen Automatisierungsgerechtes Produktdesign

Typ	Anforderung	Zielwert	Einheit
muss	Die Anzahl der Bauteile ist gering zu halten		
muss optional	Bauteile symmetrisch oder offensichtlich unsymmetrisch ausführen		
muss optional	Biegeschlaffe Bauteile sind zu vermeiden		
muss optional	Anordnung der Bauteile so vorsehen, dass Fügebewegungen linear und gleichgerichtet ausgeführt werden können		
soll	Fügebewegungen linear in negativer Z-Richtung vorsehen zur optimalen Nutzung der Schwerkraft		
muss optional	Einführungsschrägen oder Zentriermöglichkeiten in Bauteilgeometrien vorsehen		
muss	Das Gewicht der Einzelkomponenten überschreitet keine 5 kg	5	kg
muss optional	Das Gewicht des gesamten GO-Moduls überschreitet keine 5 kg	5	kg
muss optional	Fügetechnologien ohne Zusatzelemente (wie z.B. Schrauben) und einseitiger Zugänglichkeit verwenden		
muss optional	Kontaktierungstechnologien mit wenig Prozessschritten (z.B. Federklemme) und einseitiger Zugänglichkeit verwenden		
soll	Wenn notwendig, Montagezusatzelemente gleicher Geometrie (Größe, Antrieb, etc.) einsetzen		
muss	Parallele Greifflächen mit geeigneter Oberflächenbeschaffenheit (keine Zerbrechlichkeit, keine Sichtflächen, ausreichende Haftung, etc.) vorsehen für Innen- oder Außenparallelgreifsystem		
muss optional	Innenbohrung oder Außenzylinder mit geeigneter Oberflächenbeschaffenheit vorsehen für Zentrischgreifer		
muss	Greifflächen ausreichend groß dimensionieren		
soll	Spannweite zwischen dem Abstand der parallelen Greifflächen unterschiedlicher Bauteile für Innenparallelgreifanwendung gering halten	40	mm
soll	Spannweite zwischen dem Abstand der parallelen Greifflächen unterschiedlicher Bauteile für Außenparallelgreifanwendung gering halten	40	mm
soll	Montagefreiraum an Greifflächen für Parallelgreifanwendung vorsehen	15	mm
muss	Maximaldurchmesser der zylindrischen Außenspannflächen darf nicht überschritten werden für Außenzentrischgreifanwendung	50	mm
muss optional	Minimaldurchmesser der zylindrischen Außenspannflächen darf nicht unterschritten werden für Innenzentrischgreifanwendung	20	mm
muss optional	Spannweite zwischen Innendurchmessern der zylindrischen Außenspannflächen darf nicht überschritten werden für Innenzentrischgreifanwendung	50	mm

muss optional	Montagefreiraum um zylindrische Außengreiffläche für Zentrischgreifanwendung vorsehen	35	mm
muss optional	Anzahl unterschiedlicher Leitungsdurchmesser gering halten		
muss optional	Anzahl an farblichen Variation auf ein Minimum reduzieren. Ggf. Markierung der Leitung mittels Druckprozess vorsehen	1	
soll	Spannweite zwischen verwendeten Leitungsdurchmessern gering halten	4	mm
soll	Verlegeweg/Verdrahtungskanal für Leitungen vorsehen und nicht verdeckt ausführen		
soll	Einsatz vorkonfektionierter und magaziniertes Leitungen		

Tabelle 2.9: Anforderungen Montage und Fertigung

Typ	Anforderung	Zielwert	Einheit
muss	Das GO-Modul und A-KAS müssen in eine automatisierte Produktionslinie gefertigt werden.		
muss	Die automatisierte Produktionslinie muss skalierbar sein.		
muss	Eine Prototypische Umsetzung der Produktionslinie muss in Q3 2023 gefertigt und erprobt sein.		
muss	Definition eines maximalen Stückzahlzenarios für die Montagelinie des GO-Moduls	200.000	Stk./Jahr
muss	Definition eines minimalen Stückzahlzenarios für die Montagelinie des GO-Moduls	70.000	Stk./Jahr
muss	Masse der Einzelkomponenten des GO-Moduls darf typische Nutzlast von LBR nicht überschreiten	5	kg
muss	Oberflächenbeschaffenheit der Einzelkomponenten des GO-Moduls muss für Zwei- bzw. Dreifingergreifer Anwendungen geeignet sein.		
muss optional	Geometrien der Einzelkomponenten des GO-Moduls müssen für Zwei- oder Dreifingergreifer Anwendungen geeignet sein - Hub	40 bzw. 50	mm
muss optional	Geometrien der Einzelkomponenten des GO-Moduls müssen für Zwei- oder Dreifingergreifer Anwendungen geeignet sein - Abstand zwischen zwei Geometrien als Bauraum für Greifer	15 bzw. 35	mm
muss	Bauraum des GO-Moduls muss auf den Einsatz von LBR-Tätigkeiten (Schrauben, Handling, Montage) ausgelegt sein		
soll	Flexibilisierung der Montagereihenfolge der Einzelkomponenten des GO-Moduls		

Das erforderliche stückzahlflexible Montagekonzept basiert auf der Flexibilisierung und Skalierung einer Fließlinie. Dabei basiert das Grobkonzept auf der Anwendung der FML, welche einen flexiblen Mitarbeiterinsatz ermöglichen, wodurch mit geeigneten Automatisierungsansätzen eine Stückzahlflexibilität in einem Bereich zwischen 70.000 und 200.000 Stück pro Jahr realisiert werden kann. Damit stellen das Lastenheft und der Montagelinienentwurf die konzeptionelle Basis für den Referenzplanungsprozess (AP2) und die praktische Montagekonzeptentwicklung (AP4) dar. Auch die Hard- und Softwareentwicklung der Montagelinie (AP5) und deren prototypische Umsetzung (AP7) wird darauf ausgelegt, eine hohe Integrierbarkeit in das stationsbezogene Fließkonzept der FML

aufzuweisen, um einzelne werkergebundene Montageschritte selektiv und skalierbar durch die zu entwickelnden automatisierten Prozesslösungen substituieren zu können.

Erweiternd zum Lastenheft wurde eine Sammlung an Designregeln erstellt. Die identifizierten Regeln stammen aus einer ausgiebigen Analyse des in Forschung und Industrie vorhandenen Wissens zur Automatisierungsgerechtigkeit. Dazu konnte implizites Wissen aus Produkten und Mitarbeitern unterschiedlicher Branchen akquiriert und in schriftlicher Form kondensiert werden. Die daraus resultierende Liste umfasst ca. 250 Designregeln aus unterschiedlichen Konzeptphasen im Produktentstehungsprozess. Neben der Zuordnung zu unterschiedlichen Produktebenen und Automatisierungsgraden wurde zudem eine Einschätzung der Relevanz für die in SUPPLY angestrebten Projektziele getroffen. Die folgende Abbildung 23 zeigt einen Auszug aus der Gesamtliste.

Nr.	Design Guideline	valid at level	relevant for	assembly type	classification	Description of guideline	dependency humans/robots
1	end-to-end symmetry/ rotational symmetry around axis of insertion	general	part handling	independent	general	if cannot achieved, design to maximum possible symmetry	
2	if not symmetric, make obviously asymmetric	general	part handling	independent	general		
3	provide features to prevent stacking		part handling	independent	general	when stored in bulk	
4	avoid features allowing tangling	general	part handling	independent	general	when stored in bulk	
5	avoid sticking, slippery, delicate, flexible, very small or very large and sharp parts	general	part handling	independent	manual; automated; robot		biomech. Limits; solving problems; flexibility

Abbildung 23: Auszug der Sammlung an Designregeln

### 2.7.4 AP4 - Konzeptentwicklung für das Outlet-Modul und Identifikation skalierbarer Prozessschritte

Das Ziel des vierten Arbeitspakets ist Konzeptentwicklung für die elektrische, elektrologische und mechanische Konsistenz des Outlet-Moduls. Weiterhin soll die Definition von Skalierungsbausteinen zur Anpassung der Linienausbringung an die vorherrschenden Marktbedingungen erfolgen und neuartige, prototypisch zu untersuchenden Prozessprototypen entwickelt werden.

Die Konzeptentwicklung des Outlet-Moduls erfolgte entsprechend der im AP4 aufgezeigten Vorgehensweise. Abbildung 24 zeigt das Ergebnis des B1-Musters, das zum einen der Produktentwicklung als Vorlage zur Weiterentwicklung zum B2-Muster dient und zum anderen die Grundlage für die Entwicklungen der Montagelinie und Montageschritte in den AP4-AP8 dient.

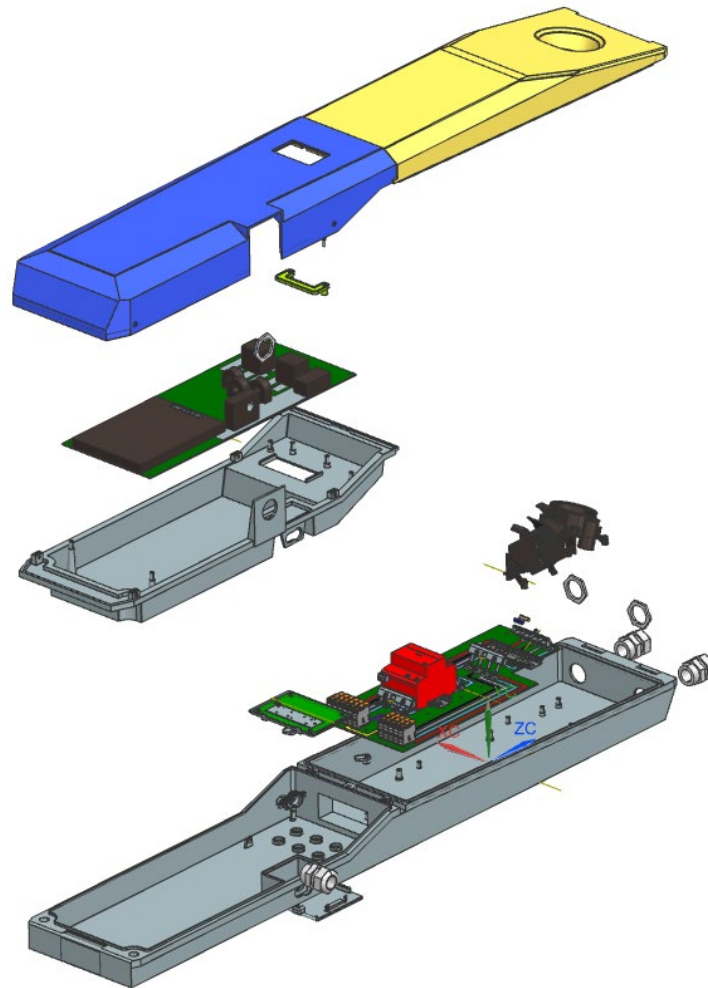


Abbildung 24: B1-Muster Entwurf des Outlet-Moduls

Die montagesystembezogenen Arbeitsinhalte des Arbeitspakets wurden auf Basis der Entwicklungen in AP2 ausgearbeitet und zusammen mit dem Anwendungspartner Compleo auf die Produktentwicklung (AP 3) abgestimmt. Dabei wurden die einzelnen Skalierungsschritte auf die vorherrschenden Rahmenbedingungen innerhalb des Produktionsumfelds der Firma Compleo angepasst, um eine praxisorientierte Umsetzung des Referenzplanungsprozesses zu ermöglichen. Dabei standen die drei Aspekte Organisation, Technik und Personell im Vordergrund (Abbildung 25).

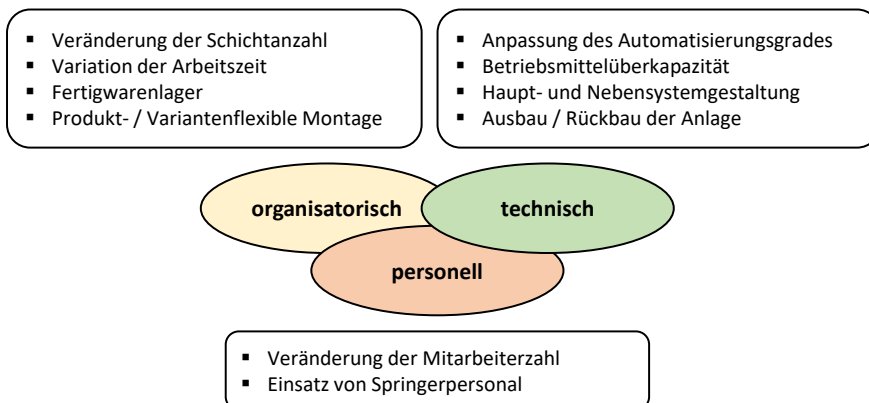


Abbildung 25: Aspekte der Produktionsorganisation

### **Organisatorisch**

Die organisatorischen Rahmenbedingungen wurden durch Compleo festgelegt und sind wie folgt definiert worden:

- Maximale Jahresstückzahl: 200.000 Stück pro Jahr
- Minimale Jahresstückzahl: 70.000 Stück pro Jahr
- Festes Schichtsystem: 2-Schichten
- Festes Arbeitszeitmodell: 8 Std. einschließlich 30 Minuten Pausenzeit

Als Produktionsstrategie wurde eine Make-to-Stock Montage definiert, welche ein Fertigwarenlager als nachgelagerten internen Kunden bedienen soll. Im Projektjahr 2022 wurde lediglich eine Produktvariante des Outlet Moduls definiert, welche universell verbaut werden soll.

### **Personell**

Die personellen Aspekte zur Umsetzung einer skalierbaren Montagelinie wurden im Rahmen der Konzeptentwicklung auf Basis einer Flexible Manpower Line herausgearbeitet. Durch eine U-förmige Linienanordnung kann durch geschickte Kombination aus Arbeitsstationsfolge pro Mitarbeiter und der Festlegung einer unterschiedlichen Mitarbeiteranzahl eine optimale Anpassung an den Stückzahlbedarf vorgenommen werden. Entsprechend lassen sich die Lohnkosten reduzieren und es wird ein kostenoptimierter Produktionsbetrieb ermöglicht.

### **Technisch**

Die technischen Aspekte zur Umsetzung einer skalierbaren Montagelinie wurden im Rahmen der Konzeptentwicklung unterstützend eingesetzt. Ein besonders hohes Potential bietet der Einsatz von teilautomatisierten Arbeitsplätzen mittels Leichtbaurobotern, da diese eine sehr hohe Flexibilität bezüglich der Arbeitsplatzgestaltung und gleichzeitig kurze Amortisationszeiten bei geringer Stückzahl aufweisen. Dies begünstigt das Investment auch bei stark schwankenden Stückzahlenanforderungen. Infolgedessen, ist ein auf Leichtbauroboter abgestimmtes Produktdesign essenziell für den Einsatz der Technologie.

Eine Anpassung des Automatisierungsgrad erfolgt mittels der Umsetzung von Mensch-Roboter-Interaktionen, welche die Aufteilung von Tätigkeiten an einzelnen Stationen zwischen Mensch und Roboter ermöglicht. Die resultierende Zykluszeitreduktion kann im Rahmen der Personaleinsatzplanung den Flexibilitätsbereich erhöhen und damit zu einem wirtschaftlichen Produktionsbetrieb beitragen. Die Auslegung der erforderlichen FML wurde anhand der maximalen Stückzahl von 200.000 Stück pro Jahr festgelegt. Entsprechend ist kein Linienumbau zur Anpassung an reduzierte Stückzahlen vorgesehen, sondern die Abbildung mittels personellen und technischen Aspekten. Somit wird unterhalb der Maximalstückzahl eine betriebsmitteltechnische Überkapazität vorliegen, jedoch ermöglicht eine feste Linienanordnung die kurzfristige Reaktion auf sich verändernde Marktbedingungen, was im Umfeld eines hoch volatilen Marktes wie der Elektromobilität von Vorteil ist. Der Linienausbau wird als Option zur Abbildung von höheren Stückzahlumfängen eingeplant. Aufgrund der geringen Fertigungstiefe, erzeugt durch einen hohen Umfang an Zukaufteilen, ist die Abbildung von Nebensystemen in der Konzeptionsphase nicht vorgesehen.

### Automatisierte Montageprozesse

Zur Erweiterung der entwickelten FML mit automatisierten Arbeitsschritten, wurde ein Anlagenkonzept zur Integration in die Linie erstellt, in der eine universelle Sechssachsenkinematik des Typs Fanuc CR-15iA Teilschritte des Zusammenbaus übernimmt (s. Abbildung 26). Der MRK-fähige Roboter bildet das Zentrum der Arbeitsstation und kann mehrere mögliche Bauteilpositionen auf der vor sich befindlichen Montagefläche erreichen, sodass je nach Skalierung der aktuellen Montagelinie mehrere Arbeitsschritte durch die Automatisierungslösung übernommen werden können. Die Zuführung der Montageteile erfolgt über ein schwerkraftbasiertes Rollenbahnsystem für standardisierte Kleinladungsträger. Das Grundgestell ist ein modulares Baukastensystem, das beliebig erweitert werden kann.

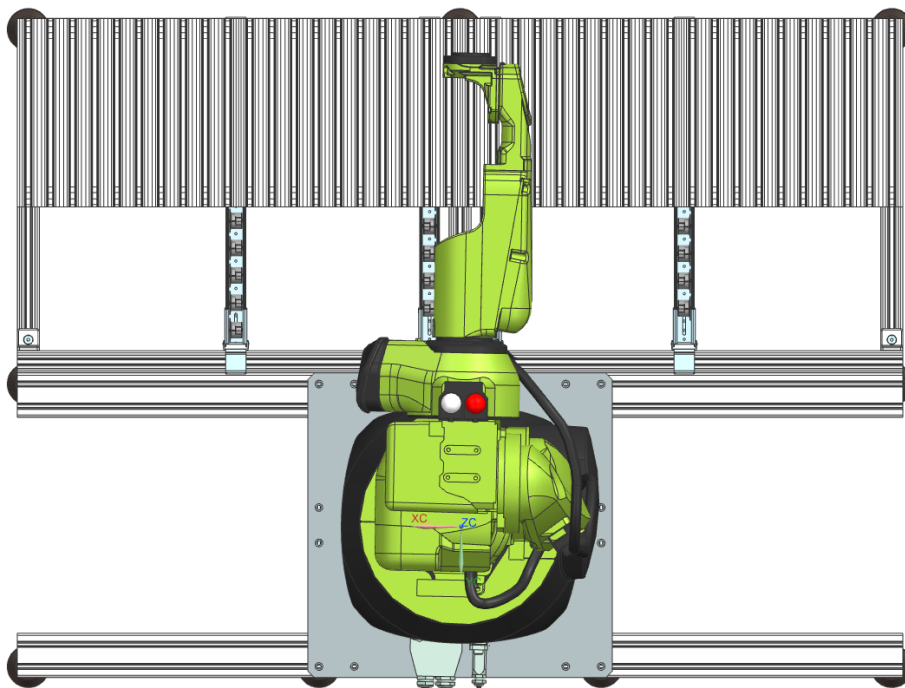


Abbildung 26: Aufbau der automatisierten Montagestation

Durch diesen universellen Aufbau lassen sich unterschiedliche Prozessmodelle unabhängig voneinander untersuchen. Im Folgenden werden drei unterschiedliche Prozessprototypen entwickelt, detailliert ausgearbeitet und prototypisch untersucht. Der Fokus der Automatisierung liegt entsprechend der Zielstellung des Teilvorhabens AutoPro<sup>2</sup> auf der Verarbeitung ungeordneter Komponenten und der Handhabung und Montage biegeschlaffer Bauteile. Dazu wird im Rahmen des Projektes ein repräsentativer Use-Case zur Montage des Outlet-Moduls ausgearbeitet. Alle Prozessmodelle lassen sich in die vom Partner IPS entwickelte Flexible Manpower Line integrieren und erweitern oder ersetzen manuelle Arbeitsschritte stufenweise durch einen automatisierten Prozess.

- PP1: Automatisierte Verdrahtung
- PP2: Zuführung ungeordneter Kabel
- PP3: Platinenmontage
- PP4: FML-Montagelinie

### PP1: Automatisierte Verdrahtung

Da ein definierter Schwerpunkt des Teilvorhabens auf der Handhabung von biegeschlaffen Bauteilen liegt, wird im ersten Prozessprototypen die Verdrahtung von flexiblen Kabeln fokussiert. Der Prototyp ist unabhängig der tatsächlichen Ausprägung des finalen Outlet-Moduls, sofern die definierten Anforderungen im Lastenheft eingehalten werden. Abbildung 27 stellt den entwickelten Prozessprototyp zur automatisierten Verdrahtung dar. Grundlage für den automatisierten Verdrahtungsprozess ist die das hohle Handgelenk (Achse 6) des Fanuc CR-15iA, das die rückwärtige Aufnahme und zentrische Führung der Leitungen ermöglicht. Der Ablauf des Verdrahtungsprozesses erfolgt immer nach dem folgenden Prinzip:

- Rückwärtige Zuführung der konfektionierten Leitung
- Förderung der konfektionierten Leitung und Greifen durch den Klemmkörper
- Scannen der Position und Ausrichtung des Kabelendes
- Korrektur der Werkzeugpose durch den Roboter
- Einführen der Leitung in Öffnung der Quellklemme
- Orthogonale Ausrichtung des Werkzeugs durch den Roboter
- Orthogonales Stecken der Leitung und Zugtest zur Qualitätssicherung
- Verlegen der Leitung durch synchrone Roboterbewegung und Leitungsförderung
- Anfahren der Steckposition der Zielklemme und Greifen durch den Klemmkörper
- Schwenken der gesamten Leitung
- Scannen der Position und Ausrichtung des Kabelendes
- Korrektur der Werkzeugpose durch den Roboter
- Einführen der Leitung in Öffnung der Quellklemme
- Orthogonale Ausrichtung des Werkzeugs durch den Roboter
- Orthogonales Stecken der Leitung und Zugtest zur Qualitätssicherung
- Ausfädeln der Leitung durch einen Spalt im Klemmkörper

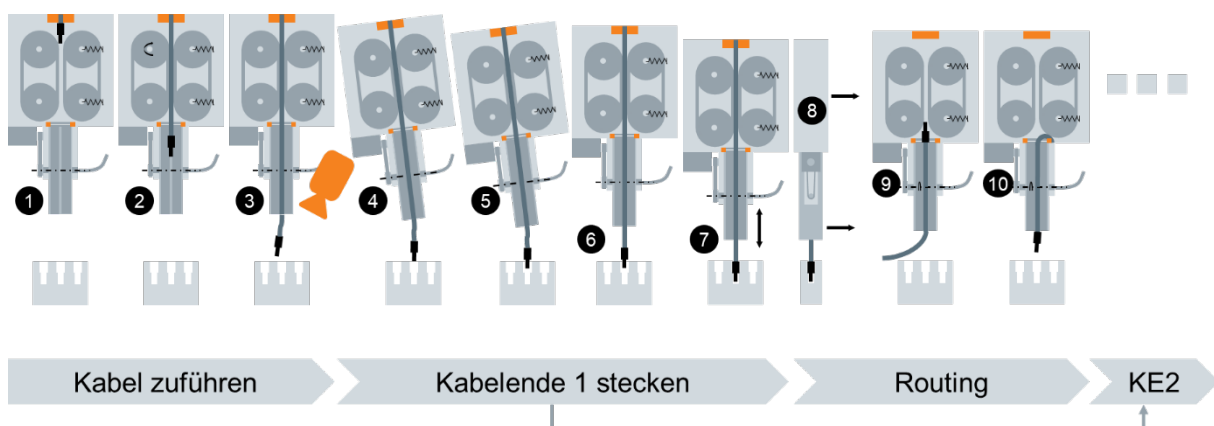


Abbildung 27: Prozessprototyp 1 - Automatisiertes Stecken biegeschlaffer Kabel

### PP2: Zuführung ungeordneter Kabel

Der Fokus der Automatisierung liegt entsprechend der Zielstellung des Teilvorhabens AutoPro<sup>2</sup> auf der Verarbeitung ungeordneter Komponenten und der Handhabung biegeschlaffer Komponenten. Als Ergänzung zu PP1 wurde daher ein weiterer PP 2 erarbeitet, der die Zuführung der ungeordneten Komponenten adressiert. Durch dieses Prozessmodell wird der darauffolgende automatisierte Schlussbericht SUPPLY

Verdrahtungsprozess PP1 ermöglicht. Das Prozessmodell PP2 (s. Abbildung 28) sieht folgende Schritte vor:

- Konfektioniertes Kabel wird in Beschleunigungsstation eingeschoben
- Kabel wird hinter die Druckklappe transportiert
- Druckklappe der Beschleunigungsstation schließt
- Druckluft strömt ein und beschleunigt das Kabel
- Kabel erreicht die Luftentweichungsstrecke der Bremsenrichtung
- Kabel wird durch eine Trichterstrecke zentriert
- Gegenluftstrom entschleunigt Kabel
- Kabel erreicht die Werkzeugzuführung und wird übernommen

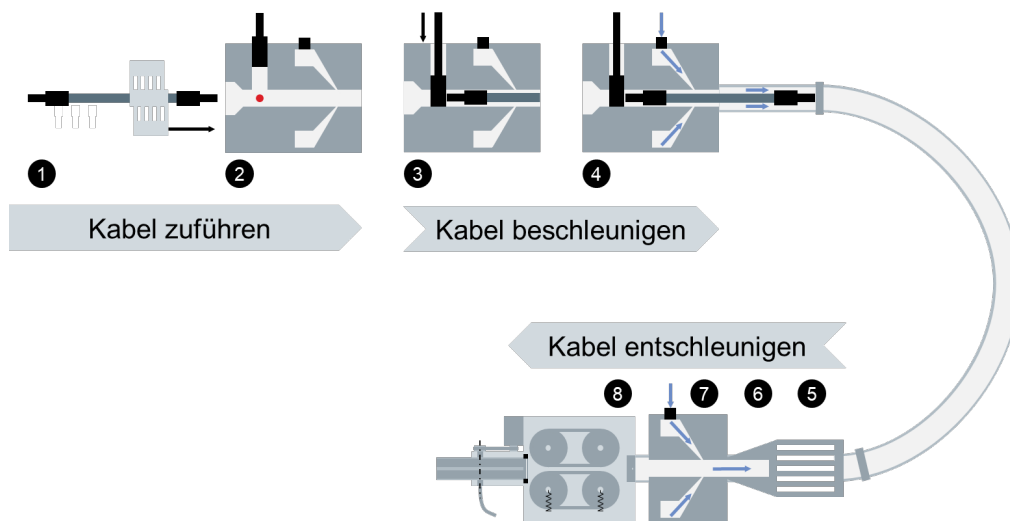


Abbildung 28: Prozessprototyp 2 - Automatisierte Zuführung ungeordneter Kabel

### PP3: Platinenmontage

Der dritte Prozessprototyp PP3 der Platinenmontage (s. Abbildung 29) wurde als repräsentativer Use-Case zur Montage des Outlet-Moduls (Stand: B1-Muster) ausgearbeitet. Er fokussiert den Zusammenbau der Bauteile RCD, Hutschiene und Hutschienehalter. Dabei wird sowohl deren Zusammenbau als auch die Montage mit der Platine des Anschlusskastens adressiert. Der Prozess lässt sich außerdem auf den Zusammenbau des FI-Schalters übertragen. Mittels eines Greifers und dem Griff eines einzigen Montage-Hauptteils (hier: RCD oder FI) werden multiple Fügeoperationen ausgeführt. Das Prozessmodell besteht im Wesentlichen aus folgenden Schritten:

- Greifen des Montage-Hauptteils
- Montage-Hauptteil in zum Hutschieneabschnitt bewegen
- Montage-Hauptteil auf Hutschieneabschnitt linear einfädeln
- Mittels Kippbewegung Montage-Hauptteil auf Schiene verrasten
- Baugruppe ausfädeln und über Abstandplatte bewegen
- Lineares Fügen der Baugruppe in die Abstandplatte
- Bewegen der neuen Baugruppe in die Station zur Stromschienenbestückung
- Seitliches Einschieben der Stromschienen in Baugruppe
- Bewegen der neuen Baugruppe über die Anschlussplatine

■ Lineares Fügen der Baugruppe auf der Platine

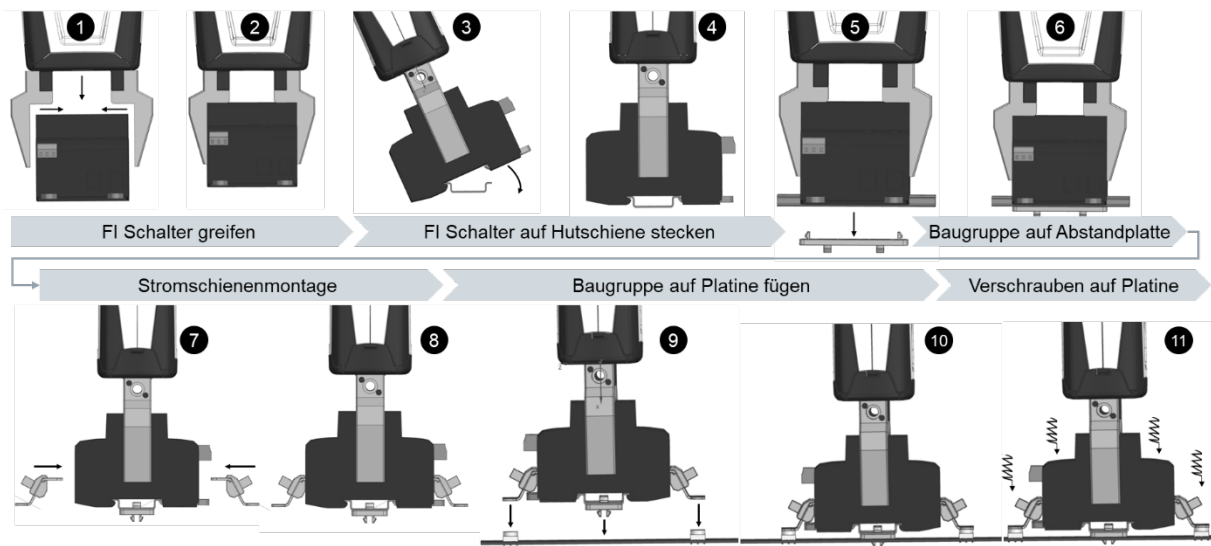


Abbildung 29: Prozessprototyp 3 – Automatisierte Platinenmontage im Outlet-Modul

Aus den vorgestellten Prozessprototypen wurden die weiteren Funktionseinheiten der einzusetzenden Werkzeuge sowie Spezifikationen für den Manipulator abgeleitet. Weiterhin konnten auf dieser Basis die benötigten Aktoren und Sensoren für die einzelnen Funktionseinheiten konkretisiert werden. Die Auswahl der Prozessprototypen erfolgte auf Basis des bestehenden Kenntnisstandes zum Konzept des Outletmoduls und bestehender Ladesäulen und stetiger Berücksichtigung der Skalierbarkeit des Prozesses und Integrierbarkeit in die Flexible Manpower Line.

**PP4: FML-Montagelinie**

Der vierte Prozessprototyp umfasst das Konzept einer flexiblen und skalierbaren Montagelinie. Ziel ist es die vorangegangenen Erkenntnisse in eine Montagelinie zu überführen und anhand der organisatorischen, technischen und personellen Aspekte flexible und skalierbar zu gestalten. Zur Befähigung der Montagelinie bestehen hinsichtlich des Liniendesigns folgende Gestaltungsmöglichkeiten (Abbildung 30).

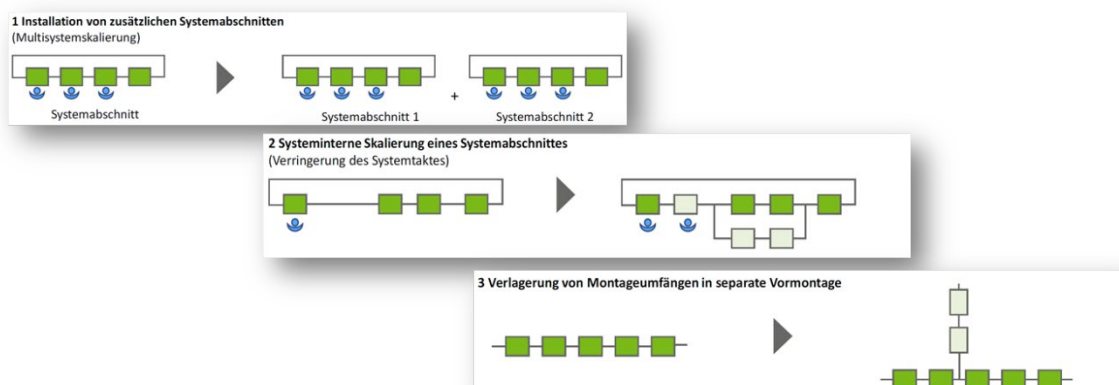


Abbildung 30: Möglichkeiten des Liniendesigns zur Flexibilität und Skalierung

Durch Kombination des Konzepts der FML mit Liniendesign Richtlinien zur Flexibilität und Skalierung ermöglicht die Überführung in Skalierungsbausteine anhand der durch den Anwendungspartner vorgegebenen Rahmenbedingungen. Auf Ebene des Arbeitsplatzes sind neben den klassischen Aspekten der Arbeitssystemgestaltung auch Aspekte der MRI zu integrieren. Der dafür erforderliche Flächenbedarf ist im Liniendesign zu berücksichtigen.

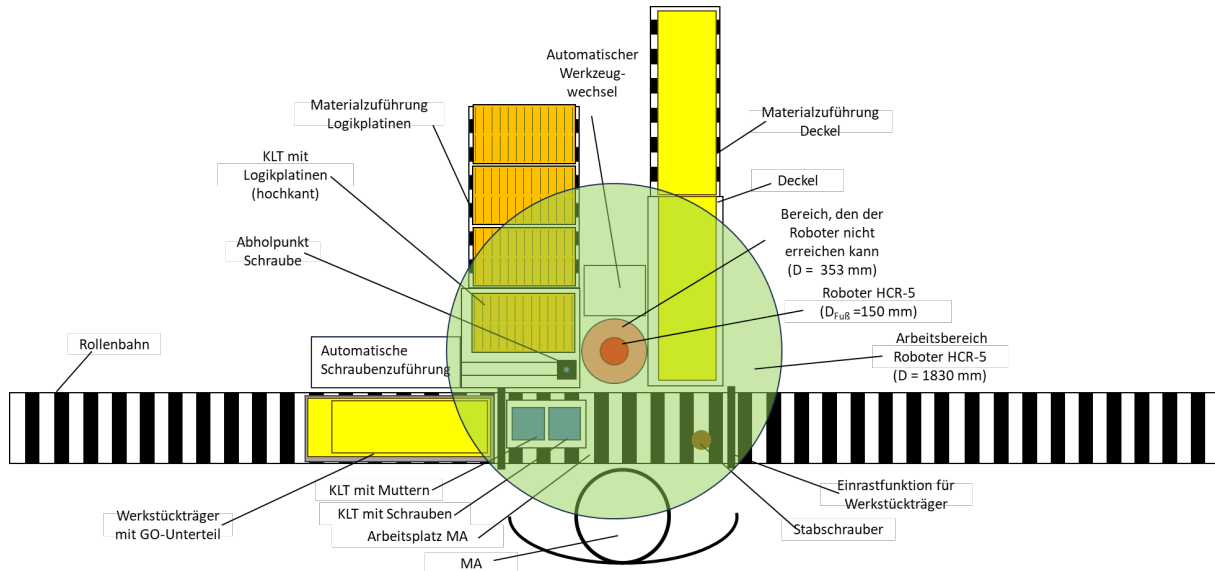


Abbildung 31: Erstentwurf eines MRI-Arbeitssystems der FML

In Abbildung 31 ist ein Layout Konzept eines MRI-Arbeitssystems dargestellt. Dabei wurde sich bei der Entwicklung auf den Anwendungsfall der Platinenmontage bezogen um Aspekte der Materialbereitstellung zweckmäßig mit einzubeziehen. Die Detaillierung des gesamten FML anhand von prototypischen Untersuchungen und digitalen Planungswerkzeugen wurde in AP 7 und AP 8 durchgeführt.

### 2.7.5 AP5 Hard- und Softwareentwicklung für das Outlet-Modul und das skalierbare Montagekonzept (FAPS)

Ziel des Arbeitspaketes ist die Entwicklung der Hard- und Software für das Outlet-Modul und das skalierbare Montagekonzept. Dabei wurde sich an dem bereitgestellten B1-Muster des Outlet-Moduls orientiert und alle weiteren Arbeiten auf dieser Basis fortgeführt. Neben der Entwicklung der Steuerungsarchitektur wird im Folgenden auf die wesentlichen Entwicklungsschritte bezüglich der drei Prozessprototypen eingegangen.

#### Steuerungskonzept

Das Steuerungskonzept basiert auf einem Steuer-PC, welcher für alle Prozessprototypen einen spezifischen Programmablauf ausführen kann. Über eine Schnittstelle des Roboterherstellers, lässt sich der Roboter durch den Steuer-PC fremdsteuern und der Zustand des Roboters und dessen digitaler und analoger Ein- und Ausgänge abfragen. Dazu kommt das Fanuc Remote Motion Interface (RMI) sowie das Fanuc Robot Interface (RI) zum Einsatz. Über die digitalen und analogen Ein- und Ausgänge des Roboters lassen sich beliebige Sensoren und Aktoren ansteuern. Weiterhin existiert ein Ethernet-Netzwerk, das den Steuer-PC mit dem Kameracontroller, den Motorsteuerungen und der

Auswerteeinheit des Kraft-Momenten-Sensors verbindet. Das ermöglicht eine externe und uneingeschränkte Bildverarbeitung durch eigene Algorithmen auf dem Steuer-PC. Dadurch wird der Vorteil erreicht, dass die gesamte Intelligenz und Steuerung an zentraler Stelle ausgeführt wird. Die Robotersteuerung selbst übernimmt nur überwachende Funktion der Roboterbewegung. Abbildung 32 zeigt einen Überblick über die Systemarchitektur.

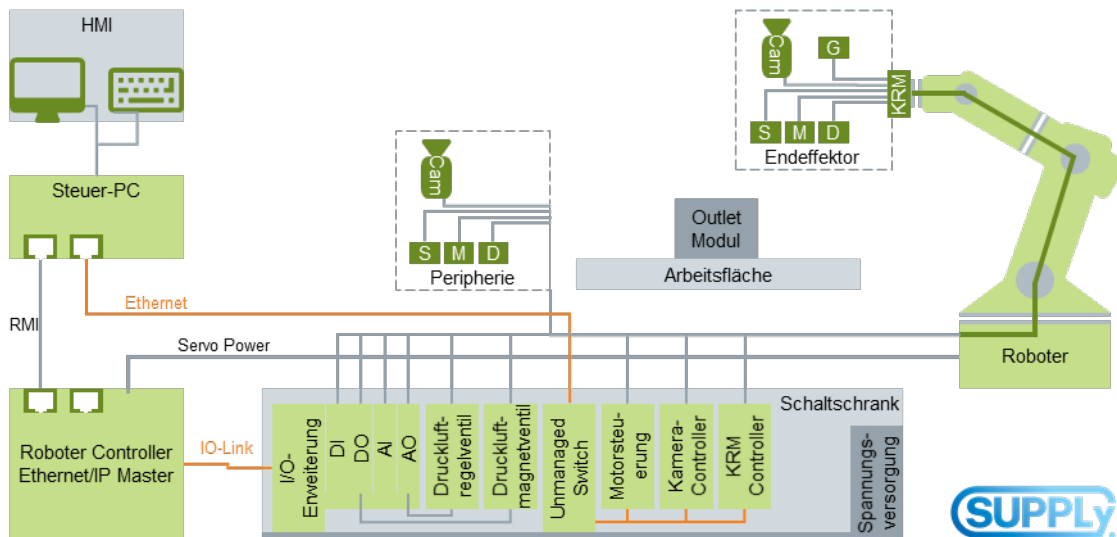


Abbildung 32: Übersicht der notwendigen Steuerungs-, Aktor- und Sensorkomponenten

**PP1: Automatisierte Verdrahtung**

Die Entwicklung des zur Umsetzung des Prozessprototypen notwendigen Greifsystems basiert auf einem modularen Aufbau und kann bei Notwendigkeit erweitert werden. Im Wesentlichen besteht das Greifsystem aus zwei Modulen, dem Antriebsmodul und einem pneumatischen Greifmodul und führt die zentrische Führung der zu verarbeitenden Leitung durch das Handgelenk des Roboters fort (s. Abbildung 33).

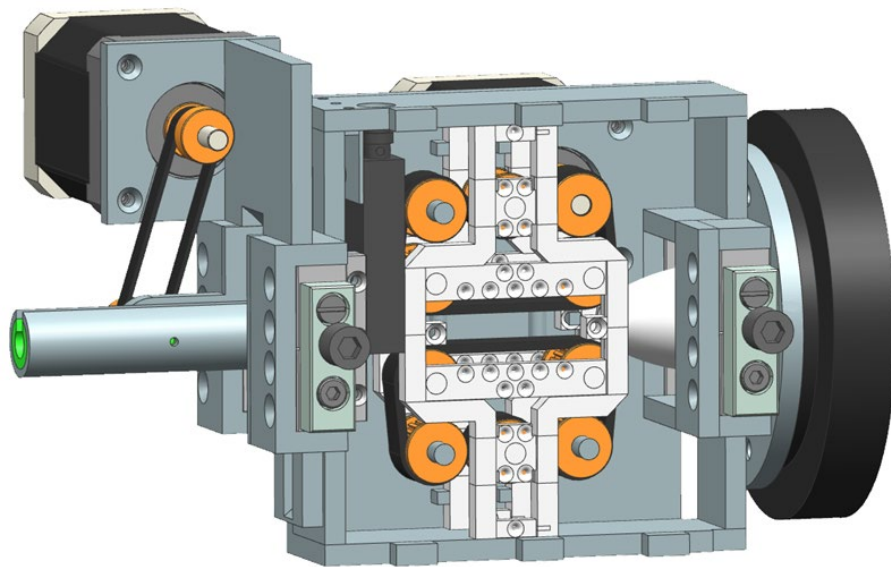
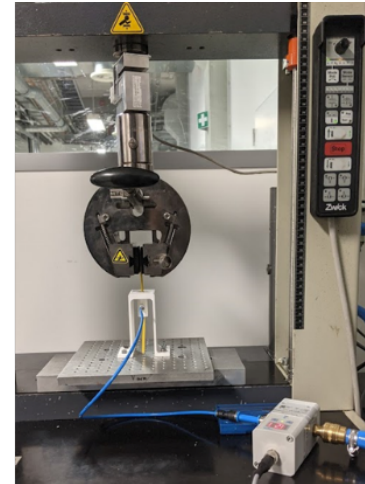
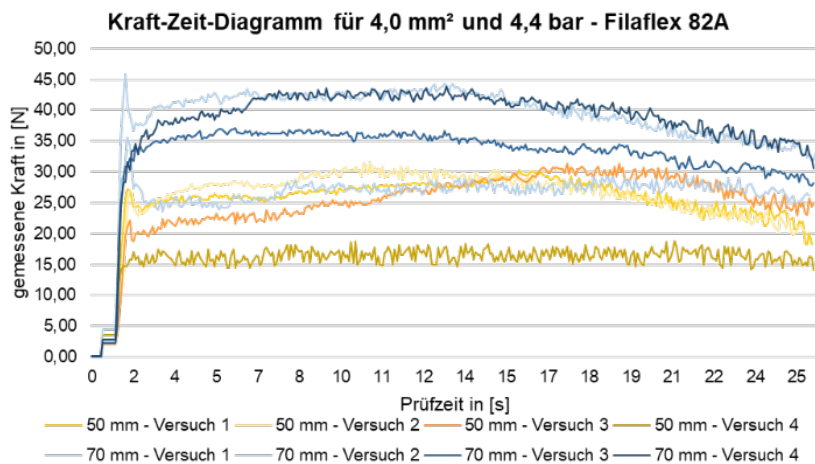


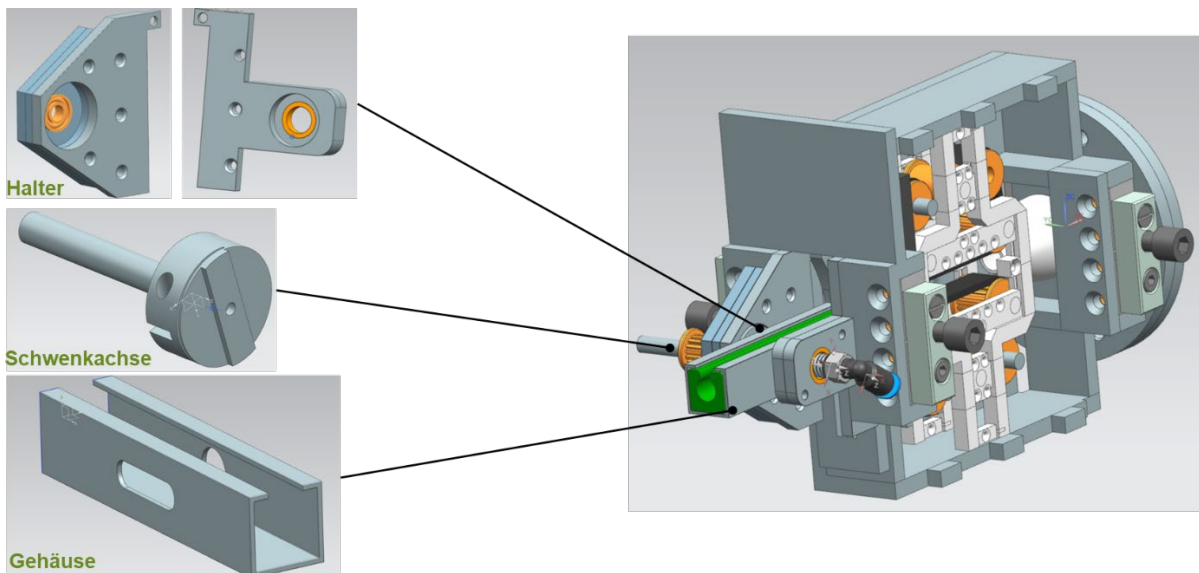
Abbildung 33: Erstes Konstruktionsmodell des Greifsystems zur Verarbeitung von Leitungen

Begleitend zur Entwicklung des Greifsystems wurden qualifizierende Untersuchungen zur Sicherstellung der erforderlichen Greif- und Steckkräfte durchgeführt (s. Abbildung 34). Es wurden drei unterschiedliche Materialien für den pneumatischen Greifkörper qualifiziert. Die dadurch gewonnenen Informationen wurden zur Auslegung und Verwendung für das neuartige Greifsystem verwendet.



**Abbildung 34: Qualifikationsuntersuchung zur Steckkraft**

Auf Basis der Erkenntnisse von Untersuchungen einzelner Teilfunktionalitäten des Werkzeuges, wurden Optimierungen in das Entwicklungsmodell des Werkzeuges mit aufgenommen. Insbesondere wurden Probleme bei der Übertragung des Drehmomentes auf den Schwenkörper behoben (s. Abbildung 35).



**Abbildung 35: Weiterentwickeltes Konstruktionsmodell des Greifsystems PP1**

Weiterhin wurde zur Absicherung des Verdrahtungswerkzeugs eine numerische Analyse durchgeführt (s. Abbildung 36). Die dadurch ermittelten Haltekräfte des Kabels im Greifkörper konnten zur Auslegung von dessen Länge und weiterer Parameter genutzt werden.

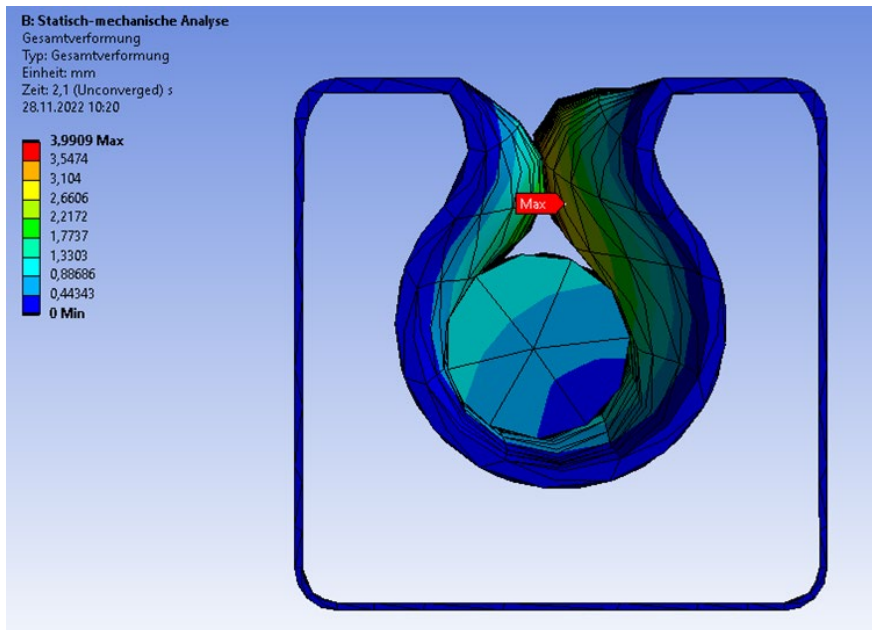


Abbildung 36: Numerische Analyse der Greifkraft

Die Steuerung des Prozesses wurde entsprechend des oben vorgestellten Fremdsteuerungsansatzes umgesetzt. Die Bildauswertung wird über den Steuer-PC durchgeführt und die erkannten Offsets fließen direkt in die Bewegungsbefehle an den Roboter ein. Die Prozeduren in Form von Python-Modulen sind für den Einsatz der am Roboterarm befindlichen Kameras qualifiziert. Abbildung 37 zeigt das Flussdiagramm für den Steckvorgang eines Kabelendes.

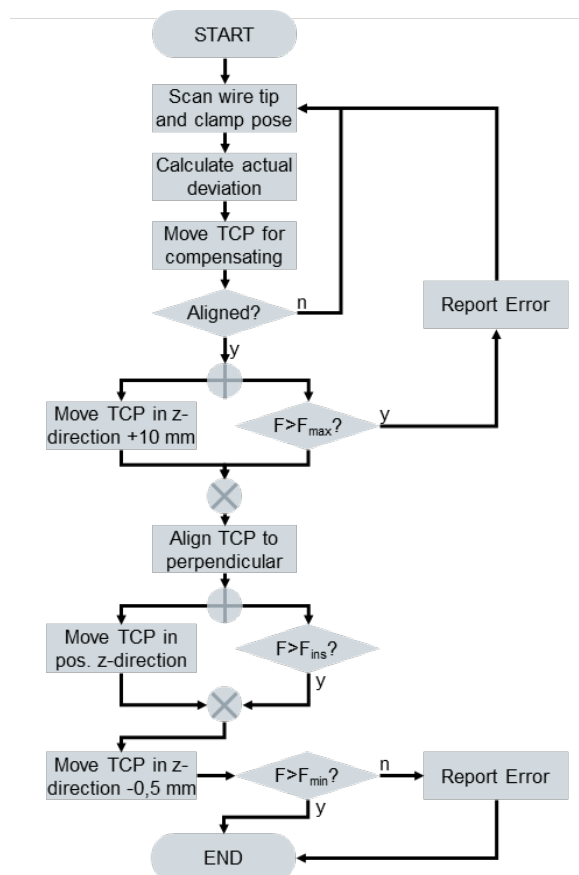
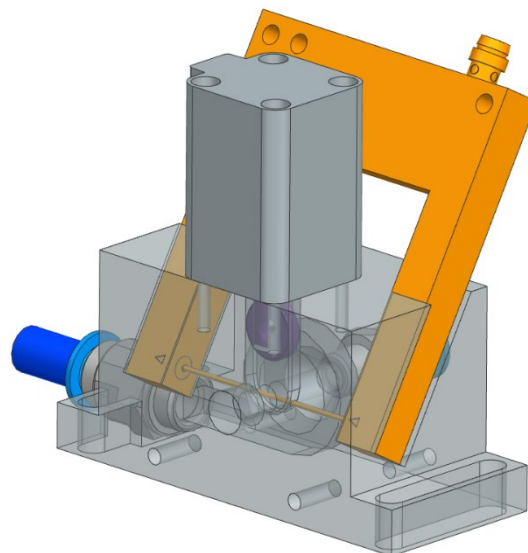


Abbildung 37: Flussdiagramm des Steckprozesses

**PP2: Zuführung ungeordneter Kabel**

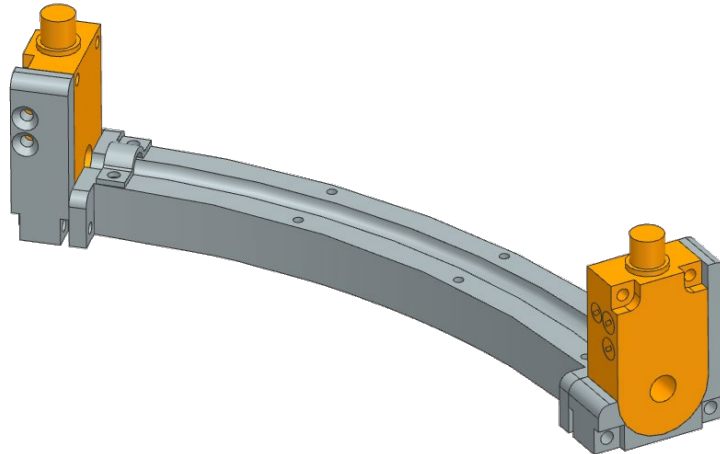
Die Zuführung von ungeordneten, konfektionierten Kabeln erfolgt im Prozessmodell durch einen flexiblen Schlauch. Dieser wird durch einen Polytetrafluorethylen-Schlauch aufgrund des geringen Haftreibungskoeffizienten ausgeführt. Es werden zwei unterschiedliche Durchmesser, 6mm und 8mm, eingesetzt. Zur Steuerung des Materialflusses werden weiterführend drei wesentliche Hardware-Elemente entwickelt.

Den Startpunkt des Materialflusses bildet eine Beschleunigungsstation. Dort werden die Kabel eingeführt und mittels Druckluft beschleunigt. Im Prozessmodell ist das Modell ein Ersatz für einen Konfektionsvollautomaten, der im Projekt selbst nicht mit abgebildet wird. Die entwickelte Beschleunigungsstation selbst verfügt über einen Zuführ- und Beschleunigungsanschluss für das Kabel. Weiterhin wird ein pneumatischer Aktor eingesetzt, um die Zuführungs- von der Beschleunigungsseite formschlüssig abzutrennen. Eine Gabellichtschranke detektiert sowohl die Anwesenheit der formschlüssigen Zylinderstange als auch des Kabels. Weiterhin gibt es einen pneumatischen Anschluss zur Zuführung der Förderdruckluft. Das Bauteil ist aufgrund der komplexen innenliegenden Strukturen für den 3D-Druck optimiert und herstellbar (s. Abbildung 38).



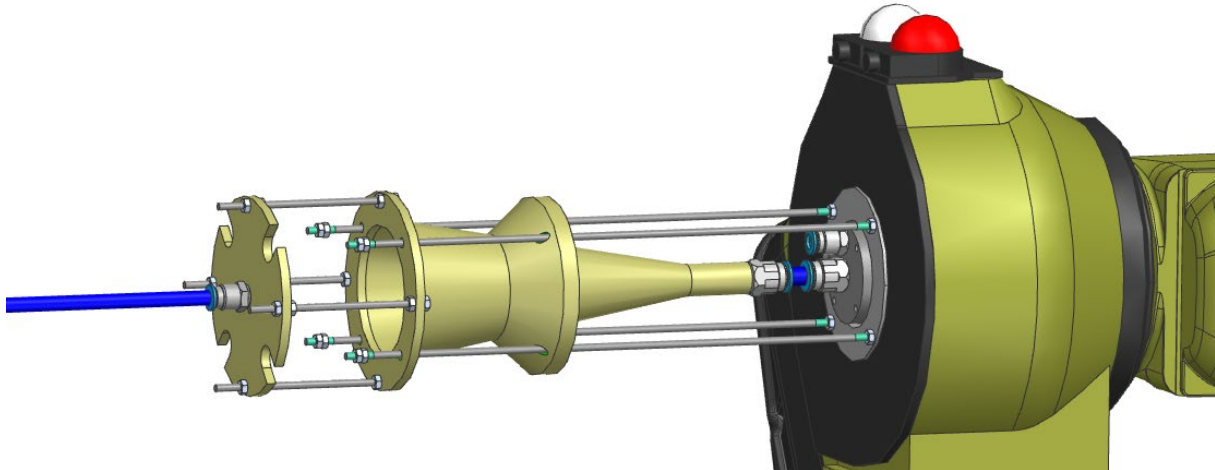
**Abbildung 38: Entwurf der Beschleunigungsstation für die Zuführung ungeordneter Kabel**

Als zweite Komponente des Materialflusssystem werden Schlauchführungen mit definiertem Radius eingesetzt. Diese sind notwendig, um eine konsistente Schlauchführung und wiederholbaren Zuführungsprozess zu gewährleisten. Darüber hinaus können Halter für Messpunkte, die durch induktive Ringsensoren umgesetzt sind, an den Schlauchführungen angebracht werden. Abbildung 39 zeigt ein solches Führungselement mit einem Radius 300 mm für den Schlauch mit 6mm Innendurchmesser.



**Abbildung 39: Entwurf der Führungselemente für den Materialfluss**

Das dritte und mitunter wichtigste Hardware-Element von PP 2 ist die Abbremsvorrichtung. Diese kann aufgrund der Auswahl des Roboters direkt an der dritten Achse des Roboterarms montiert werden. Hierbei ist zudem ein Schiebemechanismus zum Ausgleich von Längenänderungen zwischen Abbremsvorrichtung und Endeffektor insb. durch Bewegung von Achse 5 vorgesehen. Im Wesentlichen besteht die Vorrichtung aus einem Bereich zur Luftentweichung und zur Rezentrierung des Kabels durch eine trichterförmige Staudüse. Weiterhin wird die Staudüse durch einen Gegenstrom durchströmt, der zur gewünschten Entschleunigungswirkung der Vorrichtung beiträgt. Abbildung 40 zeigt die Bremsvorrichtung in montierter Position als Konstruktionsmodell.



**Abbildung 40: Entwurf der Kabelbremsvorrichtung an Achse 3 des Roboterarms**

Der Gesamtaufbau des Bremsvorgangs und der notwendigen Sensoren und Aktoren für die Steuerung des Prozesses sind in Abbildung 41 dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass der Sensor RS1 bereits Teil des Greifwerkzeuges (PP1) darstellt und die Kabelankunft im Werkzeug detektiert.

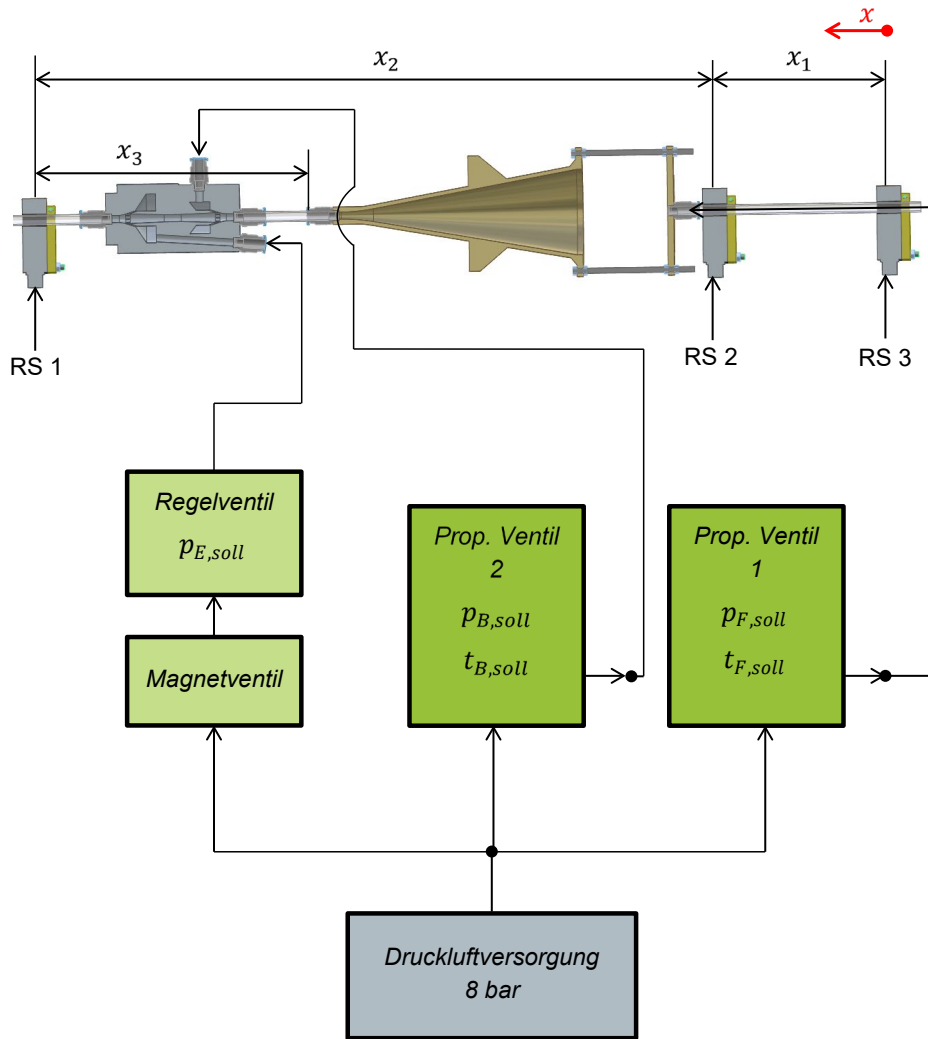


Abbildung 41: Schematischer Aufbau der Druckluftbremse für PP2

Weiterhin wurden Finite-Element-Methoden eingesetzt, um die Geschwindigkeit der transportierten Kabel bei unterschiedlichen Randbedingungen, insbesondere Luftdruck der Einlassseite, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Radien und Höhenanstiege vorherzusagen. Die besondere Schwierigkeit dieser Simulationen liegt in der Kombination von Fluidodynamik und der Abbildung des Biegeschlaffen Verhaltens. Hier musste daher ein Ersatzmodell (s. Abbildung 42) angewendet werden.

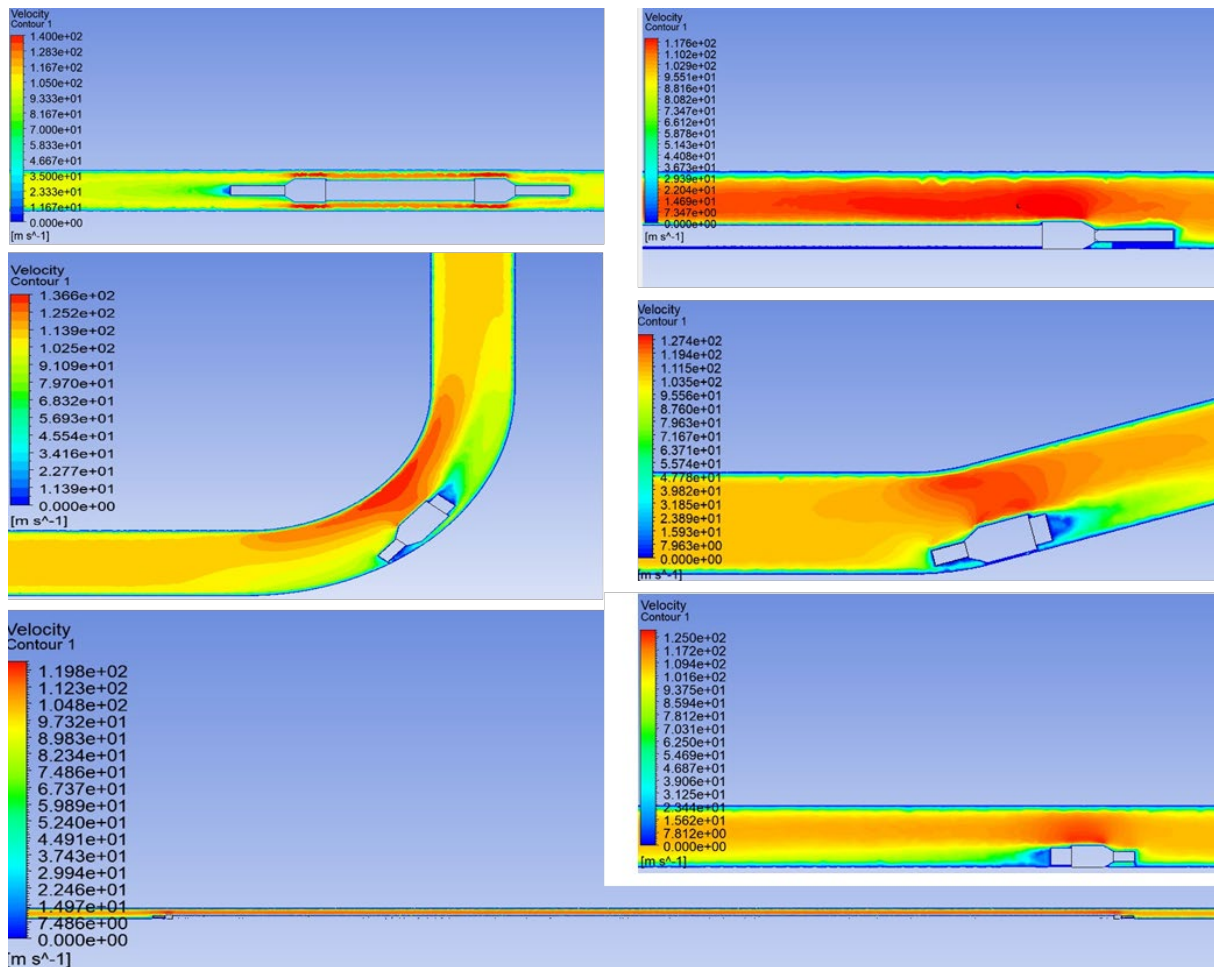


Abbildung 42: Simulationsmodelle „Transportgeschwindigkeit konfektionierter Kabel“

**PP3: Platinenmontage**

Der konstruktive Prototyp zur Umsetzung von PP3 zum Zusammenbau der Outlet-Modul Komponenten basiert auf einem Parallelbackengreifers des Typs Schunk Co-act EPG-C 64, der mit dem Prozess und Bauteil angepassten Greifbacken versehen wurde. Der Fokus des Prozessprototypen liegt auf der Hardware zur Bereitstellung der Hutschiene, da diese im PP3 gleichzeitig als Fügevorrichtung vorgesehen ist. Abbildung 43 zeigt die wesentlichen Prozess-Hardware in der 3D-CAD Konstruktionsumgebung.

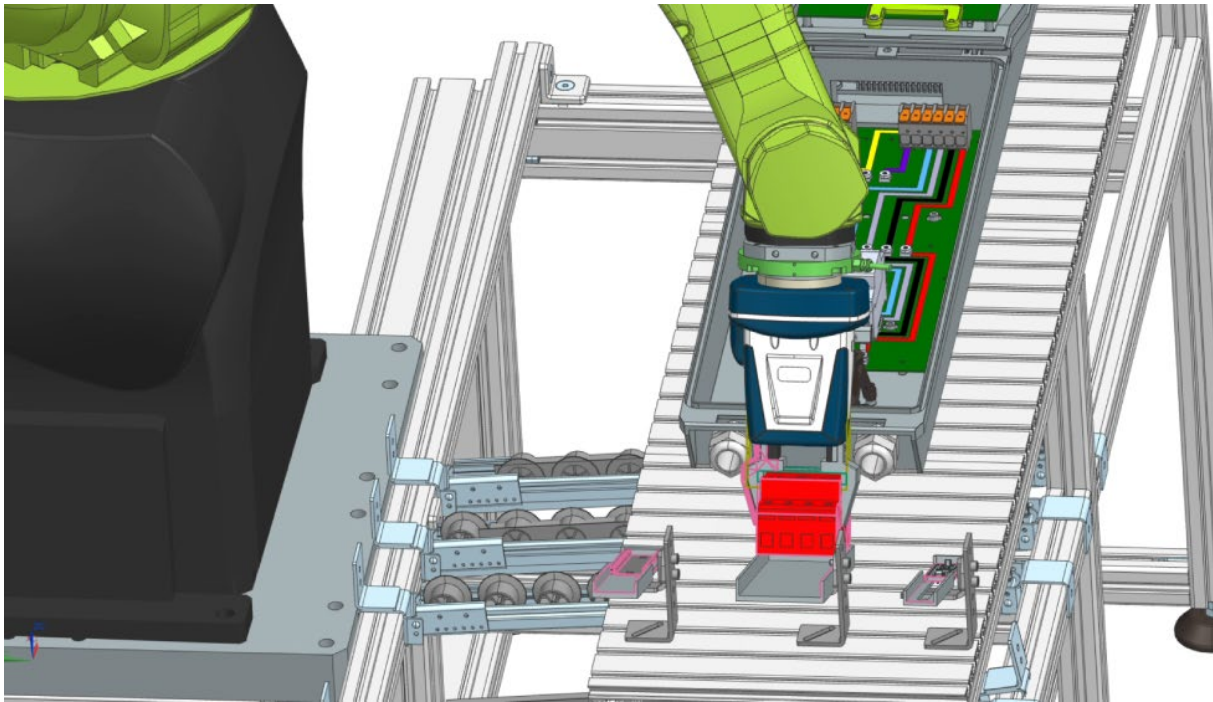


Abbildung 43: Entwurf und räumliche Anordnung der Komponenten zur Platinen Montage

### 2.7.6 AP6 Test und Optimierungen des Outlet-Moduls

Ziel des Arbeitspaketes ist die Untersuchung des Outlet-Prototypen hinsichtlich der geforderten Produkteigenschaften insbesondere der automatisierungsgerechten Gestaltung. Basierend auf den von Partner Compleo vorgestellten B1-Muster, wurden Bewertungen bezüglich der automatisierungsgerechten Gestaltung vorgenommen. Dazu wurde das konkrete Produkt in seine einzelnen Produktionsprozesse zerlegt und die Automatisierbarkeit der einzelnen Prozesse evaluiert. Defizite wurden im Bereich der Kabeldurchführung von Anschlusskästen zu Golden Outlet identifiziert und im Anschlussbereich des Ladekabels identifiziert. Gemeinsam mit Compleo wurden dazu im Rahmen mehrerer Workshops, automatisierungsgerechte Alternativen erarbeitet, die in das B2-Muster mit einfließen sollen. Der Hauptteil von AP6 liegt beim Partner Compleo, um durch ausgiebige Tests des B1-Musters Optimierungsbedarfe mechanischer, elektrischer und elektronischer Art zu identifizieren und in das B2-Muster mit zu übertragen.

### 2.7.7 AP7 Prototypische Umsetzung

Ziel des AP ist die prototypische Umsetzung der bereits vorgestellten Prozessprototypen zur Montage des Outlet-Moduls. Da die Entwicklung des Outlet-Modul-Konzeptes bei Partner Compleo zeitlich verzögert stattfanden, wurde im Konsortialtreffen am 11.10.2022 beschlossen die prototypische Umsetzung des PP1 Automatisiertes Stecken unabhängig der konkreten Ausprägungen des Outlet-Modul Prototypen fortzusetzen. Die Auswahl dieses repräsentativen Prozessschrittes basieren auf der Ist-Analyse und dem hohen manuellen Verdrahtungsaufwand der Montage. Die Auswahl von PP2 ergibt sich durch die Notwendigkeit einer automatisierungsgerechten Zuführung von biegeschlaffen Kabeln für PP1. Das Prozessmodell PP3 Platinenmontage hingegen wurde mit direktem Bezug zum B1-Muster des Outlet-Moduls ausgewählt. Dabei steht die Neuheit der Prozessfolge im Vordergrund, deren Machbarkeit nicht durch digitale Untersuchungen nachgewiesen werden kann, sondern nur

prototypisch bewiesen werden kann. Die Prozessprototypen PP1 und PP2 sind zudem auf beliebige Ladesäulen-Architekturen adaptierbar, sofern die in AP3 definierten Anforderungen eingehalten werden. Trotz der angespannten Lage auf dem Beschaffungsmarkt, konnten alle notwendigen Komponenten beschafft werden oder durch beschaffbare Komponenten ersetzt werden. Dazu wurden im Projektverlauf mehrfach die Steuerungsarchitektur des Systems angepasst. Abschließend wurden die Ergebnisse im PP4 zusammengetragen und die resultierenden Montagezeiten für die virtuelle Absicherung der gesamten Montagelinie in AP8 verfügbar gemacht.

### PP1 Automatisierte Verdrahtung

Der entwickelte Prozessprototyp PP1 wurde entsprechend dem Konzept aus AP4 umgesetzt. Abbildung 44 zeigt die prototypische Umsetzung des Prozessprototypen zunächst als 3D-gedrucktes Modell und später als gefrästes Aluminiumbauteil. Durch diese Vorgehensweise konnten geometrische Optimierungen anhand des additiven Modells mit geringen Zykluszeiten validiert werden, bevor eine aufwändige Fertigung des robusteren Aluminiumbauteils in Auftrag gegeben wurde.



Abbildung 44: 3D-Druck und Aluminium-Prototyp des PP1 Greifsystems für konfektionierte Leitungen

Weitere Untersuchungen bezüglich der Langzeitstabilität wurden mit den Prototypen durchgeführt. Die Ergebnisse und Erkenntnisse erster Steckversuche (vgl. Abbildung 45) und Versuche zur Wiederholgenauigkeit der Greifbewegung (vgl. Abbildung 46) führten zu einem optimierten Prototyp (s. Abbildung 47). Dabei wurde insbesondere der Einfluss mechanischer Instabilitäten durch einen verbesserten Greifkörper reduziert.

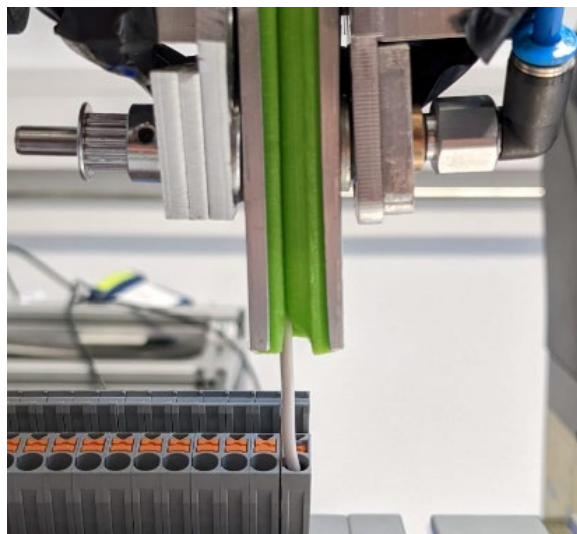


Abbildung 45: Prototypischer Test des weiterentwickelten PP1 Greifsystems

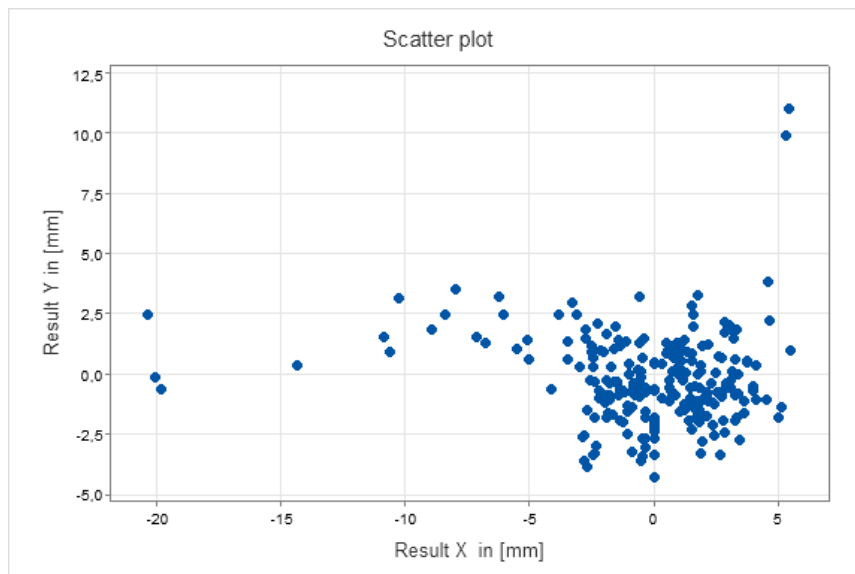


Abbildung 46: Positioniergenauigkeit der Kabelspitze durch den Prototyp

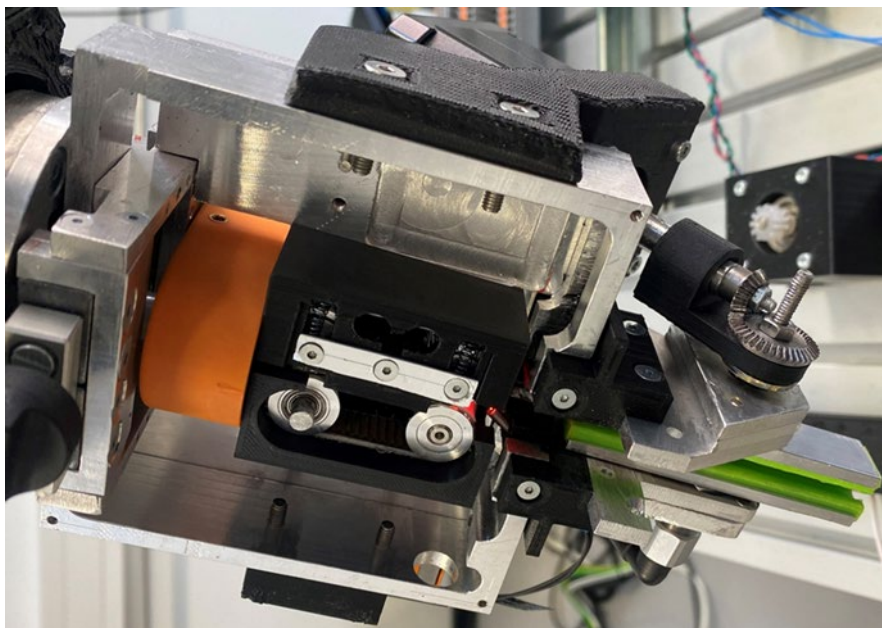


Abbildung 47: Dritter Prototyp des PP1 Greifsystems

Der Steckprozess konnte mit dem in Abbildung 47 dargestellten Werkzeug erfolgreich durchgeführt werden. Ein speziell zum Test des Gesamtsystems entwickelter Versuchsaufbau mit Randomisierung der Kabelendposition durch eine Spirale konnte die Maschinenfähigkeit nachgewiesen und das erfolgreiche Zusammenspiel von Hardware und Auswertelogik, insbesondere der Positionsbestimmung, validiert werden (s. Abbildung 48).

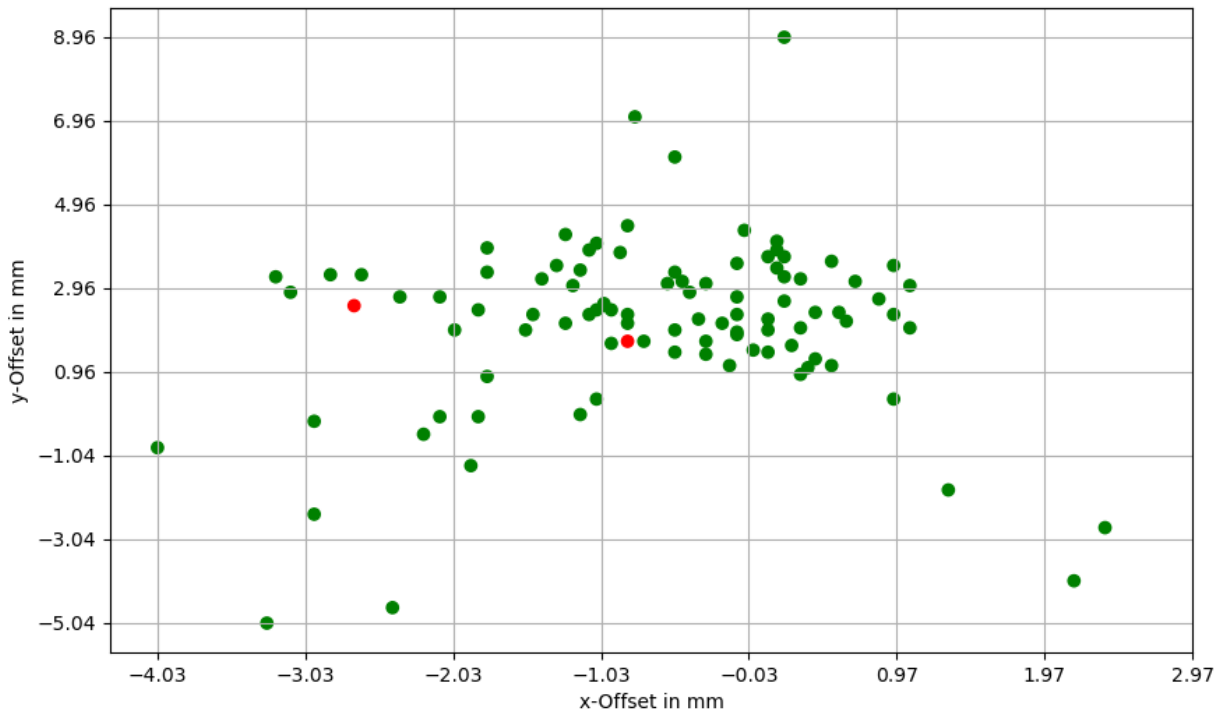


Abbildung 48: Erfolg der Steckversuche (grün= erfolgreich, rot= nicht erfolgreich) unter Darstellung der erkannten Lageabweichung des biegeschlaffen Kabelendes

### PP2: Zuführung ungeordneter Kabel

Die Zuführung der konfektionierten Kabel wurde entsprechend Prozessprototyp PP2 realisiert. Abbildung 49 zeigt den Aufbau der Steuerungskomponenten der unterschiedlichen Luftströme am Gesamtdemonstrator montiert. Dabei lassen sich Brems- und Förderdruck im durch die analogen Ausgänge des Roboters und eingesetzter Proportionalventile im Programmablauf von PP2 einstellen und regeln.

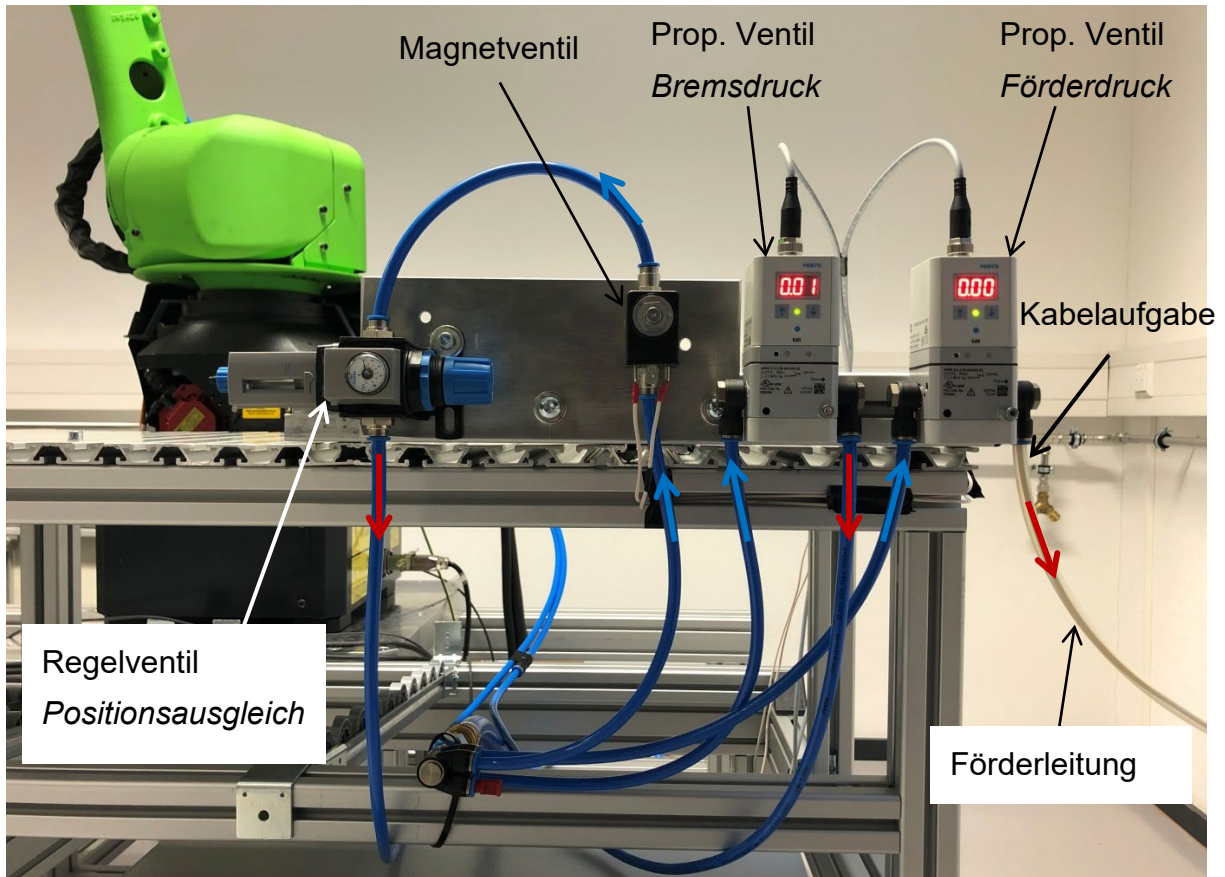
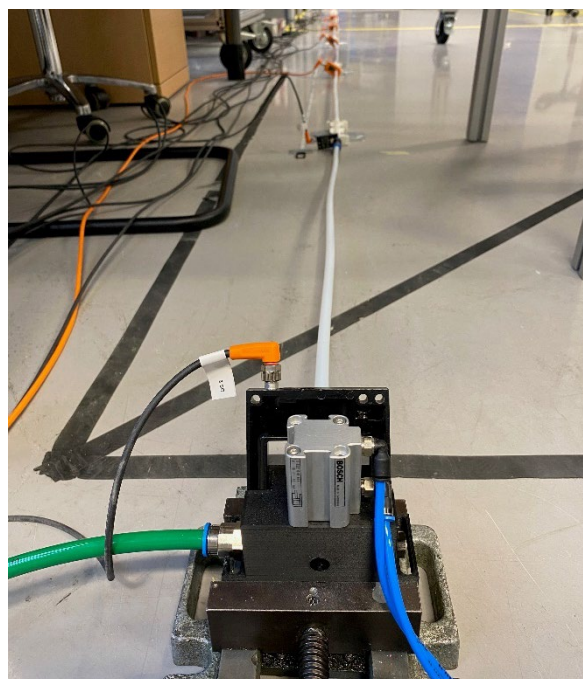


Abbildung 49: Prototypische Umsetzung der Steuereinheit „Automatische Kabel-Abbremsung“

Die Beschleunigung der Kabel wurde durch eine additiv gefertigte Beschleunigungsstation mit Kurzhubzylinder und Lichtschranke durchgeführt. Durch die Ansteuerung eines 5/2Wegeventils mittels der digitalen Ausgänge des Roboters konnte der Beschleunigungsvorgang vollständig programmatisch ausgelöst werden. Die Funktionsweise der Beschleunigungsvorrichtung sowie des gesamten Beförderungsprinzip wurde im Rahmen von Versuchen (s. Abbildung 50) validiert.



**Abbildung 50: Versuchsaufbau zur Validierung von PP2**

Der Abbremsvorgang konnte ebenfalls prototypisch umgesetzt und validiert werden (s. Abbildung 51). Dazu wurden Versuche zur Ermittlung von adäquaten Luftdrücken für den Abbremsluftstrom durchgeführt. Die Förderung des Kabels bis in das Verdrahtungswerkzeug (Sensor RS1) übernimmt dabei ein zusätzlich erzeugter Unterdruck nach dem eigentlichen Bremsvorgang. Durch die Zuführung der konfektionierten Kabel mit moderater, konstanter Geschwindigkeit, werden Beschädigungen am Förderriemen des Verdrahtungswerkzeuges vorgebeugt.



**Abbildung 51: Prototypische Umsetzung der Abbremsvorrichtung (PP2)**

### **PP3: Platinenmontage**

Die prototypische Umsetzung Platinenmontage wurde umgesetzt mittels 3D-gedruckter Greiferfinger aus PETG mit einer aufgetragenen Beschichtung aus EVAC zur Steigerung des Haftreibungskoeffizienten. Abbildung 52 zeigt den gegriffenen FI-Schalter vor Beginn des Montageprozesses (vgl. Abbildung 29). Durch die geschickte Planung der Montagefolge war es möglich, den Montageprozess von FI-Schalter und von Überspannungsschutz mit einem einzigen Greiferwerkzeug durchzuführen und dabei einen komplexen, mehrteiligen Zusammenbau zu realisieren. Dieser reale Versuchsausführung konnte zudem den Bewegungsablauf, der in AP8 entwickelt wurde, validieren (vgl. Abbildung 57).



Abbildung 52: Prototypische Greiffinger zu Bestückung der Platine mit el. Bauelementen (PP3)

#### PP4: FML-Montagelinie

Ziel des Arbeitspaketes ist die prototypische Umsetzung automatisierter Montageprozesse für das Outlet Modul. Durch Bereitstellung eines B1-Produktmusters wurden das erste Montagesystem, sowie MRI-Einsatzszenarien (Mensch-Roboter-Interaktion) untersucht. Der Planungsprozess umfasste die Analyse der Montagefähigkeit, die Bewertung des Automatisierungsgrads und die Ermittlung der Montagezeitreduzierung eines MRI-Arbeitsplatzes im Vergleich zu einem manuellen Arbeitsplatz. Zu diesem Zweck wurde ein MRI-Arbeitsplatz in der Laborumgebung aufgebaut, welcher eine praxisrelevante Analyse der Montagefähigkeit des Outletmoduls ermöglicht. Für die Analysen diente der in Abbildung 53 dargestellte Arbeitsplatz des PP4.

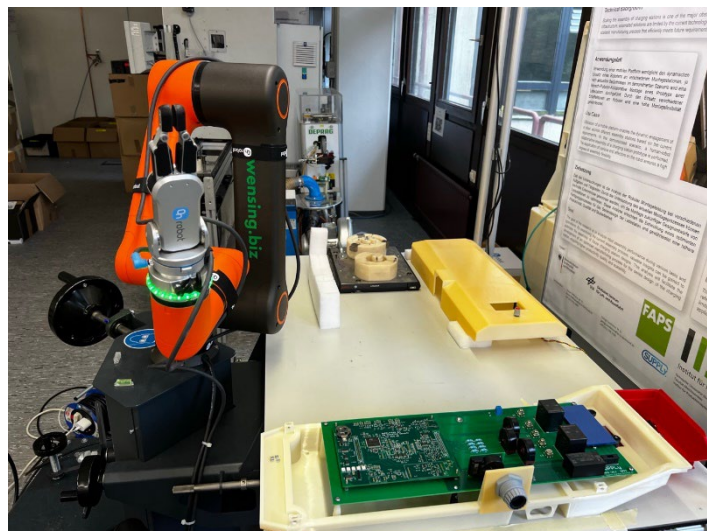


Abbildung 53: Prototypischer MRK-Arbeitsplatz (PP4)

Voraussetzung für die Einführung von automatisierten Montageprozessen ist eine grundlegende Analyse des Produktes mit Ableitung der Prozesszeitwerten. Diese ermöglicht es, die Ergebnislösung bei der Planung der Automatisierung hinsichtlich des zeitreduzierenden Effektes zu bewerten. Außerdem

erhält durch diesen die Produktentwicklung Rückmeldung hinsichtlich der Effektivität der montagegerechten Konstruktionsmethoden und die Montageplanung kann die ermittelten Werte dazu nutzen im Rahmen der Leistungsabstimmung mögliche Organisationsformen der FML zur Kreierung von Flexibilitäts- und Skalierungsbausteinen vornehmen. Dabei unterstützt das B1-Produktmuster die Montageplanung bei der Identifikation von MRI-Integrationsmöglichkeiten innerhalb einzelner Montagetätigkeiten. Dazu zuerst wurde ein Montagevorranggraph erstellt (s. Abbildung 54).

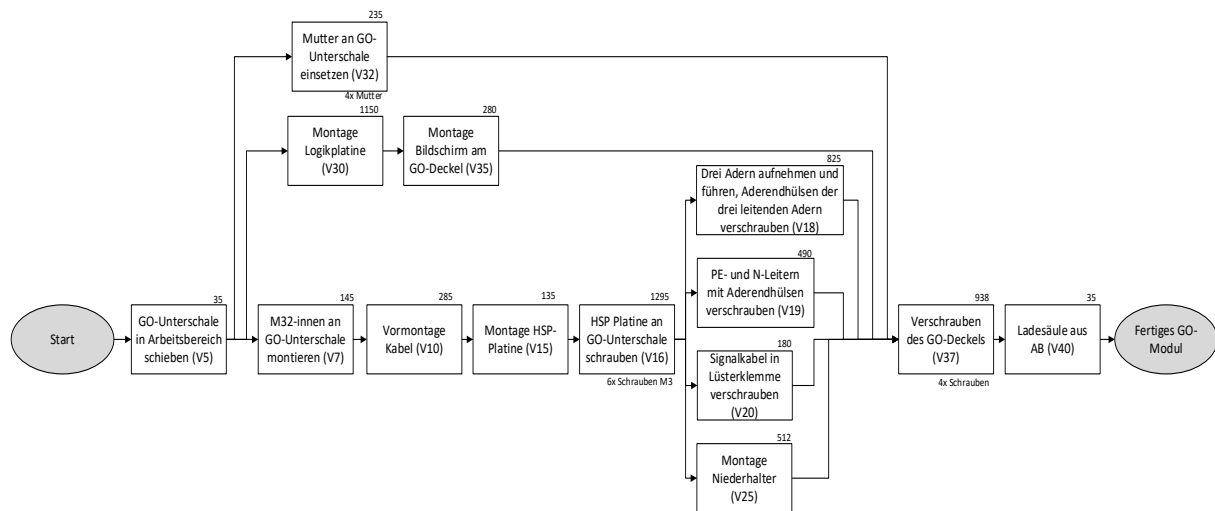


Abbildung 54: Grafische Darstellungsform des Vorranggraphen

Dabei stellt der Vorranggraph die mögliche Montagefolge eines Produkts dar und dient damit als Planungsgrundlage für die Montagesystemplanung. Weiterhin wurde die Analyse der Montageschritte durch eine Zeitanalyse nach dem MTM-UAS-Verfahren ergänzt. Dafür wurde im Labor mit vorhandenen Arbeitsmitteln ein manueller Montagearbeitsplatz gestaltet. Die abgeleiteten Soll-Zeiten sind in Abbildung 06 angegeben. Einzelne Schritte, z.B. die Montage einer Logikplatine (V30) haben sich als besonders zeitaufwendige Montageprozesse herausgestellt. In der folgenden Abbildung ist die MTM-UAS Analyse der Logikplattenmontage dargestellt (s. Abbildung 55).

Nr.	Bezeichnung	Kode Art (Variable)	Zeit te [TMU]	Anzahl Wert/Vorbel	Gesamt te [TMU]
1	Platine aufnehmen und an linker Seite fügen (1. Distanzschraube)	AC2	55,0	1 * 1,0	55,0
2	auf 2.-4. Distanzschraube fügen	PC1	30,0	3 * 1	90,0
3	Nachdrücken an Kontakt	AA1	20,0	1 * 1,0	20,0
4	Handvoll Muttern aufnehmen und in AB bringen	AG2	65,0	1 * 1,0	65,0
5	Mutter aufnehmen und ansetzen	AF1	40,0	4 * 1	160,0
6	Muttern abwerfen	PA2	20,0	1 * 1,0	20,0
7	Erster Schraubzyklus	BA1	5,0	4 * 1,0	20,0
8	sechs Schraubzyklen	BB1	10,0	4 * 6	240,0
9	Mutter festziehen	BD	20,0	4 * 6	480,0
Zeit je Einheit			te = 1.150 TMU		

Nr.	Bezeichnung	Kode Art (Variable)	Zeit te [TMU]	Anzahl Wert/Vorbel	Gesamt te [TMU]
1	Raststifte in AB	3000AG2....5	65	1 * 1,0	65
2	Raststift aufnehmen und fügen	3000AF1....5	40	4 * 1	160
3	Abwerfen	3000PA1....5	10	1 * 1,0	10
4	Platine aufnehmen und an linker Seite fügen (1. Raststift)	3000AC2....5	55	1 * 1,0	55
5	auf 2.-4. Raststift fügen	3000PC1....5	30	3 * 1	90
6	Platine an vier Ecken eindrücken	3000AA1....5	20	1 * 1,0	20
7	Nachdrücken an Kontakt	3000AA1....5	20	1 * 1,0	20
Zeit je Einheit			te = 420 TMU		

Abbildung 55: MTM-Analyse der Logikplatine

Die Prozesszeit beträgt beim B1-Muster 41,4 Sekunden. Hier können hohe Verbesserungsmaßnahmen hinsichtlich der Montagezeitreduktion festgestellt werden. Durch Ersetzen der bestehenden Gewindeverschraubungen durch eine Steckverbindung mit Kunststoffklipsen kann der Zeitaufwand um circa 63% reduziert werden (von 41,4 Sekunden auf 15,1 Sekunden). Durch die Identifikation entsprechender „Montagezeittreiber“ ergeben sich große Optimierungspotentiale bei der Optimierung des Produktdesigns.

Als nächste Schritt zur Identifikation von potentiellen MRI-Arbeitsvorgängen wurde eine Potentialanalysemethode „Quick-Check“ angewandt (Ermer et al., 2019). Sie ermöglicht eine schnelle und nachvollziehbare Bewertung des MRI-Potentials anhand von fünf Kriterien. Dafür wurde im IPS-Labor ein neues MRI-Arbeitssystem mit der Integration eines Hanwha HCR-5A Roboters entwickelt. Auf der Grundlage des geplanten Arbeitsvorgangs ermöglichen Quick-Check Kriterien die Aufteilung der Arbeitsinhalte zwischen Menschen und Robotern. Ein Beispiel für eine Kriterienanalyse wird in Abbildung 56 dargestellt.




<b>Zu- und Abführung</b> (Bewerten Sie die Ist-Situation des Arbeitssystems!)					
<b>Aktionsradius</b>	> 260 cm	160 - 260 cm	120 - 160 cm	60 - 120 cm	0 - 60 cm
	<b>0 Punkte</b>	<b>1 Punkt</b>	<b>2 Punkte</b>	<b>3 Punkte</b>	<b>4 Punkte</b>
<b>Ordnungszustand der zugeführten Bauteile</b>	chaotisch (z.B. "Griff in die Kiste") 	orientiert in einer Ebene (2D) 		lagerichtig (z.B. auf Werkstückträger) 	
	<b>0 Punkte</b>	<b>1 Punkt</b>	<b>2 Punkte</b>	<b>3 Punkte</b>	<b>4 Punkte</b>
<b>Materialversorgung</b>	Eingriff innerhalb einer Taktzeit (bei jedem Bauteil)	Eingriff nach ca. 2 - 10 Min.	Eingriff nach ca. 10 - 30 Min.	Eingriff nach ca. 30 - 60 Minuten	Eingriff max. 1x pro Schicht (ggf. Übernahme durch Logistiker)
	<b>0 Punkte</b>	<b>1 Punkt</b>	<b>2 Punkte</b>	<b>3 Punkte</b>	<b>4 Punkte</b>

Abbildung 56: Quick-Check Analyseparameter für MRI-Szenarien

Die Bewertung der vorgestellten Parameter erfolgt im Rahmen einer fachlichen Ist-Analyse des aktuellen Arbeitssystems. Zum Beispiel:

- **Aktionsradius** - Wie hoch ist aktuell die maximale Distanz zwischen zwei Aufnahme-/ Ablageorten? Beispiel: Teilprozess Verpackung von vier Produkten: Abstand zwischen Bereitstellung des Produkts und der Ablagefläche für verpackte Produkte.
- **Ordnungszustand der zugeführten Bauteile** - Was ist der schlechteste Orientierungszustand, der in dem betrachteten Teilprozess aktuell vorkommt? Beispiel: Bauteile liegen vermischt (chaotisch) in KLT vor.
- **Materialversorgung** - Angenommen, der betrachtete Teilprozesse wird durch einen Roboter übernommen. Wie oft muss der Mitarbeiter zur Ver-/Entsorgung dieses Teilprozesses eingreifen? Im Fokus stehen hier azyklische Tätigkeiten (Behälterwechsel, Rüsten). Beispiel: Roboter entnimmt Bauteil aus Blister, welches alle 20 Teile durch den Menschen gewechselt werden muss (Taktzeit: 1 Min.). Daher findet der Eingriff dementsprechend alle 20 Minuten statt.

Weitere Kriterien berücksichtigen die Anzahl der Teile, das Gewicht, die Fragilität und die geometrische Stabilität des Bauteils, sowie die Verfügbarkeit von sicheren Greifräumen. Die Auswertung der Schlussbericht SUPPLY 31.03.2024 Seite 74

Bewertungsergebnisse ermittelt ein Automatisierungspotenzial der Teilprozesse und des Gesamtsystems, sowie ein MRI-Potenzial. Angewendet auf das Outlet-Modul des B1-Produktmusters wurde ein Quick-Check für die Teilprozesse wie Greifen, Einsetzen und Verschrauben durchgeführt. Dadurch ergaben sich Möglichkeiten zur Verteilung der Montageinhalte zwischen Mensch und Roboter, welche im Rahmen unterschiedlicher Szenarien und Konfigurationen praktisch erprobt wurden. Zudem wurden die möglichen Produktdesign Optimierungen in ergänzenden Szenarien analysiert und als resultierende Montagetakzeit für die Analysen in AP 8 bereitgestellt.

### 2.7.8 AP8 Virtuelle Absicherung und Optimierung des Fertigungskonzepts

Ziel des AP ist die Übertragung der Machbarkeitsergebnisse auf die gesamte Montagelinie in einer virtuellen Umgebung zur Absicherung der Fügeprozesse. Dazu werden im Folgenden unterschiedliche Methoden der digitalen Fabrik auf das B1-Muster angewendet.

#### Virtuelle Absicherung der Fügeprozesse

Der Vorranggraph (vgl. Abbildung 54) wird genutzt, um alle möglichen Fügefolgen für das B1-Muster abzuleiten. Insgesamt wurden 29 Montageschritte identifiziert, die z.T. unabhängig voneinander und daher in unterschiedlichen Folgen durchgeführt werden können. Im Rahmen einer virtuellen Montageanalyse wurden daher die notwendigen Montagebewegungen der unterschiedlichen Folgen der einzelnen Komponenten ermittelt und auf Kollisionen überprüft (s. Abbildung 57).

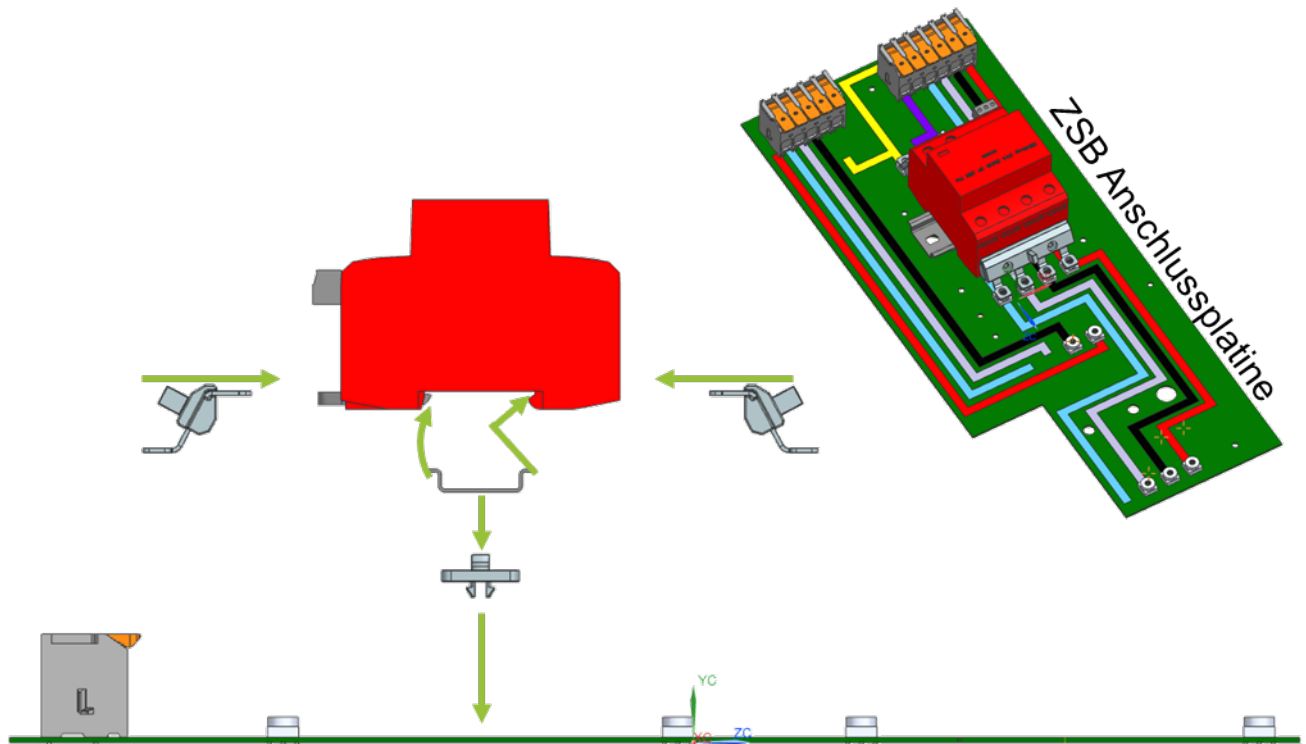


Abbildung 57: Virtuelle Absicherung der Fügeprozesse am Beispiel der Anschlussplatine

#### Digitales Modell der FML

Auf der Basis des Montagevorranggraphen wurden einzelne Montageschritte zu Arbeitsstationen gruppiert. In Zusammenarbeit mit dem Partner IPS, der die notwendigen Materialflusssimulationen durchführte, wurde darauf aufbauend eine Montagelinie entwickelt und die Montageschritte im virtuellen Umfeld abgesichert. Abbildung 58 zeigt das digitale Modell der grundlegenden Montagelinie

in U-Form. Erweiterungen im Rahmen der flexibilitäts- und Skalierungsplanung folgen im weiteren Verlauf dieses Abschnitts.



Abbildung 58: Digitales Modell der Montagelinie für das B1-Muster

### **Kinematiksimulation**

Weiterhin wurde die Integrierbarkeit der automatischen Teilstationen untersucht. Mittels einer Kinematiksimulation durch die Software „Process Simulate“ konnte das digitale Anlagenkonzept der automatisierten Roboterstationen abgebildet und in das Gesamtmodell integriert werden (s. Abbildung 59). Weiterhin wurde das digitale Modell für Untersuchungen zur Optimierung von Positionierung und geometrischem Aufbau von Werkzeugen und Zuführungen eingesetzt. Diese Untersuchung trägt zur Vermeidung von Erreichbarkeitsproblemen und Kollisionen von Roboter, weiteren Betriebsmitteln und dem Outlet-Modul bei.

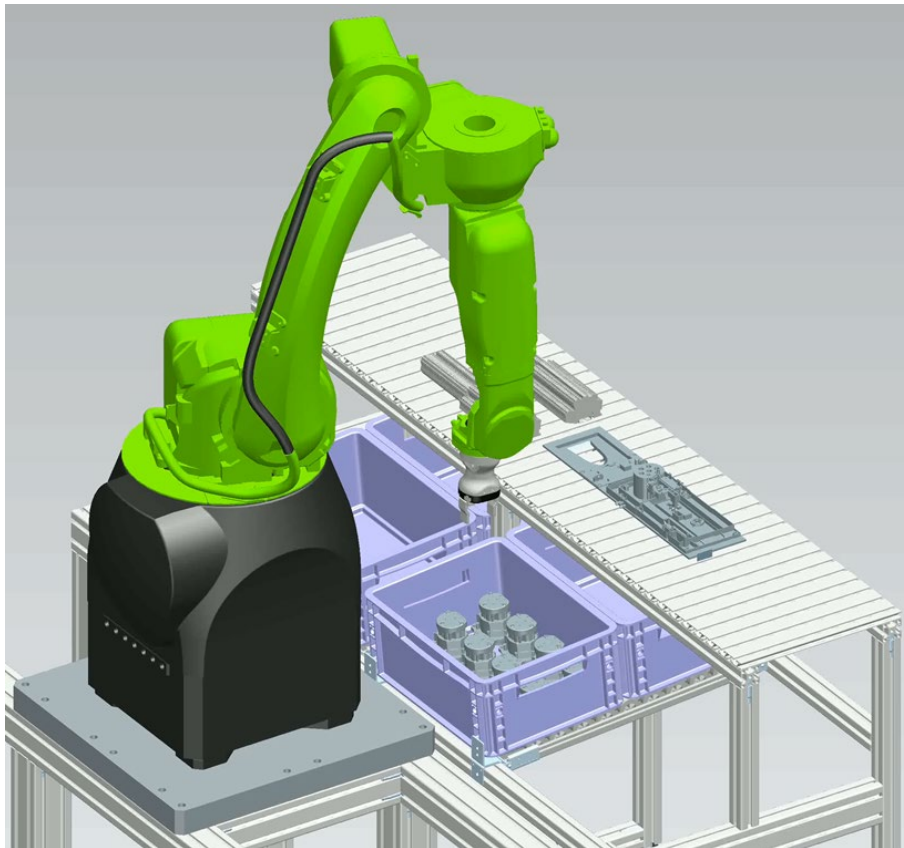
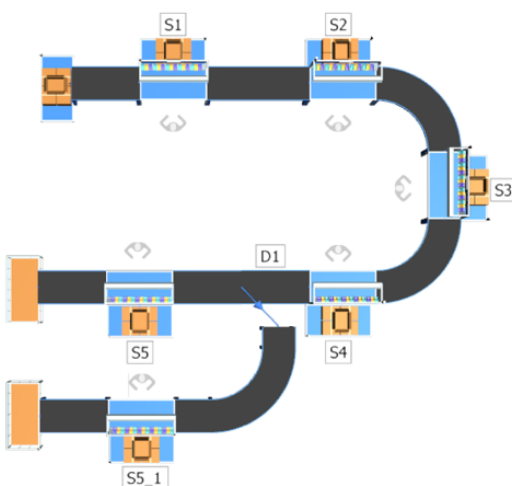


Abbildung 59: Kinematiksimulation zur Entnahme von Bauteilen aus Kleinladungsträger

### Materialfluss

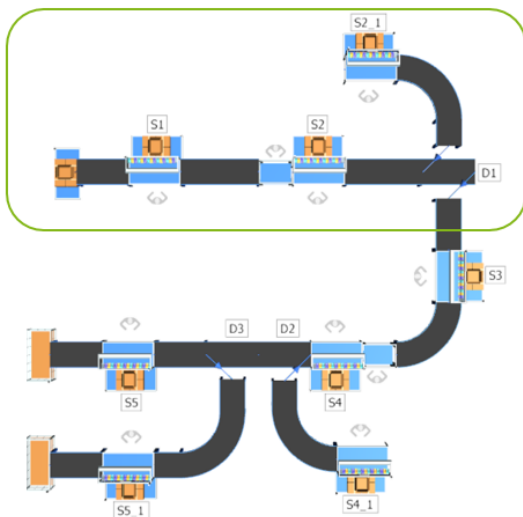
Die virtuelle Absicherung und Optimierung der Montagelinie wurde mittels Softwaretools zur Simulation von Materialflüssen durchgeführt. Dabei bestand der Fokus hinsichtlich der Optimierung des übergeordneten Produktionsablaufs der Montagelinie auf der Analyse der Ausbringungsmenge bei gegebenem Mitarbeiterereinsatz sowie gegebenem Automatisierungsgrad. Letzteres bestimmt sich anhand der prozentualen Verteilung der Tätigkeitsumfänge auf MRK-organisierte Arbeitsplätze der Montagelinie. Die grundlegende Organisation besteht dabei, dem Referenzplanungsprozess folgend, in einer FML in Kombination mit den in AP 3 aufgelisteten Rahmenbedingungen des Anwendungspartner Compleo. Zur flexiblen Anpassung an mögliche Stückzahlenszenarien innerhalb des vorgegebenen Stückzahlkorridors von 70.000 – 200.000 Stück wurden drei Skalierungsstufen eruiert.



- Flexibilitätskorridor: 68.000 – 115.600 stk./ Jahr
- Mitarbeiterflexibilitätsgrad: 3\* bis 6 Mitarbeiter
- Investitionskosten: Ca. 95.000 € zzgl. Lohnkosten
- Teilautomatisierungsgrad: 16 Prozent
- Schichtsystem: 2 Schichten
- Platzbedarf: ca. 110 m<sup>2</sup>
- Kein Vormontagebereich

Abbildung 60: FML-Skalierungsstufe 1

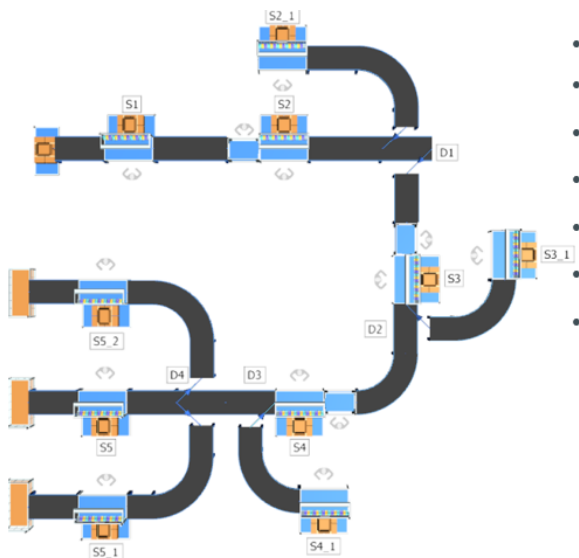
Die erste Skalierungsstufe bildet den unteren Flexibilitätswahlbereich mittels 3 bis 6 Mitarbeitern bei einem Teilautomatisierungsgrad von circa 16 Prozent (Abbildung 60). Der Platzbedarf dieser Montagelinie erstreckt sich in Abhängigkeit von der Materialbereitstellungskapazität auf 110 m<sup>2</sup>. Hierauf aufbauend werden in der zweiten Skalierungsstufe Arbeitsinhalte des Outlet Moduls innerhalb eines Vormontagebereichs gebündelt (grüner Kasten) um kürzere Taktzeiten durch geringere Arbeitsinhalte in der Hauptmontagelinie zu ermöglichen (Abbildung 61).



- Flexibilitätswahlbereich: 94.000 – 198.500 stk./ Jahr
- Mitarbeiterflexibilitätsgrad: 4\* bis 8 Mitarbeiter
- Investitionskosten: Ca. 140.000 € zzgl. Lohnkosten
- Teilautomatisierungsgrad: 22 Prozent
- Schichtsystem: 2 Schichten
- Platzbedarf: ca. 170 m<sup>2</sup>
- Vormontagebereich

Abbildung 61: FML-Skalierungsstufe 2

Im Ergebnis kann beim Einsatz von 4 bis 8 Mitarbeitern in einem Zwei-Schicht-System eine Ausbringungsmenge von bis zu 198.500 Stück/Jahr erzielt werden.



- Flexibilitätswahlbereich: 140.000 – 275.000 stk./ Jahr
- Mitarbeiterflexibilitätsgrad: 6\* bis 10 Mitarbeiter
- Investitionskosten: Ca. 250.000 € zzgl. Lohnkosten
- Teilautomatisierungsgrad: 20 Prozent
- Schichtsystem: 2 Schichten
- Platzbedarf: ca. 275 m<sup>2</sup>
- Vormontagebereich

Abbildung 62: FML-Skalierungsstufe 3

Aufgrund der unzureichenden Maximalstückzahl der zweiten Skalierungsstufe wurde im Rahmen von AP 8 eine dritte Stufe entwickelt, welche diese deutlich übertrifft. Hintergrund ist, dass zum einen eine Ausbringungsmenge von 200.000 Stück pro Jahr innerhalb der Skalierungsstufe zwei nur durch umfangreiche Konfigurationsänderungen möglich ist und zum anderen aufgrund der hohen Unsicherheit im Umfeld der Elektromobilität Kapazitätsreserven zur Realisierung von höheren

Stückzahlumfängen für zukünftige Marktnachfragen eingeplant werden sollten. Das resultierende Montagekonzept basiert auf der zweiten Ausbaustufe, erweitert diese jedoch um zusätzliche Arbeitssysteme. Durch Umverteilung der Arbeitsinhalte werden zusätzliche Flexibilitätsräume geschaffen, die in einer maximalen Ausbringungsmenge von 275.000 Stück pro Jahr resultieren (Abbildung 62).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass aufgrund des Ansatzes der Produktneuentwicklung große Potentiale zur Flexibilität und Skalierung der Montagelinie geschaffen worden konnten. Bei der Adaption der zugrundeliegenden Aufgabenstellung in Bezug auf ein nicht veränderbares gegebenes Produkt würden die Möglichkeiten ein deutlich geringeres Potential aufweisen, weshalb im Falle des Outlet-Moduls von einem unerlässlichen Planungsschritt bei der Produktneuentwicklung ausgegangen werden kann.

### 2.7.9 AP10 Bewertung und Handlungsempfehlungen

Der Referenzplanungsprozess wurde im Rahmen der Entwicklung des VDMA-Einheitsblatt durch einen industriellen Arbeitskreis begleitet. Dabei wurde der hohe Praxisnutzen bestätigt und dessen Mehrwert hervorgehoben. Um weitere Schritte hinsichtlich der Praxisanwendung anzustreben, da die Planung von Montagesystemen im Umfeld von volatilen Marktbedingungen eine komplexe Aufgabe darstellt welche die die Einbindung verschiedener Disziplinen erfordert, sind zusätzliche Forschungstätigkeiten erforderlich, um Branchen und Unternehmen außerhalb der Ladesäulenproduktion zur flexiblen und skalierbaren Montageplanung zu befähigen. Der Referenzplanungsprozess strukturiert die Planungsaufgaben, wodurch eine hochwertige Grundlage zur branchenspezifischen Anpassung der Planungsteilaufgaben besteht. Dadurch wird Planungsfehlern vorgebeugt, welche durch die aufbauende Entwicklung zusätzlicher Unterstützungswerkzeuge eine weitere Komplexitätsreduktion ermöglichen. Dies ist insbesondere für das KMU-Umfeld von hoher praktischer Relevanz. Diese Forschungsfrage sollte in aufbauenden Projekten untersucht und in praxistaugliche Planungssysteme integriert werden.

Erweiternd wurde im Rahmen des Forschungsprojekts festgestellt, welchen hohen Einfluss ein modulares und automatisierungsgerechtes Produktdesign auf die Möglichkeiten der flexiblen und skalierbaren Montage haben. Daher ist bei der Produktentwicklung im Rahmen gleichgearteter Planungsvorhaben ein sehr hohes Maß an Planungszeit zuzuweisen, damit Entscheidungen basierend auf zielführenden Planungszielen getroffen werden können. Ein unzureichendes Produktdesign begrenzt die Möglichkeiten zur Anpassung von Montagesystemen an die jeweiligen Marktbedingungen signifikant.

Der erforderliche Planungsaufwand in Bezug auf hoch flexible Montagesysteme muss den wirtschaftlichkeitsaussichten eines Produkts gegenübergestellt werden. Zwar ermöglicht die Flexibilität eine hohe Anpassbarkeit und damit eine hohe Produktivität an sich verändernde Marktbedingungen, jedoch müssen im Rahmen der Kosten-Nutzen-Analyse mögliche eintretende Abweichungen unterhalb der angenommenen Mindeststückzahl pro Jahr betrachtet werden.

In Bezug auf das entwickelte Outlet-Modul (B1-Muster) können im Vergleich zu den Anforderungen und dem Projektziel folgende Aspekte ermittelt werden.

### Positive Designaspekte und umgesetzte Anforderungen:

- Reduktion der Variantenzahl
- Schachtelbauweise mit teilweise integrierten Befestigungsmerkmalen
- Lineare Montage- und Fügeprozesse
- Reduktion der Anzahl an Verbindungsstellen (Schrauben)
- Reduktion der Gesamtanzahl an Kabel
- Gehäuseunterschale als Montagebasisteil einsetzbar

### Negative Designaspekte des B1-Musters

- Kabeltunnel zwischen der oberen und unteren Modulhälfte weder montagefreundlich noch automatisierungsgerecht
- Abstandhalter, die vormontiert werden müssen
- Verbindungsklemmen mit Hebel nicht für einseitigen, linearen Fügeprozess geeignet
- Komplexe Durchführung des Ladekabels durch Kabelverschraubung, 5mA-Sensor und Stromzähler

Die entwickelte Automatisierungslösung hingegen deckt die Anforderungen insbesondere der Skalierbarkeit ab. Es konnte die Möglichkeit zur sukzessiven Integration automatisierter Arbeitsstationen in die FML virtuell nachgewiesen werden. Den prototypisch untersuchten Prozessen (PP1, PP2, PP3, PP4) konnte die technische Machbarkeit nachgewiesen werden. Es besteht weiterer Forschungsbedarf insbesondere bei PP2. Bei dem pneumatischen Transport konfektionierter Leitungen sind noch weitere Untersuchungen zur Ermittlung der komplexen Wirkzusammenhänge auf physikalischer und anwendungsorientierter Ebene notwendig, um ein hinreichendes Verständnis des Gesamtsystems und einen Leitfaden zur Anwendung aufbauen zu können.

## Literaturverzeichnis

- Azmeh, S., Nguyen, H. & Kuhn, M. (2022). Automation and industrialisation through global value chains: North Africa in the German automotive wiring harness industry. *Structural Change and Economic Dynamics*, 63, 125–138. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2022.09.006>
- Bach, M., Jung, K. & Bächler, A. (2019). *Greifer für die automatisierte Verdrahtung elektrischer Komponenten einer elektrischen Schaltanlage, ein entsprechender Roboter und ein entsprechendes Verfahren (DE102019106710A1)*.
- Barbosa, G. F. & Carvalho, J. (2013). Design for Manufacturing and Assembly methodology applied to aircrafts design and manufacturing. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(7), 116–121. <https://doi.org/10.3182/20130522-3-br-4036.00044>
- Bdew. (2018). *Rund 13.500 öffentliche Ladepunkte in Deutschland*. Verfügbar unter: <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/rund-13500-oeffentliche-ladepunkte-deutschland/>
- Bertagnolli, F. (2020). *Lean Management. Einführung und Vertiefung in die japanische Management-Philosophie* (MOREMEDIA, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage). Wiesbaden, Heidelberg: Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-31240-4>
- Beumelburg, K. (2005). *Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2005 (Nicht für den Austausch). Heimsheim. <https://doi.org/10.18419/opus-4037>
- Bokranz, R., Landau, K. & Becks, C. (Hrsg.). (2006). *Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen. MTM-Handbuch*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel. Verfügbar unter: <http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?id=2646369&prov=M&dok%5Fvar=1&dok%5Fext=htm>
- Braess, H.-H. & Seiffert, U. (2012). *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (6., aktualisierte und erweiterte Auflage). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Bransford, J. D. & Stein, B. S. (1995). *The IDEAL problem solver: A guide for improving thinking, learning, and creativity* (2. Auflage). New York.
- Brökelmann, Jaeger & Busse GmbH & Co. (1994). *Verfahren und Vorrichtung zum Verdrahten von Anschlussstellen von Komponenten elektrischer Geräte (DE000004431254A1)*.
- Bullinger, H.-J. (1995). *Arbeitsgestaltung. Personalorientierte Gestaltung marktgerechter Arbeitssysteme* (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering). Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-07797-8>
- Bullinger, H.-J. & Ammer, D. (Hrsg.). (1986). *Systematische Montageplanung. Handbuch für die Praxis*. München: Hanser.
- Bullinger, H.-J., Dungs, K., Ammer, E.-D., Seidel, U. A. & Weller, B. (1986). *Systematische Montageplanung*. Hanser. Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/fcaa6862-bfdb-4bf9-be75-452ada19c174/details>

- Bullinger, H.-J., Warschat, J. & Bading, A. (1997). *Forschungs-und Entwicklungsmanagement: simultaneous engineering, Projektmanagement, Produktplanung, rapid product development*. Stuttgart: Teubner. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-663-05946-2>
- Busi, M., Cirillo, A., Gregorio, D. de, Indovini, M., Maria, G. de, Melchiorri, C. et al. (2017). The WIRES Experiment: Tools and Strategies for Robotized Switchgear Cabling. *Procedia Manufacturing*, 11, 355–363. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.118>
- Cankut, Y. (2011). Kabelbäume automatisiert fertigen. *ATZproduktion*, 4(1), 28–31. <https://doi.org/10.1365/s35726-011-0008-1>
- Cooper, R. G. (2001). *Winning at new products: Accelerating the process from idea to launch* (Perseus, Hrsg.). Cambridge, Mass.
- Cross, N. (1993). Science and design methodology: A review. *Research in Engineering Design*, 5(2), 63–69. <https://doi.org/10.1007/BF02032575>
- Daenzer, W. F. & Büchel, A. (Hrsg.). (1979). *Systems engineering. Leitfaden zur methodischen Durchführung umfangreicher Planungsvorhaben* (2. Aufl.). Köln: Hanstein.
- Dekker, S., Woods, D. (2002). *MABA-MABA or Abracadabra? Progress on Human–Automation Coordination*.
- Deprato, D., Chelini, L. F. & Althaus, W. (2018). *Verdrahtungsroboter und Verfahren zum Verdrahten, System und Verfahren zum Planen von Verdrahtungen, System und Verfahren zum Erfassen von Bauteilen (EP000003614821A1)*.
- Deuse, J. [J.], Weisner, K. & Hengstebeck, A. (2015). *Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0*. Berlin.
- Dietz, C. (2014). *Methode zum Abgleich der Produktstrukturgestaltung mit der Fertigungssystemgestaltung variantenreicher Produkte* (Schriftenreihe industrial engineering, Bd. 15). Zugl.: Dortmund, Techn. Univ., Diss., 2014. Aachen: Shaker.
- Durward K. Sobek II, Allen C. Ward & Jeffrey K. Liker. (1999). Toyota's Principles of Set-Based Concurrent Engineering. *MIT Sloan Management Review*, 67–83. Verfügbar unter: <https://sloanreview.mit.edu/article/toyotas-principles-of-setbased-concurrent-engineering/>
- Ehrlenspiel, K. (2009). *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit (4., aktualisierte Aufl.)*. München: Hanser.
- Emmerich, H. H. (1992). *Flexible Montage von Leitungssätzen mit Industrierobotern*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Ermer, A.-K., Seckelmann, T., Barthelmey, A., Lemmerz, K., Glogowski, P., Kuhlenkötter, B. et al. (2019). A Quick-Check for Assembly Systems' HRI Potential. *Tagungsband des*, 4, 128–137.
- Eskilander, S. (2001). *Design for automatic assembly. A method for product design: DFA2*. Verfügbar unter: <https://elibrary.ru/item.asp?id=5280010>
- Eversheim, W. (1996). *Organisation in der Produktionstechnik. Band 1: Grundlagen* (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering, Dritte, neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87737-7>

- Frohlig, S., Piechulek, N., Friedlein, M., Sus-Wolf, R., Schmidt, L., Nguyen, M. K. H. et al. (2020). Innovative signal and power connection solutions for alternative powertrain concepts. In *2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. IEEE.
- Gorecki, P. & Pautsch, P. (2018). *Praxisbuch Lean Management. Der Weg zur operativen Excellence* (3., überarbeitete Auflage). München: Hanser. Verfügbar unter: <http://www.hanser-fachbuch.de/9783446455269>
- Grob, R. & Haffner, H. (1982). *Planungsleitlinien Arbeitsstrukturierung. Systematik zur Gestaltung von Arbeitssystemen*. Berlin, München: Siemens Aktiengesellschaft Abteilung Verlag.
- Hartel, M. & Lotter, B. (2012). Planung und Bewertung von Montagesystemen. In B. Lotter & H.-P. Wiendahl (Hrsg.), *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis ; mit 18 Tabellen* (VDI-/Buch], 2. Aufl., S. 365–388). Berlin: Springer Vieweg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-29061-9\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-29061-9_13)
- Hefner, F., Schmidbauer, S. & Franke, J. [Jörg]. (2020). Pose error correction of a robot end-effector using a 3D visual sensor for control cabinet wiring. *Procedia CIRP*, 93, 1133–1138. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.088>
- Hefner, F., Schmidbauer, S. & Franke, J. [Jörg]. (2021). Vision-based adjusting of a digital model to real-world conditions for wire insertion tasks. *Procedia CIRP*, 97, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.248>
- Henrici, D. & Kämper, K. F. (1998). *Vorrichtung zum Verdrahten von Anschlussstellen von Komponenten elektrischer Geräte oder Anlagen (EP000000924818A2)*.
- Hoitsch, H.-J. (1993). *Produktionswirtschaft. Grundlagen einer industriellen Betriebswirtschaftslehre* (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, 2., völlig überarb. und erw. Aufl.). München: Vahlen.
- Hubka, V. (1996). "Design For - DF," in Report / 6. Symposium Fertigungsgerechtes Konstruieren: 19. und 20. Oktober 1995 in Egloffstein/Erlangen, 1–6.
- ISO / IEC / IEEE, 31320-1. *Information technology - Modeling Languages*. Berlin: Beuth.
- Jakoby, W. (2015). *Projektmanagement für Ingenieure. Ein praxisnahes Lehrbuch für den systematischen Projekterfolg* (Springer eBook Collection, 3., aktualisierte u. erw. Aufl. 2015). Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-02608-0>
- Joppen, R. & Kühn, A. (– Ein praxiserprobter Leitfaden. Mittelstand-Digital WISSENSCHAFT TRIFFT PRAXIS, Hrsg.). (2017). *Auf dem Weg zur Digitalisierung im mittelständischen Schaltschrankbau–Ein praxiserprobter Leitfaden*. Verfügbar unter: [https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/Wissenschaft-trifft-Praxis/magazin-wissenschaft-trifft-praxis-ausgabe9.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/Wissenschaft-trifft-Praxis/magazin-wissenschaft-trifft-praxis-ausgabe9.pdf?__blob=publicationFile&v=6)
- Kampker, A., Kohnhäuser, M., Kreisköther, K. & Hehl, M. (2016). Planung skalierbarer Produktionssysteme. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 111(12), 775–778. <https://doi.org/10.3139/104.111638>
- Köhler, C. (2004). *Implementierung und Verifizierung einer Methodik zur Berücksichtigung von Varianten in der Produktionsplanung*. Saarbrücken. Verfügbar unter: <https://www.researchgate.net/profile/christian-koehler->

10/publication/300062875\_implementierung\_und\_verifizierung\_einer\_methodik\_zur\_beruecksichtigung\_von\_varianten\_in\_der\_produktionsplanung/links/5708d17f08aea66081357fc8/implementierung-und-verifizierung-einer-methodik-zur-beruecksichtigung-von-varianten-in-der-produktionsplanung.pdf

Köhler, C. (2017). *Zusammenarbeit von Mensch und Roboter*.

Konold, P. & Reger, H. (2009). *Praxis der Montagetechnik. Produktdesign, Planung, Systemgestaltung* (Vieweg Praxiswissen Ser, 2nd ed.). Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Krüger, A. (2004). *Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme* (Bd. 186). München: Utz.

Kuo, T.-C., Huang, S. H. & Zhang, H.-C. (2001). Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 41(3), 241–260. [https://doi.org/10.1016/s0360-8352\(01\)00045-6](https://doi.org/10.1016/s0360-8352(01)00045-6)

Lanza, G., Stähr, T. & Sapin, S. (2016). Planung einer Montagelinie mit skalierbarem Automatisierungsgrad. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 111(10), 614–617. <https://doi.org/10.3139/104.111610>

Lotter, B. (1986). *Wirtschaftliche Montage: Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik*. VDI-Verlag.

Nationale Plattform Elektromobilität. (2018). *Fortschrittsbericht 2018 - Markthochlaufphase*. Berlin: Druckerei Vogl.

Nguyen, H. G., Kuhn, M. & Franke, J. [Jörg]. (2021). Manufacturing automation for automotive wiring harnesses. *Procedia CIRP*, 97, 379–384. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.254>

Oberer-Treitz, S. & Verl, A. (2019). Einführung in die industrielle Robotik mit Mensch-Roboter-Kooperation. In R. Müller, J. Franke, D. Henrich, B. Kuhlenkötter, A. Raatz & A. Verl (Hrsg.), *Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration* (S. 1–35). München: Hanser. Zugriff am 21.03.2022. Verfügbar unter: <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-581191.html>

Onnasch, L., Maier, X. & Jürgensohn, T. (2016). *Mensch-Roboter-Interaktion - Eine Taxonomie für alle Anwendungsfälle* (Bd. 1). Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). <https://doi.org/10.21934/baua:fokus20160630>

Ponn, J. & Lindemann, U. (Hrsg.). (2011). *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen* (VDI-Buch, 2. Aufl.). Berlin: Springer.

REFA. (1991). *Grundlagen der Arbeitsgestaltung. Methodenlehre der Betriebsorganisation* (1. Auflage). München: Hanser.

REFA. (1993). *Grundlagen der Arbeitsgestaltung*. München: Hanser.

REFA. (2013). *REFA Kompakt-Grundausbildung 2.0 - Das Basis-Know-How in Industrial Engineering: Band 1*. Weinheim: Diesbach.

REFA. (2015). *Industrial Engineering. Standardmethoden zur Produktivitätssteigerung und Prozessoptimierung* (2. Auflage). München: Hanser.

- REFA. (2016). *REFA Kompakt-Grundausbildung 2.0. Das Basis-Know-how in Industrial Engineering* (2. Auflage). Darmstadt.
- Reinhart, G. (1988). *Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Reinhart, G. (1999). *Stückzahlflexible Montage- und Logistiksysteme. Integrierte Planung kapazitätsflexibler Systeme*.
- Reinhart, G. (2003). *Stückzahl- und Variantenflexible Montage - eine ganzheitliche Aufgabe* (H.-P. Wiendah, Hrsg.). Hannover.
- Ripploh, A. (2019). *Anschlussvorrichtung (EP000003764486A1)*.
- Ross, P. (2002). *Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung*. Forschungsbericht (Bd. 170). München.
- Rother, M. & Harris, R. (2001). *Creating continuous flow. An action guide for managers, engineers and production associates*. Brookline, Mass.: Lean Enterprise Institute.
- Roulet-Dubonnet, O., Sandøy, R. K. & Schulte, K. Ø. (2018). Case study: Application of Design for Automated Assembly methods in the development of an electronic product from early design to design freeze. *Procedia CIRP*, 70, 192–197. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.02.017>
- Scarr, A. J. & McKeown, P. A. (1986). Product Design for Automated Manufacture and Assembly. *CIRP Annals*, 35(1), 1–5. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)61826-5](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)61826-5)
- Schlaich, G. (1988). *Kabelbaummontage mit Industrierobotern*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Schlick, C., Bruder, R. & Luczak, H. (2018). *Arbeitswissenschaft* (4. Aufl. 2018). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1521821>
- Schuh, G. & Gottschalk, S. (2004). Skalierbare Produktionslinien in der Automobilindustrie. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 99(7-8), 376–380. <https://doi.org/10.3139/104.100793>
- Schuster, G. (1992). *Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Schwarzer, C. (2018). *Ladeinfrastruktur: So lädt Deutschland bis 2025*. Verfügbar unter: <https://www.electrive.net/2018/02/26/ladeinfrastruktur-so-laedt-deutschland-bis-2025/>
- Selevsek, N. & Köhler, C. (2018). Angepasste Planungssystematik für MRK-Systeme. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, (1-2), 55–58. Verfügbar unter: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.3139/104.111865/html>
- Shehab, E. M. & Abdalla, H. S. (2006). A Cost-Effective Knowledge-Based Reasoning System for Design for Automation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(5), 729–743. <https://doi.org/10.1243/095440554JEM298>
- Slama, S. & Bauer, S. (2004). Planungsleitfaden zur Auslegung hybrider Montagesysteme. In K. Feldmann (Hrsg.), *Montage strategisch ausrichten. Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen* (Engineering online library, S. 171–200). Berlin: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-18742-1\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18742-1_13)

- Spies, S., Bartelt, M. & Kuhlenkotter, B. (2019). Wiring of Control Cabinets using a Distributed Control within a Robot-Based Production Cell. In *2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*. IEEE.
- Spillner, R. (2015). *Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion* (Forschungsberichte IWB, Bd. 296). München: Utz, Herbert.
- Stegmüller, D. & Zürn, M. (2014). Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft. In T. Bauernhansl, M. ten Hompel & B. Vogel-Heuser (Hrsg.), *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration* (S. 103–119). Wiesbaden: Springer Vieweg. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-04682-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-658-04682-8_5)
- Synnes, E. L. & Welø, T. (2015). Design for Automated Assembly of Large and Complex Products: Experiences from a Marine Company Operating in Norway. *Procedia Computer Science*, 44, 254–265. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.052>
- Szajna, A., Stryjski, R., Woźniak, W., Chamier-Gliszczyński, N. & Kostrzewski, M. (2020). Assessment of Augmented Reality in Manual Wiring Production Process with Use of Mobile AR Glasses. *Sensors*, 20(17). <https://doi.org/10.3390/s20174755>
- VDI 2221 (Hrsg.). (1993). *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*.
- Westkämper, E. (2006). *Einführung in die Organisation der Produktion* (SpringerLink Bücher). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-30764-8>
- Westkämper, E., Spath, D., Constantinescu, C. & Lentes, C. (2013). *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Schlussbericht des Verbundes SimUltane Produkt- und Prozessentwicklung eines automatisierungsgerechten Ladestation-Outlet-Moduls (SUPPLY)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse Simon Fröhlig, M.Sc. Florian Hoffmann, M.Sc.	5. Abschlussdatum des Vorhabens 12.2023  6. Veröffentlichungsdatum 03.2024  7. Form der Publikation -
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik Egerlandstraße 7, 91058 Erlangen  Technische Universität Dortmund Institut für Produktionssysteme Leonhard-Euler-Str. 5, 44227 Dortmund	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -  10. Förderkennzeichen 01MV19001BC  11. Seitenzahl 92
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin	13. Literaturangaben 83  14. Tabellen 10  15. Abbildungen 62
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	
18. Kurzfassung Die Elektromobilität ist eine Schlüsseltechnologie der Zukunft, steckt jedoch noch in einer Vor-Marktphase. Die Herstellung von Ladestationen für Elektrofahrzeuge ist derzeit noch von manuellen Prozessen geprägt, ineffizient und teuer. Das physische Design und die eingesetzten Montagetechnologien sind dabei noch nicht für eine vollständige Automatisierung geeignet. Zudem ist die Marktnachfrage noch nicht hoch genug, um eine wirtschaftlich rentable vollautomatisierte Produktion zu ermöglichen. Daher zielt das Forschungsvorhaben SUPPLY darauf ab, die Produktionsprozesse für Ladestationen zu automatisieren, um die Herstellungskosten zu senken und die Effizienz zu steigern. Dies soll durch ein modulares, automatisierungsgerechtes Produktdesign und einen skalierbaren Fertigungsprozess erreicht werden. Das Hauptziel besteht darin, ein automatisierungsgerechtes Outletmodul zu entwickeln, dessen Herstellung skalierbar und zukunftsfähig gestaltbar ist. Das Forschungsvorhaben umfasst die Analyse bestehender manueller Produktionsprozesse, die Entwicklung eines Referenzplanungsprozesses für die digitale Produktentwicklung und Montage, die technische Spezifikationen und Entwicklung eines automatisierungsgerechten Ladestationsmodul. Dabei werden kritische Kernprozesse der Montage prototypisch untersucht und die gesamte Produktionslinie mittels Methoden der digitalen Fabrik abgesichert und im virtuellen Raum abgebildet. Das Ergebnis des Projekts umfasst neben dem Muster eines automatisierungsrechten Outletmoduls sowohl einen Referenzplanungsprozess dokumentiert in einem VDMA-Einheitsblatt als auch mehrere Demonstratoren, die die technische Umsetzbarkeit unterschiedlicher, automatisierter Montageprozesse für Ladestationen nachweisen. Darüber hinaus erfolgte die digitale Planung einer skalierbaren Produktionslinie auf Basis einer Flexible Manpower Line in einer U-Shape-Anordnung. Die Umsetzung der Automatisierungsgerechtigkeit zeigte einen Trend zum Einsatz von Platinentechnologie und der Reduktion von flexiblen Kabeln. Durch die Manifestierung in Designregeln, lassen sich die Erkenntnisse auf mechatronische Produkte übertragen.	
19. Schlagwörter Ladeinfrastruktur, Produktion, Automatisierung, Handhabung, Planungssystematik	
20. Verlag -	21. Preis -

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Final report of the consortium SimUltane Produkt- und Prozessentwicklung eines automatisierungsgerechten Ladestation-Outlet-Moduls (SUPPLY)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse Simon Fröhlig, M.Sc. Florian Hoffmann, M.Sc.	5. end of project 12.2023
	6. publication date 03.2024
	7. form of publication -
8. performing organization(s) (name, address) Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik Egerlandstraße 7, 91058 Erlangen  Technische Universität Dortmund Institut für Produktionssysteme Leonhard-Euler-Str. 5, 44227 Dortmund	9. originator's report no. -
	10. reference no. 01MV19001BC
	11. no. of pages 92
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin	13. no. of references 83
	14. no. of tables 10
	15. no. of figures 62
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date) -	
18. abstract Electromobility is a key technology of the future, but is still in a pre-market phase. The production of charging stations for electric vehicles is currently still characterized by manual processes, inefficient and expensive. The physical design and the assembly technologies used are not yet suitable for full automation. In addition, market demand is not yet high enough to enable economically viable, fully automated production. The SUPPLY research project therefore aims to automate the production processes for charging stations in order to reduce manufacturing costs and increase efficiency. This is to be achieved through a modular, automation-oriented product design and a scalable manufacturing process. The main objective is to develop an outlet module that is suitable for automation and whose production is scalable and future-proof. The research project includes the analysis of existing manual production processes, the development of a reference planning process for digital product development and assembly, the technical specifications and development of an automation-compatible charging station module. Critical core assembly processes will be examined as prototypes and the entire production line will be validated using digital factory methods and mapped in virtual space. In addition to the sample of an outlet module with automation rights, the results of the project include a reference planning process documented in a VDMA standard sheet as well as several demonstrators that prove the technical feasibility of different automated assembly processes for charging stations. In addition, the digital planning of a scalable production line based on a Flexible Manpower Line in a U-shape arrangement was carried out. The implementation of automation compatibility showed a trend towards the use of circuit board technology and the reduction of flexible cables. By manifesting this in design rules, the findings can be transferred to mechatronic products.	
19. keywords Charging infrastructure, production, automation, handling, planning methodology	
20. publisher -	21. price -