

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
TUM School of Engineering and Design

Automatisierte Layoutplanung von Montagelinien

Daria Franziska Leiber

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktorin der Ingenieurwissenschaften
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub
Prüfer*innen der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser

Die Dissertation wurde am 01.12.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die School of Engineering and Design am 15.05.2023 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	i
Formelzeichen	iii
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Ziel der Arbeit.....	1
1.2 Wissenschaftstheoretische Einordnung und Forschungsmethodik	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen und Methoden	7
2.1 Montageplanung.....	7
2.1.1 Einordnung und Untergliederung.....	7
2.1.2 Arbeitsinhalte und Planungsphasen	8
2.2 Optimierung.....	10
2.2.1 Evolutionäre Algorithmen	11
2.2.2 Bilevel-Optimierung	13
3 Stand des Wissens.....	15
3.1 Modellierung im Kontext der Montageplanung.....	15
3.1.1 Modellierung von Produkten.....	17
3.1.2 Modellierung von Prozessen	17
3.1.3 Modellierung von Ressourcen	19
3.1.4 Modellierung von Fähigkeiten.....	21
3.2 Eignungsüberprüfung von Ressourcen.....	22
3.3 Austaktung von Montagelinien.....	23
3.4 Planung des räumlichen Layouts.....	27
3.4.1 Planung von Roboterzellen	28
3.4.2 Positionierung von optischen Sensoren.....	29
3.5 Zusammenfassung und Bewertung	31
4 Zielsetzung, Lösungskonzept und Publikationen	33
4.1 Definition von Teilzielen.....	33
4.2 Konzept des Planungssystems und Einordnung der eigenen Publikationen	36
4.3 Individuelle Leistungsbeiträge der Autorin	38

5	Veröffentlichung 1 – Informationsmodell	39
6	Veröffentlichung 2 – Ablauf der Layoutplanung	41
6.1	Veröffentlichung 3 – Erstellung des Strukturlayouts.....	43
6.2	Veröffentlichung 4 – Anordnung der Ressourcen	45
7	Veröffentlichung 5 – Bewertung der Wirtschaftlichkeit.....	47
8	Themenübergreifende Diskussion und Reflexion.....	49
8.1	Erfüllung der Teilziele	49
8.2	Bewertung der Ergebnisse	50
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	53
9.1	Zusammenfassung.....	53
9.2	Ausblick.....	53
10	Literaturverzeichnis	55

Abkürzungsverzeichnis

ALB	Assembly Line Balancing
AutomationML	Automation Markup Language
CAD	Computer Aided Design
CAEX	Computer Aided Engineering Exchange
COLLADA	COLLABorative Design Activity
DIN	Deutsches Institut für Normung
DR	Design Research
DRM	Design Research Methodology
DS-I	Descriptive Study I
DS-II	Descriptive Study II
EN	Europäische Norm
FLP	Facility Layout Problem
IEC	International Electrotechnical Commission
IFR	International Federation of Robotics
ISO	International Organization for Standardization
<i>max</i>	maximiere
<i>min</i>	minimiere
MVG	Montagevorranggraph
NP	non-deterministic polynomial-time
PAS	Publicly Available Specification
PLC	Programmable Logic Controller
PPR	Produkt-Prozess-Ressourcen
PPRS	Produkt-Prozess-Ressourcen-Skills
PS	Prescriptive Study
RC	Research Clarification
ROI	Region of Interest
SFC	Sequential Function Chart
STEP	STandard for the Exchange of Product model data
UML	Unified Modeling Language

VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VR	Virtual Reality
XML	Extensible Markup Language
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie

Formelzeichen

f	Zielfunktion eines Optimierungsproblems
S	Suchraum eines Optimierungsproblems
n	Anzahl der Dimensionen des Suchraums eines Optimierungsproblems
Z	Zielraum eines Optimierungsproblems
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen
\vec{x}	Argumente eines Optimierungsproblems
g_j	Rand- und Nebenbedingungen eines Optimierungsproblems ($j = 1, \dots, k$)
k	Anzahl der Bedingungen eines Optimierungsproblems
G	durch Bedingungen eingeschränkter Suchraum eines Optimierungsproblems
\vec{c}	Koeffizienten eines linearen Optimierungsproblems
\mathbb{Z}	Menge der ganzen Zahlen
Q	Genotyp eines Lösungskandidaten in einem genetischen Algorithmus
dec	Dekodierungsfunktion zur Abbildung des Genotyps in den Suchraum
F	induzierte Gütefunktion eines genetischen Algorithmus
o	Index für das äußere („outer“) Problem eines zweistufigen Optimierungsproblems
i	Index für das innere („inner“) Problem eines zweistufigen Optimierungsproblems
w	Zielfunktionswert des inneren Problems eines zweistufigen Optimierungsproblems
k_{ges}	Gesamtkosten einer geplanten Linie
k_{pos}	Kosten für die Positionierung der Ressourcen in einer Linie
k_{pos_min}	minimale Kosten für die Positionierung der Ressourcen in einer Linie



1 Einleitung

1.1 Motivation und Ziel der Arbeit

Der Maschinen- und Anlagenbau war mit einem Umsatz von 203,5 Milliarden Euro im Jahr 2020 der zweitgrößte Industriezweig nach der Automobilproduktion. Bei der Anzahl der Beschäftigten liegt er mit über einer Million Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmern sogar auf dem ersten Platz. (ZVEI 2021) Zwischen 2013 und 2019 sind die Umsätze im deutschen Maschinenbau kontinuierlich gestiegen. Die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate während dieser Zeit betrug 1,76 %. Die Gesamtanzahl der Beschäftigten im Maschinenbau hat während dieses Zeitraums um 1,26 % jährlich zugenommen, die der Ingenieurinnen und Ingenieure um 1,47 %. (VDMA 2014, S. 6, 2019, S. 2, 2021, S. 13) Für die nächsten Jahre wird weiteres Umsatzwachstum prognostiziert (STATISTA 2020, S. 19) und auch der Bedarf an Ingenieurinnen und Ingenieuren wird weiter steigen (VDMA 2019). Allerdings berichten bereits heute 42,1 % der Ingenieurbüros von Einschränkungen im Geschäftsbetrieb aufgrund eines Mangels an Fachkräften (KFW RESEARCH 2021).

Parallel zu diesen Entwicklungen ist der globale Markt für automatisierungstechnische Komponenten (exklusive Roboter) zwischen 2016 und 2019 jährlich um 3 % gewachsen und es wird eine Fortsetzung dieser Entwicklung erwartet (UBS 2020). Auch die Verbreitung von Industrierobotern nimmt kontinuierlich zu. Die Anzahl der weltweit jährlich neu installierten Roboter stieg von 2016 bis 2019 sogar um durchschnittlich 7,06 % (INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS 2020). Für die Jahre 2020 bis 2027 werden jährliche Wachstumsraten des Industrierobotermarktes von im Mittel 12,5 % prognostiziert (STATISTICS 2020). Diese Zahlen zeigen, dass die Verbreitung automatisierter Systeme zunimmt. Ein Teil dieser Systeme kommt in der Montage zum Einsatz (INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS 2020). Häufig handelt es sich dabei um Montagelinien, an denen das Produkt in einem festgelegten Takt von einer Station zur nächsten befördert wird (BOYSEN ET AL. 2008, S. 509-510). Werden solche Linien neu geplant, müssen viele Planungsentscheidungen, wie die Auswahl geeigneter Ressourcen und die Definition des Layouts, getroffen werden (BULLINGER 1986). Diese Entscheidungen sind komplex und bestimmen die Eigenschaften der geplanten Linie. Sie müssen daher von Personen mit geeigneter Expertise getroffen werden, was zu hohen personellen Aufwänden in der Montageplanung führt.

Insbesondere für Unternehmen in Ländern mit hohem Lohnniveau sind solche Aufwände ein Wettbewerbsnachteil. Bereits innerhalb der Europäischen Union gibt es im Bereich Maschinenbau große Unterschiede bei den Arbeitskosten pro Stunde. Sie reichen von 11 Euro in

Polen bis zu 48 Euro in Dänemark. Die Kosten in Deutschland liegen mit 46 Euro im oberen Bereich (VDMA 2021, S. 19).

Automatisierungsansätze im Bereich der Montageplanung sind eine vielversprechende Möglichkeit, den beschriebenen Herausforderungen zu begegnen (Abbildung 1-1). Sie können die benötigte Arbeitszeit für die Planung reduzieren und so zum einen die Auswirkungen des Fachkräftemangels mildern, zum anderen aber auch wirtschaftliche Vorteile, insbesondere in Hochlohnländern wie Deutschland, bieten.

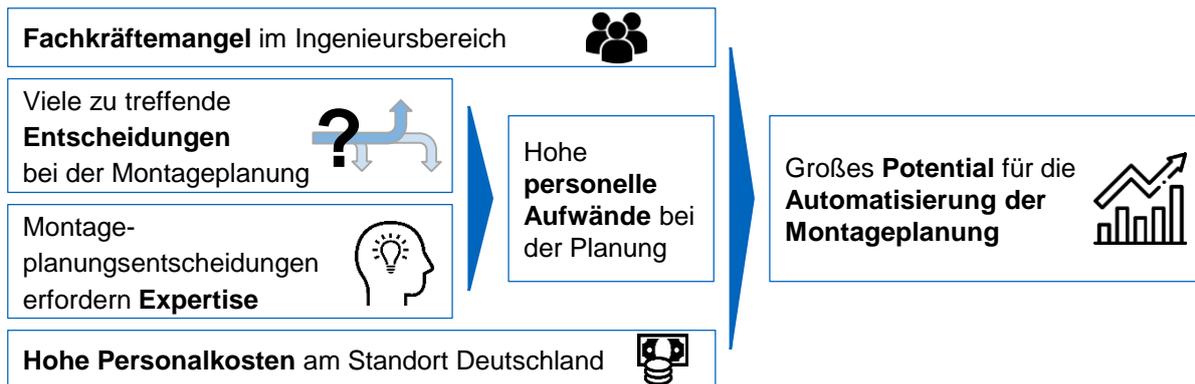


Abbildung 1-1: Motivation für die Automatisierung der Montageplanung

Der Bedarf für software- und simulationsbasierte Unterstützungssysteme im Bereich der Montageplanung wird auch von Expertinnen und Experten aus der Praxis bestätigt (ZIMMERMANN ET AL. 2019; RÖHLER ET AL. 2019). Insbesondere in den beiden umsatzstärksten deutschen Industriezweigen, der Automobilindustrie sowie dem Maschinen- und Anlagenbau, wird das Potenzial solcher automatisierter Planungsmethoden betont (ERDOGAN 2019; FREITAG 2019; MÜLLER 2019). In der Automobilindustrie erhöhen derartige Planungssysteme die Flexibilität in der Produktion (ERDOGAN 2019), während sie bei den Herstellern von Sondermaschinen die Realisierungszeiten verkürzen und die Kommunikation mit den Auftraggebern vereinfachen (FREITAG 2019; MÜLLER 2019).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Verringerung der manuellen Aufwände bei der Planung neuer Montagelinien für die variantenreiche Serienmontage durch den Einsatz von Algorithmen für die Automatisierung von Planungsentscheidungen. Dazu wird eine Methode zur automatisierten Layoutplanung von Montagelinien erstellt und zur Validierung prototypisch in Form einer Software umgesetzt. Der Betrachtungsbereich umfasst alle Schritte, um vom definierten Montageprozess eines Produkts zu einem dreidimensionalen Modell der geplanten Linie zu gelangen. Das beinhaltet die Auswahl geeigneter Produktionsressourcen, die Zuordnung von Prozessschritten zu Stationen sowie die räumliche Anordnung der Ressourcen.

1.2 Wissenschaftstheoretische Einordnung und Forschungsmethodik

Zur Planung des wissenschaftlichen Vorgehens ist die Art des Forschungsvorhabens entscheidend. Nach ULRICH & HILL (1976) lassen sich wissenschaftliche Arbeiten und Fragestellungen verschiedenen Kategorien zuordnen. Die erste getroffene Unterscheidung in der von ihnen vorgestellten Systematik ist die Einteilung in Formal- und Realwissenschaften. Während die Formalwissenschaften (zum Beispiel Philosophie, Mathematik oder Logik) sich mit Zeichensystemen und deren Verwendung befassen, beschäftigen sich die Realwissenschaften mit der Beschreibung, Erklärung und Gestaltung von Wirklichkeitsausschnitten. In dieser Unterteilung ist die vorliegende Arbeit den Realwissenschaften zuzuordnen, da Montagelinien und deren Planung einen empirisch wahrnehmbaren Untersuchungsgegenstand darstellen.

ULRICH & HILL (1976) untergliedern die Realwissenschaften nach Zielsetzung weiter in Grundlagenwissenschaften und angewandte Wissenschaften. Die Grundlagenwissenschaften sind dabei deskriptiv ausgerichtet und haben die Beschreibung und Erklärung von komplexen Systemen und Zusammenhängen als Ziel. Ziel der angewandten Wissenschaften ist dagegen die aktive Gestaltung sozialer und technischer Systeme; ihre Ausrichtung ist präskriptiv.

Eine Form der angewandten Wissenschaften ist die Design Research (DR, deutsch: Gestaltungswissenschaft). In DR-Forschungsprojekten werden, basierend auf Modellen der Realität, Unterstützungssysteme für die Gestaltung von Produkten entworfen. Die konkrete Ausgestaltung dieser Unterstützungssysteme ist dabei vielfältig. Beispielsweise können Methoden, Gleichungen oder Richtlinien entwickelt und in Form von Software oder Checklisten zur Verfügung gestellt werden. (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 1-12, 2009, S. 42)

BLESSING & CHAKRABARTI (2009, S. 14-17) schlagen eine vierstufige Methodik, die Design Research Methodology (DRM, deutsch: Gestaltungswissenschaftsmethodik), für die Untersuchung von Fragestellungen aus dem Bereich DR vor (Abbildung 1-2).

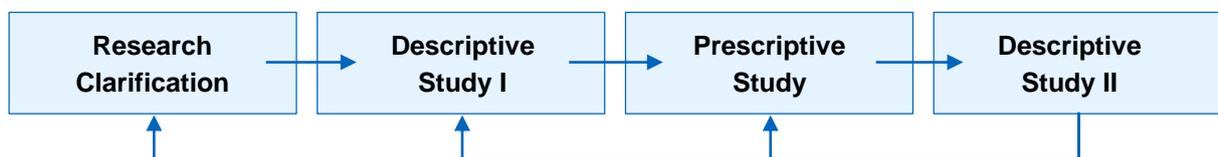


Abbildung 1-2: Schritte der DRM nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009, S. 15)

Die DRM beginnt mit dem Schritt der *Research Clarification* (RC, deutsch: Definition des Forschungsziels), in dem die Problem- und Zielstellung des Forschungsvorhabens herausgearbeitet und Kriterien für die Evaluation der Forschungsergebnisse abgeleitet werden. In der darauffolgenden *Descriptive Study I* (DS-I, deutsch: deskriptive Studie I) wird der Ausgangs-

zustand untersucht. Ziel ist es dabei, den bestehenden Handlungsbedarf zu identifizieren. Darauf aufbauend wird in der *Prescriptive Study* (PS, deutsch: präskriptive Studie) der Zielzustand genauer beschrieben und ein Unterstützungssystem entwickelt, um diesen Zustand zu erreichen. Abschließend wird in der *Descriptive Study II* (DS-II, deutsch: deskriptive Studie I) evaluiert, welche Auswirkungen die Nutzung des Unterstützungssystems hat und inwieweit damit der angestrebte Zustand realisiert werden konnte. Die einzelnen Phasen der Methodik müssen in der Realität jedoch nicht streng nacheinander durchlaufen werden, sondern auch Iterationen und Parallelisierungen sind möglich. (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 14-17)

Je nach Fokus eines Forschungsvorhabens und Umsetzung der einzelnen Schritte definieren BLESSING & CHAKRABARTI (2009, S. 18-19, 2009, S. 60-63) verschiedene Typen von DR-Projekten. Die Auswahl eines Projekttyps ist dabei Teil der RC.

Die vorliegende Dissertation ist in der Kategorisierung nach ULRICH & HILL (1976) den angewandten Wissenschaften zuzuschreiben. Ihr Ziel ist die Automatisierung der Layoutplanung von Montagelinien, was nicht nur eine Untersuchung und Beschreibung der wahrnehmbaren Wirklichkeit, sondern auch deren aktive Gestaltung impliziert. Da zur Erreichung des Zielzustandes ein Unterstützungssystem für die Gestaltung eines Produkts (der Montagelinien) entworfen wird, handelt es sich um eine DR-Fragestellung, und die DRM ist als Forschungsmethodik geeignet.

Aus den von BLESSING & CHAKRABARTI (2009, S. 60-63) definierten Projekttypen wurde der Typus *Development of Support* (deutsch: Entwicklung eines Unterstützungssystems) ausgewählt. Dieser Projekttyp bietet sich an, wenn für die betrachtete Problemstellung entweder noch keine Unterstützungssysteme existieren oder diese den bestehenden Bedarf nicht angemessen adressieren. In einem solchen Projekt erfolgt die DS-1 basierend auf der vorhandenen Literatur, die PS mit der Entwicklung des Unterstützungssystems steht im Fokus und in der DS-2 werden die Ergebnisse zur Vorbereitung einer weiteren Nutzung initial bewertet.

In der vorliegenden Arbeit werden die einzelnen Schritte der DRM mehrfach iterativ durchlaufen. Zum einen wird die DRM für die Entwicklung des gesamten Unterstützungssystems, der Methode zur automatisierten Layoutplanung von Montagelinien, genutzt. Zum anderen wird die DRM aber auch zur Ausgestaltung verschiedener Teile des Gesamtsystems angewendet.

1.3 Aufbau der Arbeit

Das gewählte iterative Forschungsvorgehen spiegelt sich im Aufbau der vorliegenden Arbeit wider. Diese besteht aus neun Kapiteln. Abbildung 1-3 zeigt die Zuordnung der Kapitel zu den Phasen der DRM. Kapitel 1 bis 4 und 7 bis 9 beschreiben die Erstellung und Evaluation des Gesamtsystems. In den in Kapitel 5 und 6 eingebundenen Veröffentlichungen wird jeweils ein

Teilaspekt der Methode zur automatisierten Layoutplanung von Montagelinien betrachtet und für diesen die DRM durchlaufen.

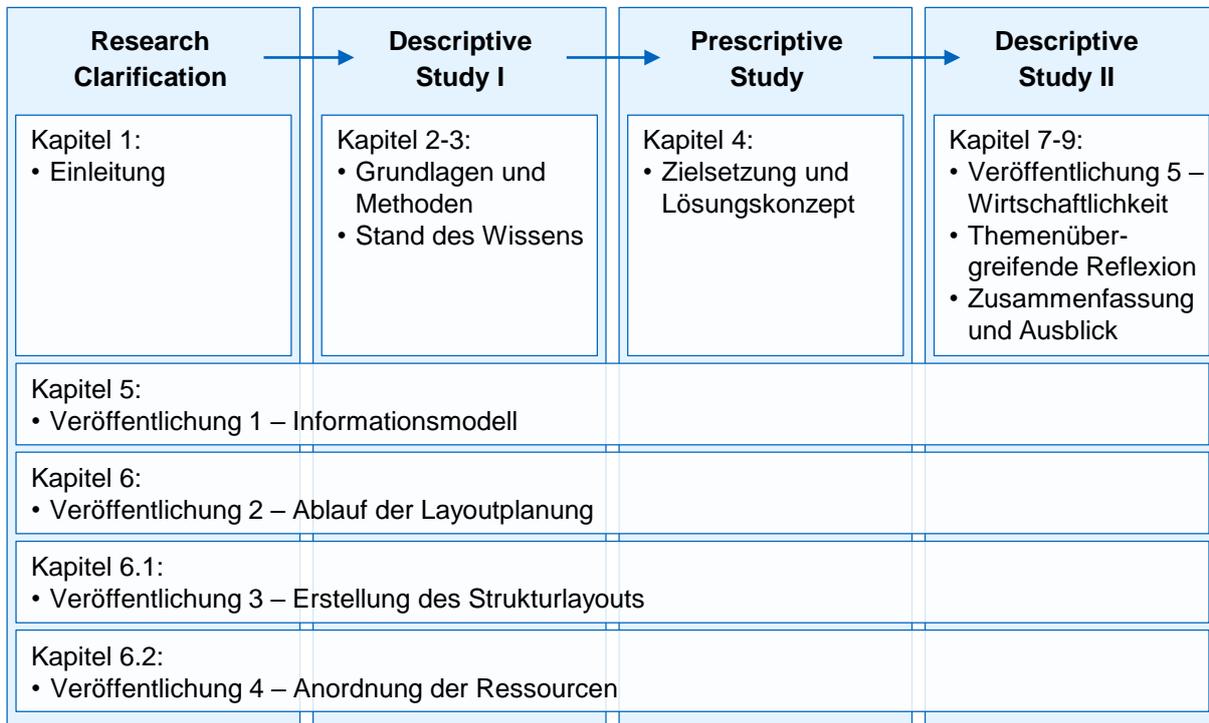


Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit

Die Arbeit beginnt mit der *Einleitung*, in der die Motivation und die Zielsetzung, die wissenschaftstheoretische Einordnung und Forschungsmethodik sowie der Aufbau der Arbeit beschrieben werden. In der DRM entspricht dies dem Schritt der RC.

In Kapitel 2 werden die zum Verständnis notwendigen *Grundlagen und Methoden* aus den Bereichen Montageplanung und Optimierung erläutert. Der *Stand des Wissens* in Kapitel 3 beschreibt bestehende Ansätze, um die Anlagenplanung zu automatisieren beziehungsweise durch Softwarewerkzeuge zu unterstützen. Dies entspricht der literaturbasierten DS-1, die im gewählten DR-Projekttyp vorgesehen ist.

Darauf aufbauend wird in Kapitel 4 die *Zielsetzung* spezifiziert und der entworfene *Lösungsansatz* vorgestellt. Dazu werden Teilziele definiert (Abschnitt 4.1) und die verschiedenen Teile des Systems sowie deren Zusammenwirken beschrieben (Abschnitt 4.2 und Abbildung 4-2). Diese Systemteile werden in den folgenden Kapiteln genauer untersucht. Kapitel 4 entspricht der PS des Gesamtsystems.

Da es sich bei der vorliegenden Arbeit um eine publikationsbasierte Dissertation handelt, werden die Forschungsergebnisse in den darauffolgenden Kapiteln 5 bis 7 durch fünf eingebundene Veröffentlichungen dargestellt. In Kapitel 5 wird das der Planung zugrunde liegende *In-*

formationsmodell beschrieben, bevor in Kapitel 6 der *Ablauf der Layoutplanung* mit der *Erstellung des Strukturlayouts* und der *Anordnung der Ressourcen* im Raum präsentiert wird. Dabei umfasst jede der Publikationen in den Kapiteln 5 und 6 einen gesamten Durchlauf durch die DRM, um das jeweils adressierte Teilziel zu erreichen.

Kapitel 7 befasst sich mit der *Bewertung der Wirtschaftlichkeit* des Planungssystems. Auch dies geschieht in Form einer eingebundenen Veröffentlichung, die der DRM-Phase der DS-II zuzuordnen ist. Sie untersucht, inwieweit der angestrebte Zielzustand einer Reduktion der manuellen Aufwände bei der Planung neuer Montagelinien durch den Einsatz des erstellten Unterstützungssystems erreicht werden kann.

Auch Kapitel 8, in dem die Ergebnisse *themenübergreifend diskutiert und bewertet* werden, sowie Kapitel 9, das die Arbeit mit einer *Zusammenfassung* und einem *Ausblick* abschließt, sind der DS-II zuzuordnen.

2 Grundlagen und Methoden

In diesem Kapitel erfolgt eine Einführung in die Themengebiete Montageplanung (Abschnitt 2.1) und Optimierung (Abschnitt 2.2). Die Ausführungen sind auf die zum Verständnis der weiteren Arbeit notwendigen Fachgebiete beschränkt. Neben den im Folgenden erläuterten Grundlagen und Methoden werden Kenntnisse der Mathematik und Produktionstechnik vorausgesetzt.

2.1 Montageplanung

Die Montage ist der letzte Schritt der Herstellung, bevor ein Produkt an den Kunden geliefert wird. Sie umfasst alle Vorgänge, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern zu einem Produkt oder einer Baugruppe höherer Komplexität dienen (WARNECKE ET AL. 1975). Die Montageplanung beschäftigt sich mit der Erstellung von Lösungen für konkrete Montageaufgaben, also damit, wie bestimmte Bauteile und -gruppen unter gegebenen Randbedingungen zu einer Baugruppe höherer Ordnung oder einem funktionsfähigen Produkt kombiniert werden können (SCHÄFER 1992, S. 10).

2.1.1 Einordnung und Untergliederung

Die Montageplanung (Abbildung 2-1) ist Teil der Arbeitsplanung (SCHÄFER 1992, S. 9) und damit der Arbeitsvorbereitung, die alle Tätigkeiten umfasst, die zwischen der Konstruktion und der Produktion eines Produktes liegen (EVERSHEIM 2002, S. 3).

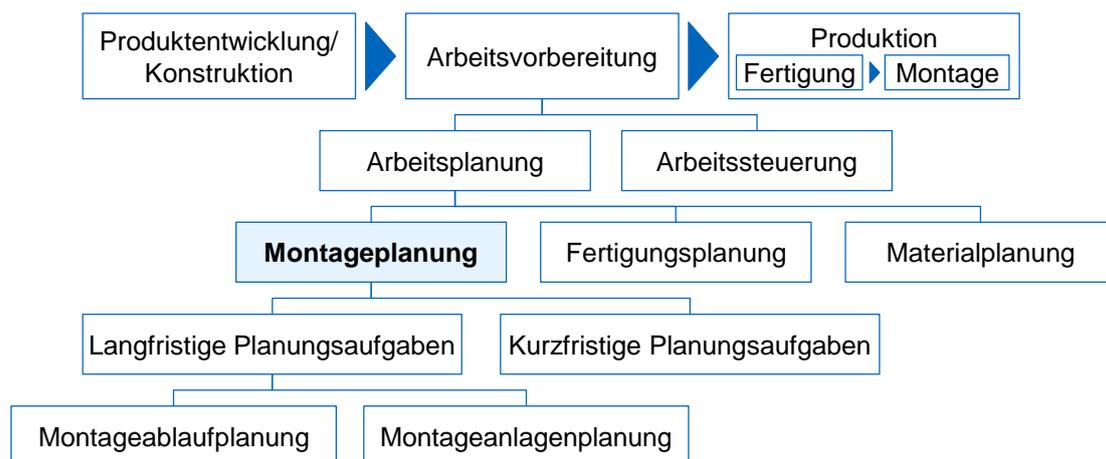


Abbildung 2-1: Einordnung und Untergliederung der Montageplanung nach FELDMANN (1997, S. 8) und EVERSHEIM (2002, S. 57)

Die Montageplanung beinhaltet die langfristige technische Planung sowie die kurzfristige Auftragsplanung. Die technische Planung lässt sich in die beiden Teilbereiche Montageablaufplanung und Montageanlagenplanung untergliedern. Aufgabe der Montageablaufplanung ist es, aus einer Beschreibung der Montageaufgabe in Form von Stücklisten und Zusammenbauzeichnungen die optimale Montagereihenfolge abzuleiten und die benötigten Montageprozesse zu planen. Die Montageanlagenplanung befasst sich dagegen mit Auswahl, Konfiguration, Konstruktion und Anordnung von für die Montage benötigten Betriebsmitteln. (EVERSHEIM 2002, S. 57-61)

2.1.2 Arbeitsinhalte und Planungsphasen

In der Literatur existieren zahlreiche ähnliche Vorgehensweisen zur Montageplanung, die genauen Arbeitsinhalte der einzelnen Planungsphasen sind jedoch nicht einheitlich definiert (FELDMANN 1997, S. 10).

Klassische Vorgehensmodelle für die Montageplanung präsentieren beispielsweise BULLINGER (1986), LOTTER (1992), MILBERG ET AL. (1999, S. 153-181) und KONOLD & REGER (2003, S. 32-33). Sie beschreiben eine Abfolge verschiedener Planungsschritte, um die Montage eines neuen Produktes zu planen sowie ein passendes Montagesystem zu entwickeln, zu realisieren und schließlich in Betrieb zu nehmen. Die anfallenden Arbeitsinhalte lassen sich zusammenfassend den Planungsphasen *Anforderungsanalyse*, *Strukturplanung*, *Systemausarbeitung* sowie *Realisierung und Betrieb* zuordnen (Abbildung 2-2).

Während der *Anforderungsanalyse* werden die Randbedingungen der Planungsaufgabe beleuchtet, die Planungsziele definiert sowie ein Zeitplan und ein Budget für die Durchführung festgelegt. Auch erste Analysen des zu montierenden Produkts finden statt. (BULLINGER 1986; LOTTER 1992; MILBERG ET AL. 1999, S. 153-181; KONOLD & REGER 2003, S. 32-33)

Zur *Strukturplanung* gehören alle Planungsaktivitäten, um ausgehend von Produktdaten wie Stücklisten, Funktionsbeschreibungen, Zusammenbauzeichnungen oder Computer-Aided-Design-(CAD-)Modellen ein Strukturlayout der Montageanlage zu generieren. Dieses beinhaltet die Technologieauswahl, die Kapazitätsplanung, die Zuordnung der durchzuführenden Montageprozesse zu den geplanten Montagestationen sowie deren Verknüpfung in Bezug auf den Materialfluss (BULLINGER 1986; LOTTER 1992; MILBERG ET AL. 1999, S. 153-181; KONOLD & REGER 2003, S. 32-33) In dieser Planungsphase kommt häufig ein Montagevorranggraph (MVG) zum Einsatz, in dem die existierenden Vorrangbeziehungen, alternative Abläufe oder parallel durchführbare Vorgänge bei der Montage des Produkts abgebildet werden (EVERSHEIM 2002, S. 57-61).

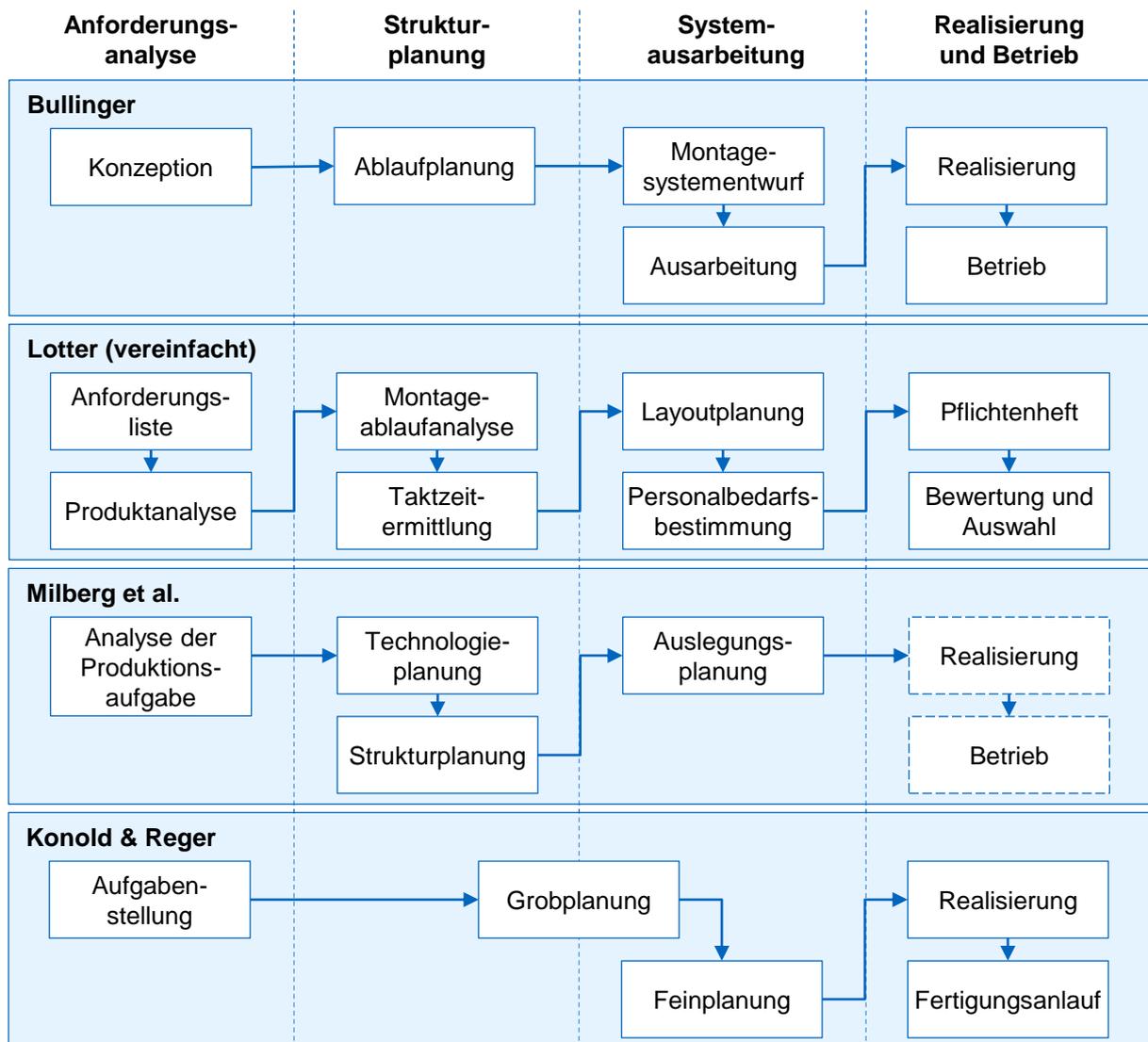


Abbildung 2-2: Planungsvorgehen nach BULLINGER (1986), LOTTER (1992), MILBERG ET AL. (1999, S. 153-181) und KONOLD & REGER (2003)

Anschließend werden in der *Systemausarbeitung* kritische Prozesse abgesichert, das Layout der Anlage geplant, die Betriebsmittel der einzelnen Stationen ausgewählt und angeordnet sowie der Personalbedarf der Linie ermittelt. Die Phase der *Realisierung* und des *Betriebs* umfasst schließlich alle Tätigkeiten für den physischen Aufbau der Anlage sowie deren Inbetriebnahme inklusive der Ableitung von Erkenntnissen für zukünftige Planungsprojekte („Lessons Learned“) und einer Nachkalkulation (BULLINGER 1986; LOTTER 1992; MILBERG ET AL. 1999, S. 153-181; KONOLD & REGER 2003, S. 32-33)

Heute wird die Montageplanung im Sinne des Simultaneous Engineering häufig schon parallel zum Produktentwicklungsprozess durchgeführt (BOCHTLER ET AL. 1995). Insbesondere bei Zu-

liefererfirmen, die nicht an der Produktentwicklung ihrer Kunden beteiligt sind, ist die Montageplanung auf Basis eines fertig konstruierten Produkts jedoch eine typische Situation (FELDMANN 1997, S. 9; MÜLLER 2019).

2.2 Optimierung

Verschiedene Entscheidungen, die während der Montageplanung getroffen werden, können mathematisch als Optimierungsproblem formuliert werden. Beispiele dafür sind die Taktzeitermittlung (BECKER & SCHOLL 2006) und die Anordnung verschiedener Bereiche in einer Fabrikhalle (DRIRA ET AL. 2007).

Die Optimierungsparameter \vec{x} repräsentieren dabei die Freiheitsgrade einer Entscheidung (zum Beispiel die Zuordnung von Prozessschritten zu Stationen oder die Positionierung eines Fertigungsbereichs) und die Zielfunktion $f(\vec{x})$ beschreibt deren Zusammenhang mit der relevanten, zu optimierenden Größe (zum Beispiel Taktzeit/Stationsanzahl einer Linie oder insgesamt benötigte Fläche).

Bei der Lösung eines Optimierungsproblems im mathematischen Sinne werden dann jene \vec{x} gesucht, bei denen der Wert einer Zielfunktion $f(\vec{x})$ minimal oder maximal ist. Die Zielfunktion ist dabei als Abbildung

$$f(\vec{x}) : \mathcal{S} \rightarrow \mathcal{Z} \quad (1)$$

aus dem Suchraum $\mathcal{S} \subseteq \mathbb{R}^n$ in den Zielraum $\mathcal{Z} \subseteq \mathbb{R}$ definiert. Die Argumente \vec{x} der Funktion können Werte aus dem n-dimensionalen Suchraum annehmen, während die Zielfunktion Werte aus dem eindimensionalen Zielraum annimmt. (GRIMME & BOSSEK 2018, S. 2-3)

Weiterer Teil der Definition einer Optimierungsaufgabe ist die Festlegung, ob die Zielfunktion minimiert $\min_{\vec{x}} f(\vec{x})$ oder maximiert $\max_{\vec{x}} f(\vec{x})$ werden soll. Minimierungs- und Maximierungsprobleme können jedoch mithilfe des Zusammenhangs

$$\max_{\vec{x}} f(\vec{x}) = -\min_{\vec{x}}(-f(\vec{x})) \text{ bzw. } \min_{\vec{x}} f(\vec{x}) = -\max_{\vec{x}}(-f(\vec{x})) \quad (2)$$

ineinander überführt werden. Im Folgenden wird ohne Einschränkung der Allgemeingültigkeit angenommen, dass f maximiert wird. (GRIMME & BOSSEK 2018, S. 2-3)

Neben der Beziehung zwischen Such- und Zielraum müssen bei vielen Optimierungsproblemen Rand- beziehungsweise Nebenbedingungen beachtet werden, die die Wahl der Argumente einschränken. Formal bedeutet dies, dass der Suchraum \mathcal{S} durch die k Bedingungen g_j mit $j = 1, \dots, k$ auf

$$\mathcal{G} := \{\vec{x} \in \mathbb{R}^n \mid g_j(\vec{x}) \leq 0 \forall j = 1, \dots, k\} \quad (3)$$

eingeschränkt wird und die Parameter nur Werte aus der Schnittmenge $\mathcal{S} \cap \mathcal{G}$ annehmen können. Randbedingungen treten insbesondere bei realen wirtschaftlichen oder technischen Fragestellungen auf. (GRIMME & BOSSEK 2018, S. 2-3)

Optimierungsprobleme können abhängig von der zu optimierenden Zielfunktion klassifiziert werden. Ist die Zielfunktion linear, lässt sie sich also in der Form

$$f(\vec{x}) = \vec{c} \cdot \vec{x} \rightarrow \max \quad (4)$$

formulieren, spricht man von einem *linearen Optimierungsproblem*. Dabei gilt $\vec{x} \in \mathbb{R}^n$ und $\vec{c} \in \mathbb{R}^n$. Die Koeffizienten \vec{c} repräsentieren Eigenschaften des Problems und werden durch die Optimierung nicht verändert. Die Komponenten von \vec{x} stammen üblicherweise aus der Menge \mathbb{R} der reellen Zahlen und werden bei der Optimierung angepasst, um den Wert der Zielfunktion zu beeinflussen. Werden sie ausschließlich aus der Menge \mathbb{Z} der ganzen Zahlen gewählt, handelt es sich um ein *ganzzahliges lineares Optimierungsproblem*. Enthält die Zielfunktion nicht lineare Funktionsterme, so handelt es sich um ein *nichtlineares Optimierungsproblem*. (GRIMME & BOSSEK 2018, S. 9-10)

Optimierungsprobleme lassen sich außerdem nach ihrer Komplexität in Klassen einteilen. Existiert ein Algorithmus, der sie in polynomiell begrenzter Laufzeit lösen kann, spricht man von einem Problem der Klasse NP (non-deterministic polynomial-time). Existiert kein derartiger effizienter Algorithmus, ist das Problem NP-schwer. (GRIMME & BOSSEK 2018, S. 20-24) Zur Lösung solcher Probleme, bei denen das optimale Lösungsvorgehen (abhängig von der Größe des Problems) extrem lange dauern kann, kommt Heuristiken eine große Bedeutung zu. Solche Verfahren können, verglichen mit exakten Optimierungsalgorithmen, oft erheblich schneller eine gute Lösung eines Optimierungsproblems ermitteln, garantieren aber keine Optimalität der gefundenen Lösung. (GRIMME & BOSSEK 2018, S. 74).

2.2.1 Evolutionäre Algorithmen

Evolutionäre Algorithmen sind heuristische Optimierungsverfahren, die angelehnt an den Prozess der natürlichen Evolution eine simulierte Evolution nutzen, um möglichst gute Näherungslösungen für ein gegebenes Optimierungsproblem zu finden (WEICKER 2015, S. 1). Sie kombinieren die Fähigkeiten des Computers als universelle Rechenmaschine mit dem allgemeinen Problemlösungspotenzial der natürlichen Evolution. Mögliche Lösungen des Optimierungsproblems werden wie ein Organismus behandelt und von evolutionären Operatoren variiert, reproduziert und bewertet. Evolutionäre Algorithmen zählen zu den stochastischen Optimierungsverfahren. Sie können nicht garantieren, ein globales Optimum zu finden, sind aber bei Optimierungsproblemen der Klasse NP-schwer effizient darin, eine Näherungslösung zu finden. (WEICKER 2015, S. 20)

Die möglichen Lösungen (auch: Individuen, Lösungskandidaten) sind bei Verwendung eines evolutionären Algorithmus in Form eines Genotyps Q codiert (Abbildung 2-3). Es existiert eine Dekodierungsfunktion $dec: Q \rightarrow S$, die den Genotyp in den Suchraum des konkreten Optimierungsproblems abbildet. Dabei kann auch $Q = S$ und somit $dec = Identität$ gelten. Die Gütefunktion f entspricht der Zielfunktion des Optimierungsproblems. Die induzierte Gütefunktion $f^*: Q \rightarrow Z$ bildet vom Genotyp direkt in den Zielraum ab und umfasst auch die Dekodierung. (WEICKER 2015, S. 34-35)

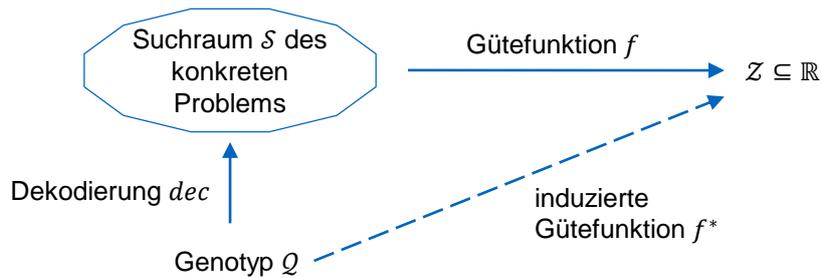


Abbildung 2-3: Kodierte Darstellung des Suchraums (WEICKER 2015, S. 35)

Einer der evolutionären Standardalgorithmen ist der genetische Algorithmus (Abbildung 2-4).

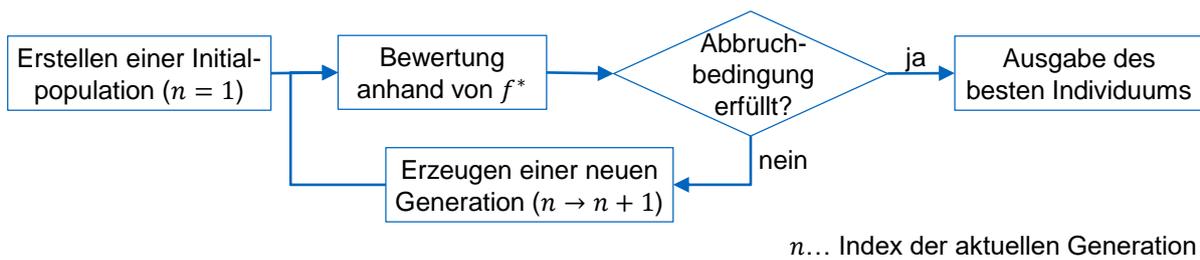


Abbildung 2-4: Ablauf der Optimierung mittels eines genetischen Algorithmus

Im ersten Schritt des genetischen Algorithmus wird eine Initialpopulation aus Lösungskandidaten generiert. Diese werden mittels der induzierten Gütefunktion f^* bewertet. Der so ermittelte Wert wird als Fitness der Individuen bezeichnet. Ist die definierte Abbruchbedingung des Algorithmus nicht erfüllt, wird durch Anwendung evolutionärer Operatoren eine weitere Generation an Individuen erzeugt (Abbildung 2-5). Dies wird so lange wiederholt, bis die Abbruchbedingung, zum Beispiel eine bestimmte Anzahl an Generationen oder eine mindestens zu erreichende Fitness, erfüllt ist. Das beste während des Ablaufs entstandene Individuum wird als Lösung des Optimierungsproblems ausgegeben. (WEICKER 2015, S. 87)

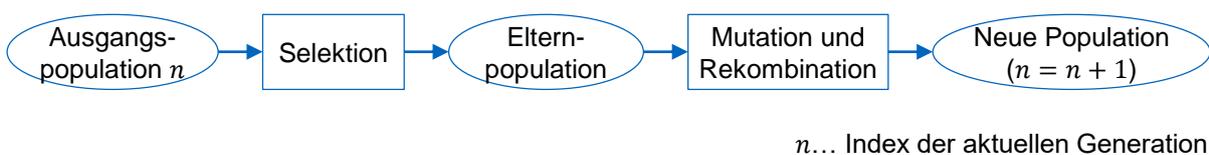


Abbildung 2-5: Erzeugen einer neuen Generation

Die Erzeugung einer neuen Generation an Individuen erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird durch einen Selektionsmechanismus bestimmt, welche Individuen der aktuellen Population als Eltern der nachfolgenden Generation genutzt werden. Beispiele für Selektionsmechanismen sind die *Rouletterad-Selektion*, bei der die Auswahlwahrscheinlichkeit der Individuen relativ zu ihrer Fitness ist, und die *Turnier-Selektion*, bei der eine bestimmte Anzahl an Individuen zufällig gewählt wird, von denen das Beste in die Elternpopulation aufgenommen wird. Dies passiert so lange, bis genug Individuen für die Elternpopulation ausgewählt wurden. (GRIMME & BOSSEK 2018, S. 206-208)

Die ausgewählten Elternindividuen werden anschließend durch die Operationen der Mutation und der Rekombination variiert, um andere innovative Lösungskandidaten zu erhalten. Dazu werden bei der Mutation zufällige Veränderungen in der genotypischen Repräsentation eines Individuums durchgeführt. (GRIMME & BOSSEK 2018, S. 209) Bei der Rekombination werden verschiedene Individuen der Elterngeneration verschmolzen, um durch die Neukombination Varianten zu erzeugen, die verschiedene positive Charakteristika der Eltern vereinen (GRIMME & BOSSEK 2018, S. 213).

2.2.2 Bilevel-Optimierung

Bilevel- beziehungsweise zweistufige Optimierungsprobleme sind geschachtelte Optimierungsaufgaben, bei denen die Nebenbedingungen des äußeren beziehungsweise oberen Optimierungsproblems eine weitere innere beziehungsweise untere Optimierungsaufgabe enthalten (SINHA ET AL. 2014, S. 374). Solche Aufgaben treten beispielsweise auf, wenn an einem Optimierungsproblem unterschiedliche Akteure beteiligt sind, deren Entscheidungen voneinander abhängen. Die Akteure haben unterschiedliche Zielfunktionen, die aber jeweils auch von den Entscheidungsvariablen der anderen Ebene abhängen. Sie können dasselbe Ziel verfolgen oder sich in einem Zielkonflikt befinden. (BARD 1998, S. 5)

Für jede mögliche Lösung des äußeren Optimierungsproblems existiert ein entsprechendes inneres Optimierungsproblem, das gelöst werden muss, um die optimale Reaktion des äußeren Problems auf die gewählte Lösung zu ermitteln. Die Variablen des äußeren Problems werden als \vec{x}_o und die des inneren Problems als \vec{x}_i bezeichnet, wobei die Indizes o und i für die englische Bezeichnung *outer* und *inner* stehen. Jedes Problem hat seine eigene Zielfunktion und seine eigenen Nebenbedingungen. Der Akteur auf der äußeren Ebene hat vollständiges Wissen über das innere Problem und berücksichtigt die zu erwartende Reaktion auf der inneren Ebene, während der Akteur auf der inneren Ebene versucht, seine eigene Zielfunktion zu optimieren und die Entscheidung der äußeren Ebene als gegeben betrachtet. (SINHA ET AL. 2018)

Formal wird ein solches Optimierungsproblem folgendermaßen beschrieben:

$$\begin{aligned}
 & \max_{\vec{x}_o \in \mathcal{S}_o} f_o(\vec{x}_o, \vec{x}_i) \\
 & \text{mit } \mathcal{G}_o(\vec{x}_o, \vec{x}_i) \leq 0 \\
 & \text{und } \max_{\vec{x}_i \in \mathcal{S}_i} f_i(\vec{x}_o, \vec{x}_i) \\
 & \text{mit } \mathcal{G}_i(\vec{x}_o, \vec{x}_i) \leq 0
 \end{aligned} \tag{5}$$

wobei f_o die zu minimierende Zielfunktion des oberen Problems ist. Der Wert dieser Funktion wird sowohl von den Argumenten \vec{x}_o des äußeren Problems als auch von den Argumenten \vec{x}_i des inneren Problems beeinflusst. Bei der Wahl der Variablen müssen die Nebenbedingungen \mathcal{G}_o des äußeren Problems beachtet werden. Die Variablen \vec{x}_i müssen außerdem so gewählt werden, dass die innere Zielfunktion f_i mit den gewählten \vec{x}_o unter Erfüllung der Nebenbedingungen des inneren Problems \mathcal{G}_i minimiert wird. (BARD 1998, S. 6)

Ein Spezialfall liegt vor, wenn die Zielfunktion des äußeren Problems nicht von den Variablen \vec{x}_i des inneren Problems abhängig ist, sondern nur von dessen erreichbarstem Zielfunktionswert. In diesem Fall lässt sich das Bilevel-Optimierungsproblem wie folgt beschreiben:

$$\begin{aligned}
 & \max_{\vec{x}_o \in \mathcal{S}_o} f_o(\vec{x}_o, w(\vec{x}_o)) \\
 & \text{mit } \mathcal{G}_o(\vec{x}_o, w(\vec{x}_o)) \leq 0 \\
 & \text{und } w(\vec{x}_o) = \max_{\vec{x}_i \in \mathcal{S}_i} f_i(\vec{x}_o, \vec{x}_i) \\
 & \text{mit } \mathcal{G}_i(\vec{x}_o, \vec{x}_i) \leq 0
 \end{aligned} \tag{6}$$

Der Zielfunktionswert $w(\vec{x}_o)$ des inneren Problems wird dabei ermittelt, indem $f_i(\vec{x}_o, \vec{x}_i)$ bei gegebenen \vec{x}_o minimiert wird. (BARD 1998, S. 8)

Aufgrund der Abhängigkeiten zwischen dem äußeren und dem inneren Optimierungsproblem sind Bilevel-Optimierungsprobleme schwierig zu lösen (SINHA ET AL. 2014, S. 374). Ein flexibler, aber rechenzeitintensiver Lösungsansatz ist der Einsatz geschachtelter evolutionärer Algorithmen. Dabei wird für jeden generierten Lösungskandidaten des äußeren Problems die innere Optimierungsaufgabe gelöst. (SINHA ET AL. 2014, S. 376-377)

3 Stand des Wissens

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über wissenschaftliche Arbeiten, die für die angestrebte Automatisierung der Layoutplanung von Montageanlagen relevant sind. Zunächst werden Arbeiten präsentiert, die sich mit Modellierung und Informationsmodellen im Kontext der Montageplanung befassen (Abschnitt 3.1). Anschließend werden bestehende Ansätze, um verschiedene Planungsentscheidungen zu automatisieren oder zu unterstützen, vorgestellt. Die erste betrachtete Planungsentscheidung ist die Auswahl von Produktionsressourcen basierend auf einer Überprüfung der technischen Eignung (Abschnitt 3.2). Die zweite ist die Austaktung der Montagelinie (Abschnitt 3.3) und die dritte die räumliche Anordnung der Ressourcen in einer Linie (Abschnitt 3.4).

3.1 Modellierung im Kontext der Montageplanung

Bei der Entwicklung von rechnergestützten Systemen zur Unterstützung der Montageplanung sind eine durchgängige Datenhaltung und die maschinenlesbare Bereitstellung der relevanten Informationen von großer Bedeutung (WEIDEMANN & DRATH 2010). Diese Herausforderung kann durch die Verwendung von geeigneten Modellen adressiert werden (VOGELHEUSER 2014; SCHOLZ 2018, S. 2-3).

Im Bereich der Montagetechnik sind sogenannte Produkt-Prozess-Ressourcen-(PPR-)Modelle etabliert. Zwischen den betrachteten Domänen Produkt, Prozess und Ressourcen bestehen dabei Beziehungen, die je nach Sichtweise mit unterschiedlichem Fokus formuliert werden können (Abbildung 3-1): Produkte werden durch Prozesse von Ressourcen hergestellt, Prozesse werden durch Ressourcen ausgeführt, um Produkte herzustellen, und Ressourcen führen Prozesse aus und bearbeiten so Produkte. (SPUR & KRAUSE 1997, S. 488; CUTTING-DECELLE ET AL. 2007; DRATH & SCHLEIPEN 2010, S. 83-91)

Diese Modelle können durch die Berücksichtigung von Fähigkeiten (englisch: Skills) zu Produkt-Prozess-Ressourcen-Skill-(PPRS-)Modellen erweitert werden. Skills beschreiben dabei die Eignung einer Ressource zur Durchführung eines Prozesses und bilden somit die Beziehung zwischen Prozess und Ressource ab. (PFROMMER ET AL. 2013)

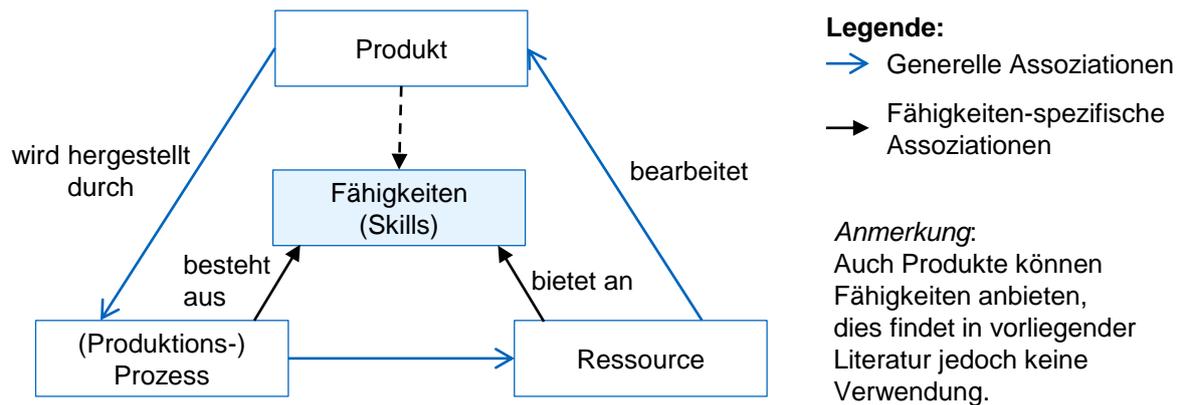


Abbildung 3-1: Beziehungen im PPRS-Modell (HAMMERSTINGL 2020, S. 44)

PPR- beziehungsweise PPRS-Modelle werden mit verschiedenen Zielstellungen entwickelt und eingesetzt. KIEFER (2007) entwickelt ein mechatronisches PPR-Datenmodell, das über den gesamten Lebenszyklus automatisierter Produktionssysteme genutzt werden kann. Während der Planung hilft es, die Kommunikation zwischen den beteiligten Expertinnen und Experten zu vereinfachen, und dient anschließend als Datenbasis für die Generierung von Steuerungscode.

Häufiger liegt der Fokus jedoch auf der Unterstützung des Planungsprozesses von Montageanlagen. RAMIS FERRER ET AL. (2016) und AHMAD ET AL. (2018) präsentieren zum Beispiel ein PPR-Modell basierend auf einer Ontologie, dessen Ziel es ist, die während der Anlagenplanung entstehenden Informationen in einem einheitlichen Framework zu sammeln und zu verknüpfen. So könnten die Zusammenarbeit und die Effizienz im Planungsprozess verbessert werden. Auch SCHOLZ (2018) stellt ein Systemmodell vor, mit dessen Hilfe es möglich ist, ein umfassendes Modell des Produktionssystems zu erstellen und dadurch Datenaustausch und -konsistenz während der Anlagenplanung zu unterstützen. Sein Konzept basiert auf drei Teilmodellen: einem Funktions-, einem Struktur- und einem Verhaltensmodell. LOFERER (2002) berücksichtigt in seinem PPR-Modell geometrische Eigenschaften und modelliert Funktionsflächen an Produkt- und Anlagenkomponenten.

Ein weiteres Einsatzgebiet von PPRS-Modellen ist die aufgabenorientierte Programmierung von Montageanlagen. Dabei wird die durchzuführende Montageaufgabe hardwareunabhängig modelliert und anschließend automatisiert Steuerungscode für die Anlage generiert. (BACKHAUS 2016; BACKHAUS & REINHART 2017; HAMMERSTINGL 2020)

PPS-Modelle können außerdem genutzt werden, um die Auswirkungen und Kosten von Änderungen an einem automatisierten Produktionssystem zu bestimmen (BOUGOUFFA ET AL. 2019) oder Ressourcen effizient aus einem umfangreichen Katalog auszuwählen (KATHREIN ET AL. 2019).

Im Folgenden werden die vier Domänen des PPRS-Konzeptes näher erläutert. Zuerst wird auf die Modellierung des Produkts eingegangen. Danach werden Möglichkeiten zur Prozessmodellierung dargestellt. Darauf folgt ein Überblick über die Modellierung von Ressourcen und schließlich über Ansätze zur Beschreibung von Fähigkeiten.

3.1.1 Modellierung von Produkten

Die Gestalt eines Produkts wird während des Produktentwicklungsprozesses festgelegt und umfasst die Struktur und Anordnung seiner Teile, Oberflächenparameter sowie verwendete Werkstoffe. Die Eigenschaften eines Produkts sowohl im Hinblick auf Funktionalität als auch auf Montagegerechtheit werden durch diese Merkmale bestimmt. (VAJNA ET AL. 2009, S. 32-33) Insbesondere die Geometrie und die dadurch bestimmten möglichen Montagereihenfolgen haben einen großen Einfluss auf die Gestaltung einer geeigneten Montagelinie und die Effizienz des Montageprozesses (BIKAS ET AL. 2016, S. 222). Zur Beschreibung der Produktmerkmale und -eigenschaften existiert eine Vielzahl an Daten wie CAD-Modelle, Texte und Beschreibungen oder Fertigungszeichnungen (DIN 4002).

Die Geometrie eines Produkts wird heute üblicherweise mithilfe spezialisierter Software, sogenannter CAD-Programme, entwickelt. Dabei entsteht meist ein virtuelles 3D-Modell des Produkts und seiner Einzelteile. (VAJNA ET AL. 2009, S. 160-161) Neben proprietären Datenformaten der unterschiedlichen CAD-Programm-Anbieter existieren verschiedene Formate für den Datenaustausch zwischen verschiedenen Programmen. Insbesondere das Standard-for-the-Exchange-of-Product-model-data-(STEP-)Format wird mittlerweile von allen relevanten Anbietern unterstützt. (HUBER 2016, S. 110-112) Ein weiteres standardisiertes Format ist das Datenformat COLLADA (COLLABorative Design Activity), definiert in der ISO/PAS 17506, das neben der Geometrie auch die Kinematik eines Objektes abbilden kann (LIPS 2010).

Neben der reinen Produktgeometrie ist für die Montageplanung relevant, wo am Produkt oder einem Teil ein Prozessschritt auszuführen ist. Dieser Bereich wird als Region of Interest (ROI, deutsch: Bereich von Interesse) bezeichnet und kann durch Punkte, Linien, Flächen oder Volumina definiert werden. Zusätzlich kann eine Richtung für die Ausführung des Prozesses bestimmt werden (zum Beispiel die Blickrichtung einer Kamera bei einem Prüfprozess). (HAMMERSTINGL 2020, S. 102-103)

3.1.2 Modellierung von Prozessen

Für die Beschreibung von Abläufen in einem Produktionssystem existieren vielfältige Beschreibungsarten. Diese haben unterschiedliche Eigenschaften und werden entsprechend für verschiedene Zwecke genutzt. Beispiele sind Unified-Modeling-Language-(UML-)Aktivitäts-

diagramme zur Modellierung der dynamischen Sichtweise auf ein System (CZUCHRA 2010, S. 117-118), Sequential Function Charts (SFCs) zur Beschreibung von gesteuertem Verhalten eines Systems (DIN EN 61131-3) oder die formalisierte Prozessbeschreibung, die Prozesse grafisch darstellt (VDI/VDE 3682). Einen Überblick über verschiedene Modellierungsansätze bieten zum Beispiel HUNDT ET AL. (2010), SCHOLZ (2018, S. 56-63) oder PAWLEWSKI (2014), der 70 Sprachen zur Modellierung von Prozessen untersucht und vergleicht.

Neben der allgemeinen Modellierung von Abläufen ist im Bereich der Montageplanung die Darstellung der möglichen Fügereihenfolgen von großer Bedeutung, da sie die Grundlage für die Planung von Montageprozess und -anlage bildet (BIKAS ET AL. 2016, S. 222). Zur Beschreibung der zulässigen Montagereihenfolgen eines Produkts existieren verschiedene Ansätze wie MVG, Diamant-Graphen, UND/ODER-Graphen oder Petri-Netze (MICHNIEWICZ 2019, S. 53-56). CUIPER (2000) nutzt für sein Planungsvorgehen beispielsweise Petri-Netze, deren Detaillierungsgrad sukzessive erhöht wird.

Eine andere weit verbreitete Darstellungsform von Fügereihenfolgen ist der MVG. Er wird insbesondere für die Montageplanung komplexer Produkte und als Grundlage für die Abstimmung der Arbeitstakte eingesetzt. Der MVG ist ein gerichteter Graph (Abbildung 3-2). Seine Knoten repräsentieren Montagevorgänge und seine Kanten die Vorrangbeziehungen zwischen den einzelnen Prozessschritten. Damit ein Prozessschritt durchgeführt werden kann, müssen alle seine direkten Vorgänger abgeschlossen sein. Eine Verzweigung im MVG bedeutet, dass die darauffolgenden Vorgänge in beliebiger Reihenfolge erledigt werden können. (BULLINGER 1986, S. 94-97)

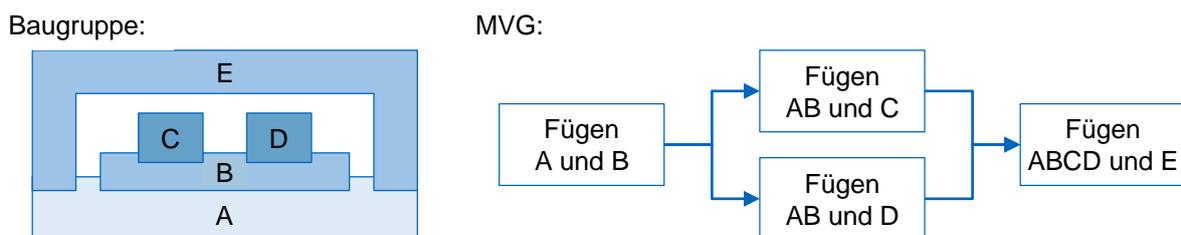


Abbildung 3-2: Beispielbaugruppe und zugehöriger MVG

Im klassischen MVG müssen alle Prozessschritte ausgeführt werden und es ist nicht möglich, alternative Prozessabläufe abzubilden. CAPACHO & PASTOR (2008, 2006) entwickeln eine Erweiterung des MVG zur Darstellung von alternativen Prozessen, den S-Graph. Dabei werden innerhalb des MVG Sub-Graphen definiert. Sub-Graphen, die einen gemeinsamen Vorgänger haben, stellen Prozessalternativen dar. Zur Montage des Produkts wird daher nur einer der Sub-Graphen mit gemeinsamem Vorgänger ausgewählt.

Auch SCHOLL ET AL. (2009, S. 245-247) präsentieren eine Notation zur Darstellung von MVG mit alternativen Prozessabläufen (Abbildung 3-3). Sie verwenden Paare von OR-Knoten am

AutomationML stellt jedoch lediglich ein Metamodell für die objektorientierte Modellierung von Daten zur Verfügung. Das bedeutet, dass die konkreten Objekte mit ihren Attributen und Verknüpfungen von dem Nutzer beziehungsweise der Nutzerin definiert werden müssen. Für die Beschreibung der vielfältigen Produktionsressourcen und ihrer Eigenschaften kann es daher nur einen Rahmen bieten. (DRATH & SCHLEIPEN 2010, S. 70) VATHOOPAN ET AL. (2019) nutzen die Flexibilität von AutomationML für den Aufbau eines PPRS-Modells für modulare Automatisierungssysteme. Schwerpunkt des Modells ist die Abbildung von Systemen, die aus verschiedenen Komponenten bestehen, sowie deren Verknüpfung mit dem auszuführenden Prozess.

SELIG (2011) teilt Automatisierungsgeräte basierend auf ihren Funktionen in Geräteklassen ein. Ziel ist es, die zur Verfügung gestellten Fähigkeiten vergleichbar zu machen. Er weist den einzelnen Geräten dafür Kommunikations-, Applikations- und Hardwareprofile zu, die die kommunikativen Eigenschaften, die eigentlichen Funktionalitäten sowie die Hardware des Geräts beschreiben. Ein anderer Ansatz für die Beschreibung der Funktionalitäten von Betriebsmitteln ist die Verwendung der in Abschnitt 3.1.4 vorgestellten Fähigkeitenmodelle.

Das Ressourcenmodell von JÄRVENPÄÄ (2012, S. 69-73) enthält einen allgemeinen Teil, der eine Ressourcenklasse beschreibt und einen individuellen Teil, der den Zustand eines konkreten Betriebsmittels abbildet. Der allgemeine Teil enthält neben den Fähigkeiten der Ressourcen auch Informationen über ihre Schnittstellen zu anderen Ressourcen sowie kaufmännische Eigenschaften wie Kosten, Energieverbrauch oder erwartete Lebensdauer. Im individuellen Teil werden hingegen Informationen wie die Betriebsstunden der spezifischen Ressource gespeichert.

Das Modell von HAMMERSTINGL (2020, S. 113-114) legt neben den Fähigkeiten der Ressourcen einen Schwerpunkt auf Informationen zur Konfiguration der Betriebsmittel, da es als Basis für die automatisierte Vernetzung und Programmierung von Ressourcen konzipiert ist. Es beinhaltet aber auch Merkmale für die Identifikation eines Betriebsmittels, seinen aktuellen Status, seine physikalischen Eigenschaften sowie weitere Informationen.

REUTER (2013) wählt einen alternativen Ansatz zur Klassifikation von Automatisierungskomponenten. Er unterscheidet zwischen Aktor-, Sensor- und Informationsverarbeitungskomponenten. Bei der weiteren Einteilung stehen Energie- und Informationsflüsse im Vordergrund. Aktoren werden so zum Beispiel in die Klassen mechanisch, elektrisch und fluidisch eingeteilt und Sensoren danach, ob sie mechanische, elektrische, thermische oder andere Messgrößen ermitteln. Außerdem wird das Zusammenspiel verschiedener Komponentenarten in einem Automatisierungssystem modelliert.

3.1.4 Modellierung von Fähigkeiten

Wie in Abschnitt 3.1 erörtert, bilden Fähigkeiten in PPRS-Modellen die Schnittstelle zwischen Prozess und Ressourcen. Auf Prozessseite beschreiben sie lösungsneutral, welche Aufgabe durchgeführt werden soll, und auf Seite der Ressourcen, welche Funktionalitäten diese besitzen. (PFROMMER ET AL. 2013) Um auf dieser Basis geeignete Ressourcen zur Durchführung der Prozessschritte auswählen zu können, müssen die Fähigkeiten semantisch eindeutig definiert und ausreichend spezifiziert sein. Die Einteilung von Fügeverfahren nach DIN 8593 und von Handhabungsoperationen nach VDI 2860 ist dazu nur bedingt geeignet, da sie die verschiedenen Prozessstypen in der Montage lediglich klassifizieren, aber keinen Ansatz zur Beschreibung ihrer Eigenschaften liefern. (HAMMERSTINGL & REINHART 2017)

In der Literatur sind zahlreiche Ansätze zur Modellierung von Fähigkeiten zu finden. Im Folgenden werden ausgewählte Arbeiten aus dem Bereich vorgestellt.

SCHMIDT (1992) entwickelt eine Klassifikation von Montageprozessen basierend auf der VDI 2860. Er kritisiert die Doppeldeutigkeit der dortigen Kategorien und definiert Speichern, Bewegen, Verbinden, Verändern und Vergleichen als überschneidungsfreie Grundprozesse. Für jeden Grundprozesse gibt er eine Liste mit beeinflussenden Parametern an.

SMALE & RATCHEV (2010) und SMALE (2011) stellen ein Skillmodell und eine zugehörige Taxonomie für die Planung beziehungsweise Konfiguration von Montagesystemen vor. Die Einteilung erfolgt in die sechs Bereiche Bewegung, Fügen, Fixieren, Messen, Zuführen und Bearbeiten. Eine weitere Untergliederung wird nicht vorgenommen.

Auch KLUGE (2011) verfolgt das Ziel einer fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme. Zur Klassifizierung der Montageprozesse verwendet er die Montagegrundfunktionen und Untergliederungen aus DIN 8593 und VDI 2860. Diese ergänzt er um Justage- und Sonderoperationen. Basierend auf Literatur präsentiert er einen Katalog an Merkmalen zur Beschreibung der Prozesse.

JÄRVENPÄÄ ET AL. (2011), JÄRVENPÄÄ (2012) und JÄRVENPÄÄ ET AL. (2019) präsentieren eine Methode zur Fähigkeitenmodellierung mit dem Ziel, einen automatisierten Abgleich von Anforderungen und Fähigkeiten zu ermöglichen. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Berücksichtigung von kooperierenden Ressourcen. Zur Modellierung der Beziehungen zwischen verschiedenen Ressourcen sowie ihren Fähigkeiten und Parametern wird eine Ontologie verwendet.

BACKHAUS (2016) und BACKHAUS & REINHART (2017) befassen sich mit der aufgabenorientierten Programmierung von Montageanlagen und entwickeln dafür eine Taxonomie von Fähigkeiten in der Montage. Es wird ein Vorgehen für die Identifikation von Fähigkeiten sowie eine

beispielhafte Hierarchie von Skills vorgestellt. Die definierten Skills können zu Prozessabläufen kombiniert werden, auf deren Basis dann Steuerungscode für die Ressourcen der Montagelinie generiert wird.

HAMMERSTINGL (2020, S. 95-109) leitet eine umfangreiche Taxonomie von elementaren Fähigkeiten in der Montage her, die zu komplexeren Funktionen kombiniert werden können. Neben den klassischen Montagefähigkeiten wie Fügen oder Handhaben werden auch sensorische Fähigkeiten und Funktionen zum Datenaustausch berücksichtigt. Jede Fähigkeit wird durch Parameter spezifiziert. Ziel der Arbeit ist die aufgabenorientierte Programmierung einer Montagelinie.

3.2 Eignungsüberprüfung von Ressourcen

Die Auswahl geeigneter Ressourcen ist ein wichtiger Schritt in der Planung einer neuen Montagelinie. Dabei wird zunächst lösungsneutral beschrieben, welche Abläufe umgesetzt werden sollen. Zur Durchführung der Prozessschritte werden anschließend Ressourcen mit den passenden Fähigkeiten ausgewählt (Abschnitt 2.1.2.). Dazu müssen die Anforderungen des Prozesses und die Fähigkeiten der zur Verfügung stehenden Betriebsmittel miteinander abgeglichen werden. Voraussetzung für die Automatisierung dieses Vorgangs ist eine semantisch eindeutige Beschreibung der durchzuführenden Prozessschritte und der Eigenschaften der zur Verfügung stehenden Ressourcen. (KATHREIN ET AL. 2019)

Viele der in Abschnitt 3.1.4 genannten Fähigkeitsmodelle zielen darauf ab, die Auswahl von Ressourcen in verschiedenen Kontexten zu unterstützen: Die Arbeiten von SMALE & RATCHEV (2010), SMALE (2011), JÄRVENPÄÄ ET AL. (2011), JÄRVENPÄÄ (2012) und JÄRVENPÄÄ ET AL. (2019) betrachten die Anpassung von bestehenden Produktionssystemen. KLUGE (2011) konzentriert sich auf die Neuplanung modularer Mikro-Montagesysteme und HAMMERSTINGL (2020) wählt im Rahmen der Anlagenprogrammierung bereits in der Linie verbaute Betriebsmittel für die durchzuführenden Prozessschritte aus.

BENGEL (2009) stellt das Produkt ins Zentrum der Ressourcenauswahl. Er definiert Skills zur Beschreibung von Betriebsmittelfähigkeiten und der durchzuführende Prozess wird indirekt über die Produktzustände definiert. Auch JÄRVENPÄÄ ET AL. (2018) befassen sich mit der Rolle des Produkts für die Auswahl von Ressourcen und präsentieren eine detaillierte Ontologie zur Beschreibung der relevanten Eigenschaften eines Produkts.

MICHNIEWICZ ET AL. (2016) und MICHNIEWICZ (2019) berücksichtigen neben den Betriebsmittelfähigkeiten geometrische Aspekte für die Auswahl von Produktionsressourcen. Anwendungsfall ist dabei die Rekonfiguration von Montagelinien, wobei der Fokus auf der Auswahl

von Endeffektoren wie Greifern oder Schraubern liegt. Durch die Integration von Simulationsmethoden wird sichergestellt, dass die gewählten Ressourcen kollisionsfrei eingesetzt werden können.

KEDDIS ET AL. (2014) wählen im Rahmen der Produktionssteuerung fähigkeitsbasiert Stationen eines flexiblen Produktionssystems aus. Dabei berücksichtigen sie die aktuelle Konfiguration des Systems und die Materialflüsse, um einen effizienten Produktionsplan zu erstellen. Auch HAMMERSTINGL (2020) ordnet bereits in einer Anlage verbaute Ressourcen den durchzuführenden Prozessschritten zu. Dabei werden die Positionierung der Betriebsmittel in der Linie sowie die möglichen Materialflüsse zwischen den Bearbeitungsstationen berücksichtigt.

3.3 Austaktung von Montagelinien

Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, ist die Erstellung des Strukturlayouts ein zentraler Schritt bei der Planung neuer Montagelinien. Dieser Planungsschritt umfasst die Bestimmung der Taktzeit, die Ermittlung der benötigten Anzahl an Stationen und Produktionsressourcen sowie die Zuordnung der Prozessschritte zu den Stationen. Das wissenschaftliche Feld des *Assembly Line Balancings* (ALB, deutsch: Fließbandabstimmung) beschäftigt sich mit Optimierungsmodellen zur Unterstützung dieser Planungsentscheidung. (BOYSEN ET AL. 2007, S. 675, 2008, S. 510; BECKER & SCHOLL 2006, S. 695)

Das Kernproblem des ALB ist die Zuordnung von Prozessschritten (auch: Tasks) zu Stationen (Abbildung 3-4). Ausgangspunkt ist der MVG des Produkts, das auf der Linie hergestellt werden soll. Auf Basis dieser Eingangsinformationen wird eine Optimierung durchgeführt, um die verschiedenen Prozessschritte zu Stationen zusammenzufassen. Zielgrößen der Optimierung sind klassischerweise die Anzahl der Stationen oder die Taktzeit der Linie. Die Vorrangbeziehungen zwischen den Prozessschritten werden als Randbedingungen berücksichtigt. (BOYSEN ET AL. 2007, S. 675, 2007, S. 677)



Legende:

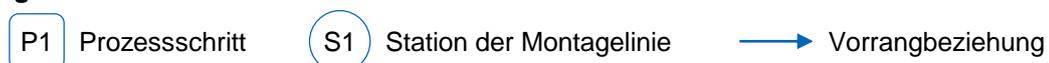


Abbildung 3-4: Prinzipieller Ablauf des ALB (nach LEIBER & REINHART (2021))

Arbeiten im Bereich des ALB unterscheiden sich durch die Eigenschaften des betrachteten Montageprozesses, der zu planenden Linie und der Zielgrößen der Optimierung. Beispielsweise kann der Montageprozess eindeutig definiert sein oder Prozessalternativen enthalten, die Stationen der Linie können ausschließlich nacheinander oder auch parallel angeordnet sein und bei der Optimierung können entweder nur zeitliche oder auch monetäre Kriterien berücksichtigt werden. (BOYSEN ET AL. 2007)

Einen guten Überblick über Arbeiten zu den verschiedenen Problemstellungen liefern BECKER & SCHOLL (2006), BOYSEN ET AL. (2008), BATAÏA & DOLGUI (2013) und SIVASANKARAN & SHAHABUDEEN (2014).

ALB-Optimierungsprobleme gehören im Allgemeinen zur Kategorie NP-schwer (vgl. Abschnitt 2.2). Bei großen Aufgabenstellungen, oder wenn die zur Verfügung stehende Rechenzeit begrenzt ist, sind exakte Verfahren nicht sinnvoll anwendbar. Viele Autorinnen und Autoren befassen sich daher damit, heuristische Algorithmen zur Lösung dieser Aufgabenstellungen zu entwickeln und zu verbessern. (OESTERLE ET AL. 2017, S. 8; BATAÏA & DOLGUI 2013, S. 269) RASHID ET AL. (2012) und OESTERLE ET AL. (2017) vergleichen unterschiedliche heuristische Optimierungsalgorithmen zur Lösung von ALB-Problemen. Am häufigsten kommen genetische Algorithmen zum Einsatz, gefolgt von Ameisen- und Partikel-Schwarm-Algorithmen (OESTERLE ET AL. 2017, S. 8).

TASAN & TUNALI (2008) geben einen Überblick über verschiedene Arbeiten, bei denen genetische Algorithmen zur Lösung des ALB-Problems eingesetzt werden. ZHANG ET AL. (2017) und SARWAR (2019) nutzen solche Algorithmen, um ALB-Probleme mit nichtdeterministischen Prozesszeiten zu lösen. DELICE (2019) entwickelt einen genetischen Algorithmus für ALB unter Berücksichtigung von Rüstzeiten an einer zweiseitigen Montagelinie. PITAKASO & SETHANAN (2016) nutzen einen evolutionären Algorithmus für die Lösung einer ALB-Variante, die eine maximale Anzahl von Maschinen an einer Station berücksichtigt. LI ET AL. (2018) kombinieren einen evolutionären Algorithmus mit einem Simulated-Annealing-Algorithmus, um Roboterlinien für die Montage mehrerer Produkte auszutakten.

Neben der reinen Zuordnung von Prozessschritten zu Stationen existieren ALB-Ansätze, die die Zuordnung von Produktionsressourcen zu den Stationen in die Optimierung miteinbeziehen. Mögliche Erweiterungen sind die Betrachtung der Ressourcenauswahl simultan zur Linienausstattung, die Berücksichtigung von Alternativen im durchzuführenden Prozess oder die Möglichkeit paralleler Stationen in der geplanten Linie. (BOYSEN ET AL. 2007, S. 677) Durch das gemeinsame Betrachten mehrerer Planungsaspekte kann das Planungsergebnis verbessert werden, aber die Komplexität des Optimierungsproblems steigt (BATAÏA & DOLGUI 2013, S. 271).

Im Folgenden werden ausgewählte Veröffentlichungen aus dem Bereich des ALB vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf Arbeiten, die sich mit ALB-Problemen beschäftigen, die über den klassischen Fall eines vollständig definierten Prozessablaufs mit der Minimierung von Stationsanzahl oder Taktzeit als Zielgröße hinausgehen.

REKIEK ET AL. (2002a) und REKIEK ET AL. (2002b) präsentieren eine Zusammenfassung über verschiedene Veröffentlichungen, die ALB-Ansätze mit integrierter Ressourcenauswahl vorstellen. HAZIR ET AL. (2015) geben einen Überblick über ALB-Modelle, die Kosten als Optimierungskriterium berücksichtigen. Relevante Kostenarten sind beispielsweise Betriebsmittelkosten, Lohnkosten der Werker an der Linie, Kosten für Puffer oder Aufwände für das Umrüsten der Linie zwischen verschiedenen Produkten.

BUKCHIN & TZUR (2000) stellen ein ALB-Problem vor, das neben der Zuweisung von Tasks zu Stationen auch die Ressourcenauswahl berücksichtigt. Es stehen verschiedene Betriebsmittelarten zur Verfügung, die jeweils mit Kosten assoziiert sind. Jeder Station wird genau ein Betriebsmittel zugewiesen, und die Zuordnung von Tasks zu Stationen ist nur möglich, wenn dort eine passende Ressource vorhanden ist. Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Kosten der Linie bei einer gegebenen Taktzeit. Zur Lösung der Optimierungsaufgabe wird ein Branch-and-Bound-Algorithmus verwendet. BUKCHIN & RUBINOVITZ (2003) nutzen diesen Algorithmus zur Minimierung der Kosten einer Montagelinie, die auch parallele Stationen enthalten kann.

AĞPAK & GÖKÇEN (2005) entwickeln einen ALB-Ansatz mit dem Ziel, die Anzahl der verwendeten Ressourcen zu minimieren. Dazu werden Tasks, die die gleichen Ressourcen benötigen, nach Möglichkeit derselben Station zugewiesen. Kosten werden nicht explizit berücksichtigt. COROMINAS ET AL. (2011) entwickeln diesen Ansatz weiter und generalisieren die Problemstellung. Sie gehen davon aus, dass Tasks mehrere Ressourcen benötigen können. Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Gesamtkosten der Linie, die sich aus den Kosten der Stationen und den Kosten der Ressourcen zusammensetzen. Von jedem Betriebsmitteltyp ist nur eine bestimmte Anzahl verfügbar.

Auch PEKIN & AZIZOGLU (2008) präsentieren ein ALB-Problem, das die Auswahl geeigneter Ressourcen berücksichtigt. In ihrem Modell können jeder Station mehrere Betriebsmittel zugeordnet werden. Optimierungskriterien sind die Ressourcenkosten und die Anzahl der Stationen. Es wird eine exakte Lösung mittels Branch-and-Bound-Algorithmus ermittelt.

AMEN (2006) formuliert ein Optimierungsproblem, in dem die Kosten pro produzierter Einheit minimiert werden. Er berücksichtigt dabei Lohn- und Kapitalkosten, die von der Länge der Linie abhängen. Zur Lösung des Problems verweist er auf seine vorhergegangenen Arbeiten AMEN

(2000a), AMEN (2000b) und AMEN (2001), in denen exakte und heuristische Lösungsalgorithmen für kostenorientiertes ALB beschrieben und verglichen werden.

CAPACHO & PASTOR (2006) und CAPACHO & PASTOR (2008) stellen ein Modell für die Lösung des ALB-Problems für Montageprozesse mit alternativen Prozessabfolgen vor. CAPACHO ET AL. (2006) und CAPACHO ET AL. (2009) entwickeln und vergleichen verschiedene heuristische Algorithmen zur Lösung dieses ALB-Problems.

Auch SCHOLL ET AL. (2009) beschreiben ein mathematisches Modell für ALB unter Berücksichtigung von Prozessalternativen. Ihr Verfahren basiert auf einer Modifikation bekannter Algorithmen zur effizienten Lösung des ALB-Problems und ist auch für umfangreichere Prozesse anwendbar. Optimierungsziel ist die Minimierung der Anzahl an Stationen bei gegebener Taktzeit.

TOPALOGU ET AL. (2012) nutzen Wenn-Dann-Regeln anstatt Graphen, um die Vorrangbeziehungen zwischen den Tasks eines Montageprozesses zu modellieren. So können sie alternative Montageprozesse für ein Produkt abbilden und weitere Einschränkungen für die Zuordnung von Tasks zu Stationen neben den Vorrangbeziehungen berücksichtigen.

MICHALOS ET AL. (2015) beschreiben ein zweistufiges System zur Planung von Montagelinien. Im ersten Schritt wird basierend auf dem durchzuführenden Montageprozess die Anzahl der benötigten Stationen und Ressourcen bestimmt. Anschließend werden konkrete Betriebsmittel für die durchzuführenden Prozesse ausgewählt und die Performance des Gesamtsystems wird mittels einer ereignisdiskreten Simulation bewertet.

MURA & DINI (2016) stellen ein ALB-Problem vor, das die Zuordnung von Werkern und Ressourcen zu den Stationen berücksichtigt. Ziel ist es, Tasks, die hohe Anforderungen an die Fähigkeiten von Workern stellen oder die dieselben Ressourcen benötigen, an wenigen Stationen zu bündeln. Zur Lösung der Optimierungsaufgabe wird ein genetischer Algorithmus eingesetzt.

OESTERLE ET AL. (2017) präsentieren eine Problemformulierung, die das Produktdesign (in Form von Prozessalternativen im Vorranggraph) und die gewählten Ressourcen berücksichtigt. Zielgröße der Optimierung sind die Produktkosten. Es werden verschiedene Kostenarten wie Material-, Lohn-, Energie- und Ressourcenkosten beachtet. Zur Lösung des Optimierungsproblems werden 34 heuristische Verfahren eingesetzt und verglichen. OESTERLE & LIONEL (2018) bauen auf diese Arbeit auf und untersuchen den Einfluss verschiedener Dominanzregeln als Alternative zur Pareto-Optimalität auf verschiedene Algorithmen zur Lösung des ALB-Problems.

PEREIRA ET AL. (2018) und PEREIRA (2018) stellen ein ALB-Problem vor, in dem die Zuordnung von Tasks und Ressourcen zu Stationen gleichzeitig stattfindet. Optimierungsziel ist dabei die

Minimierung von Kosten, die sich aus fixen Installations- und variablen Betriebskosten zusammensetzen.

ALAKAŞ ET AL. (2020) präsentieren eine ALB-Formulierung, die die Taktzeit der Linie und Anzahl der verwendeten Ressourcen minimiert. Das Optimierungsmodell wählt zwischen verschiedenen geeigneten Ressourcen für einen Task aus und kann auch Tasks berücksichtigen, für die mehrere Ressourcen gemeinsam eingesetzt werden müssen. Zur Lösung des Modells wird die Constraint-Programmierung eingesetzt.

ÁLVAREZ-MIRANDA ET AL. (2021) untersuchen, wie sich parallele Stationen auf die Effizienz einer Linie auswirken. Sie beschreiben eine ALB-Variante, deren Ziel es ist, mit möglichst wenigen parallelen Stationen die maximal mögliche Effizienz der Linie zu erreichen.

3.4 Planung des räumlichen Layouts

Die räumliche Anordnung von Betriebsmitteln und Produktionsbereichen ist ein wichtiger Schritt bei der Planung einer neuen Montagelinie (vgl. Abschnitt 2.1.2), da die Anordnung die Gesamteffektivität des Systems und die Kosten der Materialhandhabung beeinflusst. (TOMPKINS ET AL. 2010)

Für die automatisierte Planung und Optimierung des Groblayouts, also die Platzierung einzelner Bereiche und Anlagen in der Fabrikfläche, existieren zahlreiche Ansätze. Diese Problemstellung wird in der Literatur als *Facility Layout Problem* (FLP, deutsch: innerbetriebliche Standortplanung) bezeichnet. Ziel dieser Ansätze ist es, das effizienteste Layout zu ermitteln. Dabei werden verschiedene Zielkriterien wie Materialfluss- oder erwartete Rekonfigurationskosten optimiert. Außerdem werden Randbedingungen wie Form und Größe der Produktionsbereiche oder Art des verwendeten Handhabungssystems berücksichtigt. Arbeiten aus dem Bereich FLP betrachten meist die Erstellung eines 2D-Layouts, wobei die anzuordnenden Elemente durch Rechtecke oder Polygone repräsentiert werden. (DRIRA ET AL. 2007, S. 255; HOSSEINI-NASAB ET AL. 2018, S. 957-958; PÉREZ-GOSENDE ET AL. 2021)

Für die detaillierte Planung einer Montagelinie ist der Abstraktionsgrad der FLP-Ansätze zu hoch, da die einzelnen Betriebsmittel innerhalb der Stationen der Linie betrachtet und angeordnet werden müssen. Diesen Planungsschritt zu automatisieren, ist eine der größten Herausforderungen bei der Automatisierung der Montagesystemplanung. (MICHALOS ET AL. 2015, S. 86)

Ein umfassendes System zur 3D-Layout-Optimierung von Montagezellen mit verschiedenen Betriebsmitteltypen stellen WOENCKHAUS (1994) und WOENCKHAUS & MILBERG (1993, S. 44) vor. Im Gegensatz zu den FLP-Ansätzen, die sich mit dem Groblayout befassen, werden in

diesen Arbeiten einzelne Roboter, Sensoren und Menschen sowie passive Elemente berücksichtigt. Das Initiallayout wird dabei von dem Planer beziehungsweise von der Planerin erstellt und anschließend automatisiert bewertet und iterativ optimiert. Für die Layoutbewertung kommt eine 3D-Simulationsumgebung zum Einsatz. ROßGODERER ET AL. (1995) entwickeln diesen Ansatz weiter, indem auch das initiale Layout automatisiert generiert wird. Dazu werden funktionale Oberflächen definiert und die Beziehungen zwischen den Komponenten der Zelle in Form eines Strukturlayouts abgebildet. REINHART & ROßGODERER (1998) verbessern das Planungssystem weiter. Sie integrieren eine automatisierte Roboterbahnplanung und die Möglichkeit, menschliche Bewegungen interaktiv in einer Virtual-Reality-(VR-)Umgebung zu planen. ROßGODERER (2002) präsentiert schließlich ein dreistufiges Planungssystem zur 3D-Layoutplanung von hybriden Montagesystemen. Die Betriebsmittel werden manuell zur Struktur einer Montagestation verknüpft und der durchzuführende Montageprozess wird manuell eingegeben. Ein 3D-Simulationsmodell sowie die benötigten Roboterbewegungen werden automatisch generiert. Manuelle Bewegungsabläufe werden interaktiv mit Eingabegeräten aus dem Bereich der VR eingegeben. Durch Variation der verbliebenen Freiheitsgrade wird die Anordnung automatisiert optimiert.

Viele Arbeiten, die sich mit der Positionierung von Betriebsmitteln befassen, legen den Fokus jedoch entweder auf die Positionierung von Industrierobotern beziehungsweise die Planung von Roboterzellen (vgl. Abschnitt 3.4.1) oder die optimale Positionierung von optischen Sensoren (vgl. Abschnitt 3.4.2). Diese Komponenten sind im Produktionsumfeld etabliert und weitverbreitet (LUX-GRUENBERG 2020, S. 4).

3.4.1 Planung von Roboterzellen

Zahlreiche Arbeiten, die sich mit der automatisierten Anordnung von Betriebsmitteln beschäftigen, legen den Fokus auf Industrieroboter beziehungsweise ihre Umgebung.

LUETH (1992) präsentiert ein Vorgehen für die automatisierte Planung von Roboterzellen. Dabei werden die Komponenten nacheinander so in der Zelle platziert, dass immer ein gültiges Layout existiert. Das Vorgehen berücksichtigt Kollisionsfreiheit und Erreichbarkeit als Randbedingungen, Optimierungskriterium ist die Länge der Roboterbahnen, die zur Durchführung der Aufgaben notwendig ist.

BARRAL ET AL. (2001) kombinieren einen konstruktiven Ansatz zur automatisierten Planung des Layouts einer Montagezelle mit einem Simulated-Annealing-Algorithmus. Dabei werden Maschinen nacheinander im Umfeld eines fixen Roboters angeordnet. Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Taktzeit. Auch das Schutzrecht US 6,470,301 B1 und das Schutzrecht US 6,526,373 B1 nutzen dieses Vorgehen.

Das Schutzrecht US 8,571,706 B2 stellt ebenfalls eine Methode vor, um mehrere Arbeitsstationen, die in einer vorgegebenen Reihenfolge von einem Industrieroboter angefahren werden, in einer Zelle zu platzieren. Dabei wird ein Teil des Roboterarbeitsraums als besonders vorteilhaft definiert, und es ist Ziel der Optimierung, dass die ROIs, die angefahren werden, in oder möglichst nahe an diesem Bereich liegen.

Auch TUBAILEH (2014) optimiert die Anordnung von Maschinen in einer Roboterzelle. Ziel ist die Minimierung der Zeit, die der Roboter benötigt, um die Maschinen in vorgegebener Reihenfolge zu erreichen. Dabei werden die kinematischen Eigenschaften des Roboters berücksichtigt und das Planungsergebnis mittels 3D-Simulation validiert.

PAPAKOSTAS ET AL. (2011) befassen sich mit der Planung von kooperierenden Robotern für den Einsatz in der Automobilbranche. Basierend auf einer manuell erstellten Initiallösung werden dabei verschiedene Alternativen hinsichtlich Positionierung und Bahnplanung automatisiert generiert und anhand nutzerdefinierter Kriterien, zum Beispiel Zykluszeit, bewertet.

IZUI ET AL. (2013) präsentieren ein multikriterielles Optimierungsproblem für die automatisierte Layoutplanung von Roboterzellen. Bei der Optimierung berücksichtigt werden die benötigte Fläche des Layouts, die Zykluszeit und die Manipulierbarkeit des Roboters, um zu verhindern, dass er sich einer singulären Achsstellung nähert. Zur Lösung des Problems wird ein genetischer Algorithmus verwendet. LIM ET AL. (2016) bauen auf diesen Ansatz auf und vergleichen verschiedene heuristische Algorithmen zur Lösung des Optimierungsproblems. Auch SUEMITSU ET AL. (2016) entwickeln die Methode weiter und ermöglichen die Planung von Zellen mit mehr als einem Roboter.

PELLEGRINELLI ET AL. (2014) befassen sich mit der Planung von Multi-Roboterzellen speziell für den Anwendungsfall des Punktschweißens. Sie verwenden ein mehrstufiges Verfahren, das die Auswahl, Positionierung und Bahnplanung der Roboter umfasst. Dabei werden zunächst die einzelnen Roboter und anschließend die Wechselwirkungen zwischen den Robotern betrachtet. PELLEGRINELLI ET AL. (2015) und PELLEGRINELLI ET AL. (2017) entwickeln diesen Ansatz weiter und validieren ihn anhand verschiedener Anwendungsbeispiele.

SHARMA ET AL. (2017) erstellen basierend auf CAD-Daten Punktwolkenmodelle von Robotern und anderen Objekten in der Zelle. Anschließend wird die Positionierung und Orientierung der Objekte in einer Roboterzelle mittels des Simulated-Annealing-Algorithmus optimiert. Optimierungskriterium ist dabei die minimale Bewegung der Roboterachsen.

3.4.2 Positionierung von optischen Sensoren

Viele der existierenden Arbeiten zur Positionierung von optischen Sensoren haben als Ziel die Ermittlung eines geeigneten Sets an Sensorposen, um eine bestimmte Aufgabe zu erfüllen

(CHEN ET AL. 2008, S. 39). Die Pose eines Körpers ist dabei die Kombination aus seiner Position und Orientierung (ISO 8373, S. 7). Die Bestimmung der Sensorposen ist einerseits notwendig, da das Sichtfeld von Sensoren oft nur einen Teil des Zielobjekts abdeckt, und zum anderen, da eine Ansicht oft nicht reicht, um ein dreidimensionales Modell eines realen Körpers zu erstellen beziehungsweise alle relevanten Merkmale zu erfassen. Im industriellen Kontext existiert gewöhnlich bereits ein digitales Modell des zu vermessenden Teils und das Ziel ist die Messung bestimmter Eigenschaften im Rahmen der Qualitätssicherung (CHEN ET AL. 2008, S. 2).

TRUCCO ET AL. (1997) stellen ein Planungssystem vor, um die optimalen Sensorpositionen für definierte Prüfaufgaben zu berechnen. Der verwendete optische Sensor ist dabei bereits festgelegt und auch ein CAD-Modell des Prüfobjekts steht zur Verfügung.

GRONLE & OSTEN (2016) integrieren die Planung der Messposen in ein umfassenderes Assistenzsystem für die Prüfplanung von Oberflächen, das außerdem die Auswahl eines Sensors sowie die Festlegung von Sensorparametern adressiert.

ELLEFSEN ET AL. (2017) präsentieren eine multikriterielle Optimierung mittels evolutionärem Algorithmus, um einen Roboterpfad für die Inspektion einer bekannten Struktur zu ermitteln. Anwendungsfall ist dabei ein Unterwasserroboter zur Inspektion von Bohrinseln oder Off-Shore-Windparks. Ziele der Optimierung sind die Minimierung des Energieverbrauchs, die Maximierung des Inspektionsbereichs sowie die Minimierung von Kollisionen.

ROSMAN ET AL. (2018) adressieren nicht die Kontrolle eines Objektes beziehungsweise Merkmals, sondern beschäftigen sich mit der Posenplanung von Sensoren für die Überwachung von Montageaufgaben im Kontext kooperierender Roboterteams.

Neben der Vermessung von Objekten, von denen ein digitales Modell vorliegt, ist ein weiteres Einsatzgebiet der Sensorposenplanung die Digitalisierung von Gegenständen, von denen nur die ungefähren Abmaße bekannt sind. Da dabei vor dem Start des Digitalisierungsprozesses keine Informationen über das zu digitalisierende Objekt verfügbar sind, müssen die Posen kontinuierlich während des Prozesses basierend auf den bereits verfügbaren Aufnahmen generiert werden (KARASZEWSKI ET AL. 2016, S. 320). KARASZEWSKI ET AL. (2016) evaluieren und vergleichen verschiedene Algorithmen zur Posenplanung für diesen Anwendungsfall.

Ein Beispiel für einen solchen Algorithmus ist die Arbeit von MONICA & ALEOTTI (2018). Ihr Ansatz basiert auf der Repräsentation der Umgebung durch Oberflächenelemente. Der Ansatz zeigt eine bessere Performance als Ansätze basierend auf einer Repräsentation durch Volumenelemente bei vergleichbarer Qualität der erstellten Modelle.

Neben diesen Anwendungsfällen zur Vermessung oder Digitalisierung von Objekten nennen ZENG ET AL. (2020) die Digitalisierung einer Szene, die nicht auf ein bestimmtes Volumen beschränkt ist (im Kontext der mobilen Robotik), die Erkennung beziehungsweise Klassifizierung von Objekten sowie deren Lokalisierung als Szenarien, in denen Sensorposen geplant werden müssen.

3.5 Zusammenfassung und Bewertung

Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, erfolgen die einzelnen Planungsschritte beim Entwurf eines neuen Montagesystems klassischerweise sequenziell. Die Planungsentscheidungen werden dabei durch Ingenieurinnen und Ingenieure mit entsprechender Expertise getroffen, was hohe manuelle Aufwände verursacht. Aktuelle Forschungsarbeiten befassen sich daher mit der Automatisierung des Planungsvorgangs. Basis für die aktuellen Ansätze zur automatisierten Planung von Montageanlagen ist in den meisten Fällen ein digitales Modell (Abschnitt 3.1) der relevanten Domänen Produkt, Prozess, Ressourcen und Fähigkeiten.

Bestehende Arbeiten zur automatisierten Planung von Montageanlagen fokussieren entweder einen Planungsschritt oder betrachten verschiedene Planungsschritte nacheinander. Zur Auswahl technisch geeigneter Ressourcen auf Grundlage einer Beschreibung des durchzuführenden Prozesses existieren bereits umfangreiche Ansätze (Abschnitt 3.2), die darauf basieren, Prozessanforderungen und Ressourcenfähigkeiten abzugleichen.

Auch die Austaktung von Montagelinien wurde in der Literatur bereits von vielen Autorinnen und Autoren betrachtet (Abschnitt 3.3). Hier ist allerdings anzumerken, dass die präsentierten Methoden und Algorithmen typischerweise starke Einschränkungen aufweisen. Insbesondere die Auswahl von Ressourcen und die Berücksichtigung von Kosten als Optimierungskriterium werden oft nicht betrachtet. Daneben existieren meist Einschränkungen im Hinblick auf den durchzuführenden Prozess oder die geplante Linie. Alternative Schritte im durchzuführenden Prozess oder parallele Stationen in der geplanten Linie werden zum Beispiel häufig nicht berücksichtigt.

Arbeiten, die sich mit der Positionierung von Ressourcen befassen (Abschnitt 3.4), beschäftigen sich meist mit einem spezifischen Ressourcentyp. Häufig stehen dabei Industrieroboter im Fokus. Zur Planung von Sensorposen existiert ebenfalls umfangreiche Literatur. Einige Ansätze behandeln auch die Anordnung verschiedener Betriebsmittelarten, allerdings muss das Strukturlayout manuell definiert werden und es wird nur eine Station und keine ganze Linie geplant.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass für viele Planungsentscheidungen bereits Methoden zur Automatisierung existieren. Bei der Planung von Montagelinien bestehen allerdings

starke Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Schritten, die von den existierenden Ansätzen nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt werden. Insbesondere ist der Autorin keine Methode bekannt, die die Abhängigkeiten zwischen Auswahl der Betriebsmittel, Austaktung der Linie sowie Anordnung der Ressourcen hinreichend berücksichtigt.

Abbildung 3-5 gibt einen Überblick über die betrachteten Forschungsthemen und den jeweils bestehenden Forschungsbedarf, der von dieser Arbeit adressiert wird. Zum einen werden dazu existierende Ansätze zur Unterstützung einzelner Planungsentscheidungen weiterentwickelt, zum anderen werden bestehende Methoden und Modelle verknüpft, um bessere Planungsergebnisse zu erzielen. Ziel ist dabei eine Methode zur automatisierten Layoutplanung von Montagelinien, welche die vielfältigen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Planungsentscheidungen berücksichtigt (Abschnitt 4 und 4.1).

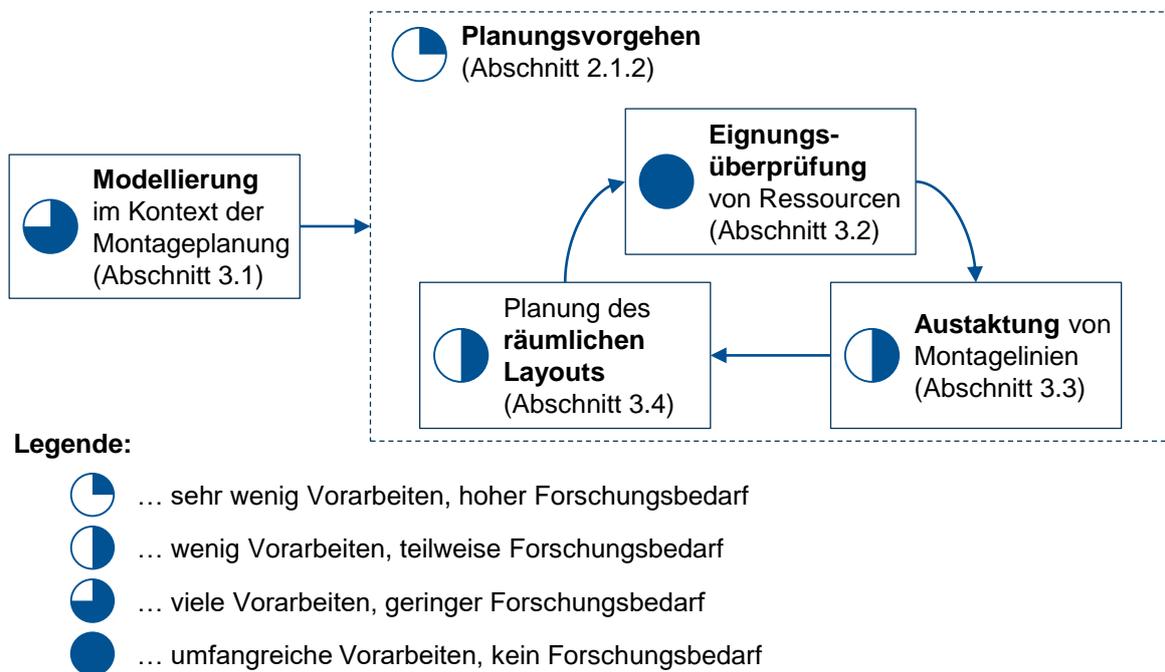


Abbildung 3-5: Überblick über den Forschungsbedarf in den betrachteten Themenfeldern

4 Zielsetzung, Lösungskonzept und Publikationen

Ziel der vorliegenden Dissertation ist, wie in Abschnitt 1.1 dargelegt, eine Methode zur automatisierten Layoutplanung von Montagelinien, insbesondere für den Einsatz in der Automobilbranche sowie bei Herstellern von Sondermaschinen, zu erarbeiten. Basierend auf einem Modell des zu montierenden Produkts und einer Beschreibung des durchzuführenden Prozesses sollen passende Ressourcen ausgewählt, auf Stationen der Linie verteilt und geometrisch angeordnet werden. Im Folgenden werden Teilziele zur Erarbeitung eines solchen Systems hergeleitet (Abschnitt 4.1). Anschließend wird das Konzept des erarbeiteten Planungssystems präsentiert und die Form der Ergebnisdarstellung in der vorliegenden Dissertation erläutert (Abschnitt 4.2 und 4.3).

4.1 Definition von Teilzielen

Zur Umsetzung des übergeordneten Ziels einer automatisierten Layoutplanung von Montageanlagen lassen sich auf Basis der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Grundlagen zur Montageplanung und der in Abschnitt 3.5 dargestellten Analyse des Stands des Wissens folgende Teilziele formulieren:

Teilziel 1 – Umfassendes Informationsmodell

Grundlage für ein System zur automatisierten Layoutplanung von Montagelinien sind umfangreiche Informationen über die jeweilige Planungsaufgabe und die für die Montageaufgabe zur Verfügung stehenden Ressourcen, die in angemessener maschinenlesbarer Form vorliegen müssen. Um zu gewährleisten, dass die Informationen korrekt interpretiert und weiterverarbeitet werden können, wird ein entsprechendes Informationsmodell benötigt. Je nach im System berücksichtigten Planungsentscheidungen müssen dabei verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Für ein umfassendes Planungssystem, wie es in dieser Arbeit angestrebt wird, muss das Modell die notwendigen Informationen für alle Planungsschritte (Ressourcenauswahl, Linien austaktung und Ressourcenpositionierung) abbilden. Ein solch *umfassendes Informationsmodell* ist daher das erste Teilziel.

Teilziel 2 – Berücksichtigung von Wechselwirkungen

Die verschiedenen Planungsentscheidungen sind stark miteinander verknüpft (Abbildung 4-1). Die Auswahl der Ressourcen und die Austaktung der Linie beeinflussen sich gegenseitig über die Geschwindigkeit der gewählten Ressourcen. Die Auswahl langsamerer Ressourcen führt zu höheren Taktzeiten, während geforderte kür-

zere Taktzeiten die Auswahl schnellerer Ressourcen notwendig machen. Die Austaktung der Linie und die Positionierung der Ressourcen sind über die Zuweisung von Ressourcen zu Stationen miteinander verknüpft. Einerseits ist die Zuordnung von Prozessschritten mit ihren jeweiligen Ressourcen zu den verschiedenen Stationen im Rahmen der Austaktung eine notwendige Voraussetzung für die Positionierung der Ressourcen. Andererseits hat die Ressourcenplatzierung in der Station Auswirkungen auf die Zykluszeit und damit auf die Austaktung. Auswahl und Positionierung der Ressourcen sind schließlich durch Geometrie und Kinematik der gewählten Ressourcen miteinander verknüpft. Diese werden durch die Auswahl festgelegt und haben einen entscheidenden Einfluss auf die Positionierung. Umgekehrt können aber auch Anforderungen vonseiten der Anordnung Einfluss auf die Auswahl haben.

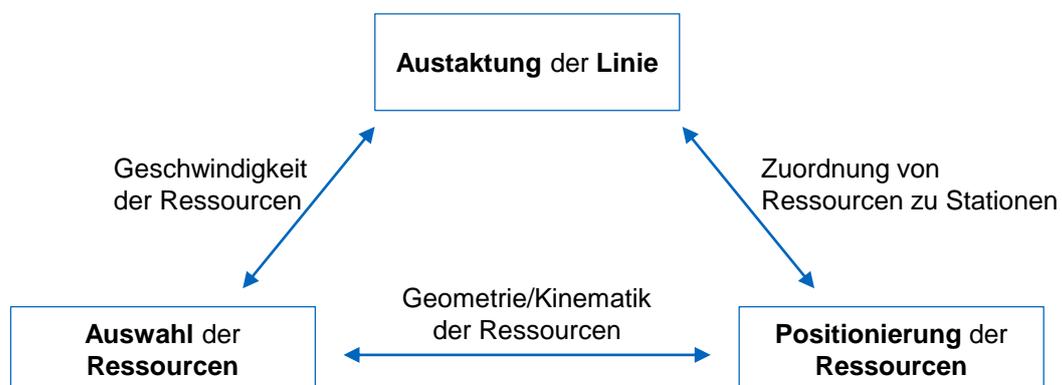


Abbildung 4-1: Abhängigkeiten zwischen Auswahl der Ressourcen, Austaktung der Linie und Positionierung der Ressourcen (nach LEIBER & REINHART (2021))

Die Vernachlässigung dieser Wechselwirkungen bei der Planung kann einen negativen Einfluss auf die Qualität des Planungsergebnisses haben. Umgekehrt ermöglicht die Beachtung der Abhängigkeiten die Ermittlung eines Gesamtoptimums. Das zweite Teilmziel ist daher eine Planungsmethode, welche die *Wechselwirkungen* zwischen den Planungsentscheidungen *berücksichtigt*.

Teilziel 3 – Flexible Methode zur Linien austaktung

Im Planungsschritt der Linien austaktung werden die durchzuführenden Prozessschritte den Stationen der Linie zugewiesen. Dafür wird ein entsprechendes Optimierungsproblem formuliert und gelöst. Im angestrebten Planungssystem ist das Ziel der Optimierung die Minimierung der Anlagenkosten unter Einhaltung der geforderten Taktzeit. Die Auswahl von Ressourcen ist in das betrachtete Optimierungsproblem zu integrieren. Hierbei kann davon ausgegangen werden, dass bereits eine Vorauswahl auf Basis der technischen Eignung getroffen wurde und nur noch nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten ausgewählt wird. Diese Annahme kann getroffen werden, da für die technische Eignungsüberprüfung bereits umfangreiche Vorarbeiten existieren, die für diesen

Schritt verwendet werden können (Abschnitt 3.2). Zur Erhöhung der Flexibilität sollen klassischerweise getroffene Einschränkungen im Hinblick auf den Prozess und die geplante Linie gelockert werden. Zum einen kann durch die Berücksichtigung alternativer Prozessschritte die Anwendbarkeit der Methode auf verschiedene Planungsszenarien verbessert werden. Zum anderen vergrößert die Möglichkeit, Stationen in der Linie zu parallelisieren, den Lösungsraum. Das dritte Teilziel ist daher eine *flexible Methode zur Linienausstattung*, die diese Aspekte berücksichtigt.

Teilziel 4 – Simulationsgestützte Methode zur Ressourcenanordnung

Basierend auf einem Strukturlayout, also einer Liste der Stationen mit zugeordneten Ressourcen, entsteht durch die räumliche Anordnung der Ressourcen ein 3D-Layout der Linie. Hierzu werden den einzelnen Ressourcen Positionen zugewiesen und diese optimiert. Bei der Optimierung sind verschiedene Kriterien relevant. Einerseits ist die Qualität der Anordnung aus technischer Sicht zu bewerten. Andererseits hat die Anordnung aber auch einen Einfluss auf die Kosten einer Linie. Im entworfenen Planungssystem sollen beide Aspekte berücksichtigt werden. Um das Ziel der Planung einer ganzen Montagelinie zu realisieren, müssen außerdem verschiedene Arten von Ressourcen positioniert werden können und die Planung muss mehr als eine Station umfassen. Für die Auswertung der geometrischen Zusammenhänge ist im Rahmen der Optimierung eine passende Simulation zu verwenden. Als viertes Teilziel wird daher eine *simulationsgestützte Methode zur Ressourcenanordnung* definiert.

Teilziel 5 – Wirtschaftlichkeitsbewertung für automatisierte Planungssysteme

Neben den gestellten technischen Anforderungen ist die Wirtschaftlichkeit entscheidend für den Nutzen des entwickelten Systems. Unternehmen benötigen als potenzielle Anwender eine klare Entscheidungsgrundlage für die Einführung eines Systems zur automatisierten Planung von Montagesystemen. Dabei sind verschiedene Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Der Aufwand zur Einführung eines automatisierten Planungssystems und insbesondere zur Erstellung der benötigten Ressourcenmodelle steht dabei Einsparungen im laufenden Betrieb gegenüber. Um eine klare Aussage zu ermöglichen, müssen die verschiedenen Einflussfaktoren analysiert und in einem Kostenmodell miteinander verknüpft werden. Auf dieser Basis kann die Einführung eines automatisierten Planungssystems objektiv mit der Weiterführung eines rein manuellen Planungsvorgehens verglichen werden. Folglich ist das fünfte Teilziel eine *Wirtschaftlichkeitsbewertung für automatisierte Planungssysteme*, die den potenziellen Nutzerinnen und Nutzern des Systems eine Entscheidungsgrundlage bieten kann.

4.2 Konzept des Planungssystems und Einordnung der eigenen Publikationen

Die vorliegende Dissertation adressiert den identifizierten Bedarf für die automatisierte Layoutplanung durch ein Planungssystem, das durch fünf eingebundene Veröffentlichungen beschrieben wird. Abbildung 4-2 gibt einen Überblick über den Aufbau des vorgeschlagenen Systems. Die Veröffentlichungen 1 bis 4 befassen sich jeweils mit einzelnen Teilen des Systems. Sie leiten für die betrachtete Systemkomponente jeweils den Forschungsbedarf ab, präsentieren die relevanten Vorarbeiten, beschreiben die erstellte Methode und evaluieren diese. Jede dieser Publikationen umfasst somit einen Durchlauf der DRM. Die Veröffentlichung 5 evaluiert das Gesamtsystem insbesondere im Hinblick auf seine Wirtschaftlichkeit und ist der DS-II zuzuordnen.

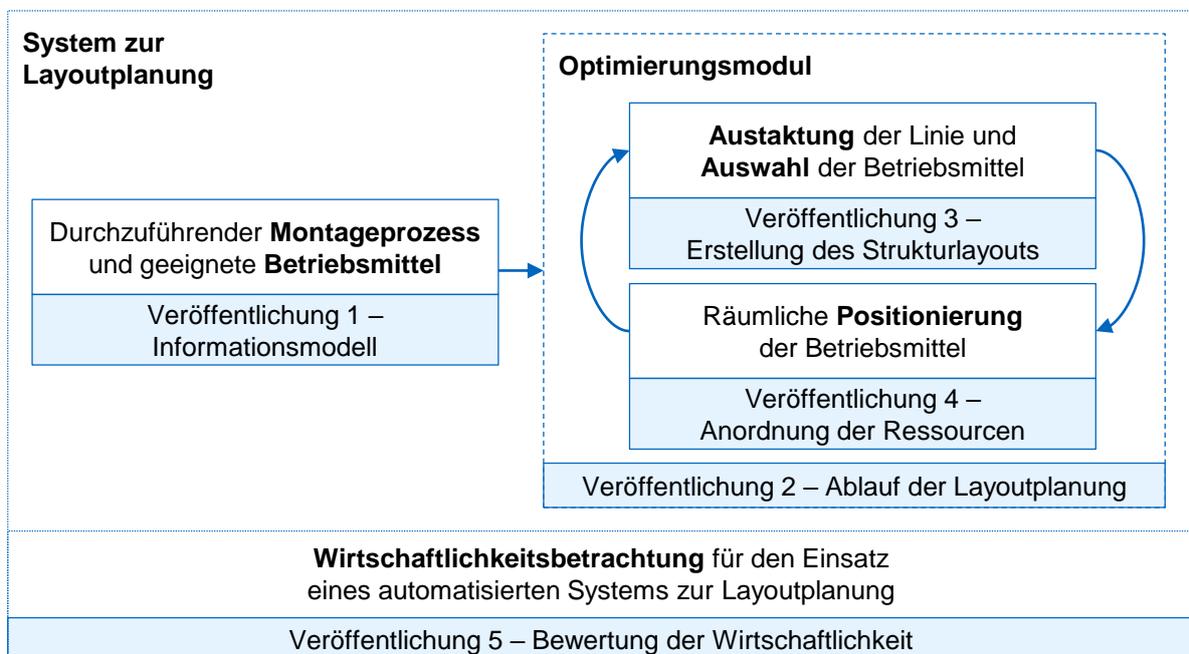


Abbildung 4-2: Überblick über den Aufbau des Planungssystems und die eingebundenen Veröffentlichungen

Die Layoutplanung basiert auf einer Beschreibung des durchzuführenden Prozesses in Form eines MVG, der um weitere Informationen angereichert ist. So enthält jeder Prozessschritt eine Liste an Betriebsmitteln, die aus technischer Sicht zu seiner Durchführung geeignet sind, und Informationen dazu, welcher Bereich des Produkts dazu erreicht werden muss. Veröffentlichung 1 beschreibt ein erweitertes PPR-Modell, um Prozessanforderungen und Ressourcenfähigkeiten zu beschreiben und miteinander abzugleichen. Auf dieser Basis können für die einzelnen Schritte eines Produktionsprozesses technisch geeignete Ressourcen vorausgewählt werden. Neben dem Prozessmodell werden für die Planung Randbedingungen wie die

geforderte maximale Taktzeit oder die Flächenkosten am geplanten Standort der Anlage benötigt.

Das Optimierungsmodul wählt das aus wirtschaftlicher Sicht sinnvollste der vorausgewählten Betriebsmittel für jeden Prozessschritt aus und ordnet diese zu einem 3D-Layout der Anlage an. Dabei bestehen enge Abhängigkeiten zwischen der Auswahl der Betriebsmittel und deren Anordnung. Veröffentlichung 2 formuliert daher ein zweistufiges Optimierungsproblem, das beide Planungsentscheidungen (in abstrahierter Form) simultan betrachtet. So können Wechselwirkungen berücksichtigt und ein Gesamtoptimum angestrebt werden. Zur Lösung des Optimierungsproblems wird ein geschachtelter genetischer Algorithmus verwendet.

Die obere Ebene des zweistufigen Optimierungsverfahrens befasst sich mit der Erstellung des Strukturlayouts der Anlage, also der Zuteilung von Prozessschritten zu Stationen und der Auswahl eines Betriebsmittels für jeden Prozessschritt. Veröffentlichung 3 beschäftigt sich mit dieser Planungsentscheidung und präsentiert hierfür ein detailliertes mathematisches Optimierungsmodell. Dabei wird für eine geforderte Taktzeit der Linie die optimale Lösung hinsichtlich der Kosten ermittelt. Zur Lösung dieses Optimierungsproblems wird ein angepasster genetischer Algorithmus verwendet. Für die Fitnessbewertung eines Lösungsvorschlags kann das Ergebnis des unteren Optimierungsproblems zur Betriebsmittelanordnung berücksichtigt werden.

Veröffentlichung 4 beschreibt die untere Ebene des zweistufigen Optimierungsverfahrens, die Positionierung der Betriebsmittel. Die ausgewählten Ressourcen eines Strukturlayouts werden dabei räumlich zu einem 3D-Layout angeordnet. Für die Erstellung und Optimierung des Layouts wird ein genetischer Algorithmus eingesetzt. Zur Bewertung eines Layoutentwurfs wird eine 3D-Mehrkörpersimulation durchgeführt. Die Eigenschaften des so generierten Anlagenentwurfs (Taktzeit, Aufbaukosten, Positionierungsqualität) fließen dann in die Bewertung des zugehörigen Strukturlayouts ein.

Ergänzend zu den Veröffentlichungen 1 bis 4, die den Aufbau und die Funktionsweise des Planungssystems beschreiben, beschäftigt sich Veröffentlichung 5 mit den ökonomischen Auswirkungen des Einsatzes eines solchen Systems zur automatisierten Layoutplanung. Dabei werden verschiedene Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit identifiziert und eine Methodik entwickelt, um die Entscheidung, ob ein automatisiertes Planungssystem eingeführt werden soll, zu unterstützen. Anschließend werden verschiedene Szenarien betrachtet, die den sinnvollen Einsatzbereich und seine Grenzen illustrieren.

Die Kapitel 5 bis 7 enthalten jeweils eine Zusammenfassung der Publikationen sowie eine Darstellung der individuellen Beiträge der Autorin und der Autoren. Die originalen Veröffentlichungen können mittels folgender bibliographischer Informationen gefunden werden:

Veröffentlichung 1:

LEIBER ET AL. 2019

Leiber, D.; Hammerstingl, V.; Weiß, F.; Reinhart, G.: Automated design of multi-station assembly lines. *Procedia CIRP* 79 (2019), S. 137-142.

Veröffentlichung 2:

LEIBER & REINHART 2021

Leiber, D.; Reinhart, G.: A bi-level optimisation approach for assembly line design using a nested genetic algorithm. *International Journal of Production Research* 59 (2021) 24, S. 7560-7575.

Veröffentlichung 3:

LEIBER ET AL. 2021

Leiber, D.; Vuong, A.-T.; Reinhart, G.: Alternative Subgraphs Assembly Line Balancing Problem with Resource Selection and Parallel Stations. *Engineering Optimization* 54 (2021) 11, S. 1903-1918.

Veröffentlichung 4:

LEIBER ET AL. 2022

Leiber, D.; Eickholt, D.; Vuong, A.-T.; Reinhart, G.: Simulation-based layout optimization for multi-station assembly lines. *Journal of Intelligent Manufacturing* 33 (2022), S. 537-554.

Veröffentlichung 5:

LEIBER & REINHART 2022

Leiber, D.; Reinhart, G.: Economic efficiency of automated manufacturing systems design. *Procedia CIRP* 112 (2022), S. 68-72.

4.3 Individuelle Leistungsbeiträge der Autorin

Die Publikationen, auf denen diese Dissertation basiert, sind in Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern entstanden. Die Autorin der vorliegenden Doktorarbeit war jedoch als Erstautorin bei der Erstellung aller fünf eingebundenen Veröffentlichungen federführend. In den Kapiteln 5 bis 7 werden jeweils im Anschluss an die Zusammenfassung der Publikationen der individuelle Leistungsbeitrag der Erstautorin sowie die Beiträge der Co-Autoren dargestellt. Die angegebene prozentuale Beteiligung setzt sich zusammen aus den Anteilen der Autorin und der Autoren an der Konzeption der Veröffentlichung, der Erarbeitung der Ergebnisse und der Ausarbeitung der Publikation.

5 Veröffentlichung 1 – Informationsmodell

In Veröffentlichung 1 stellen LEIBER ET AL. (2019) ein Konzept zur automatisierten Planung von Montagelinien vor. Sie identifizieren die notwendigen Teilschritte einer Planungsmethodik und entwickeln ein Informationsmodell für die Modellierung der notwendigen Eingangsinformationen.

Das präsentierte Vorgehen umfasst die Auswahl geeigneter Betriebsmittel, die Austaktung der Linie sowie die geometrische Anordnung der Ressourcen. Umfangreiche Kenntnisse über das zu montierende Produkt, den durchzuführenden Montageprozess sowie die verfügbaren Ressourcen sind Voraussetzung für diese Planungsentscheidungen. Um den Prozess der Anlagenplanung zu automatisieren, müssen diese Informationen in definierter, maschinell lesbarer Form vorliegen. In der Publikation wird daher ein Informationsmodell für die drei Domänen Produkt, Prozess und Ressource vorgestellt. Abbildung 5-1 gibt einen Überblick über das Informationsmodell.

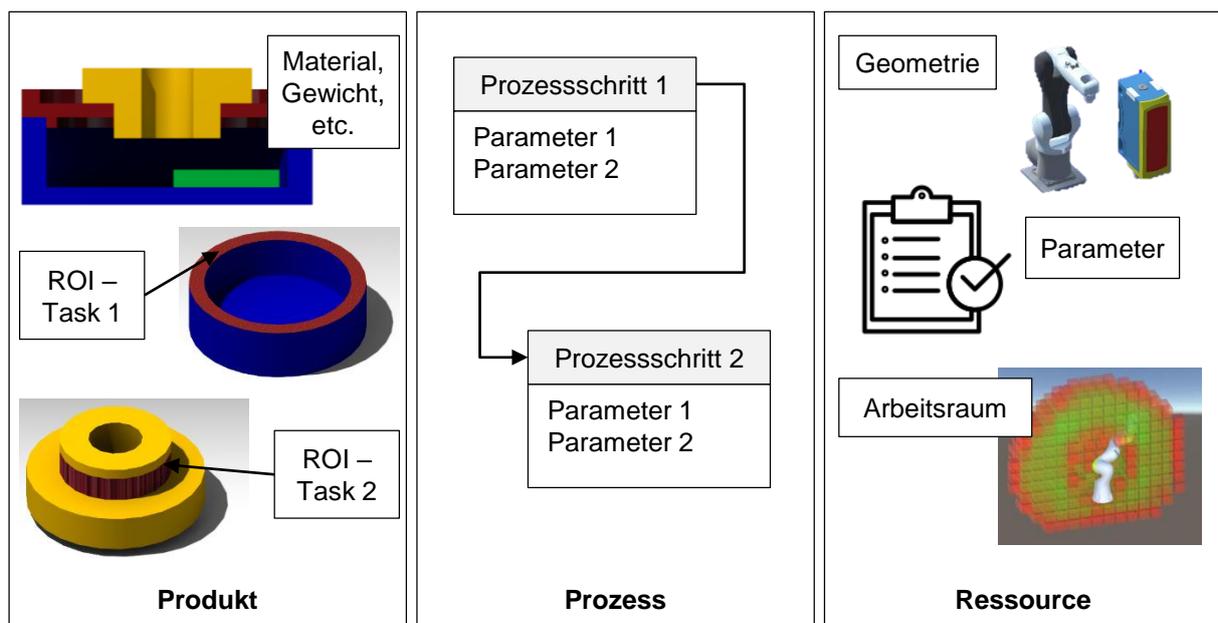


Abbildung 5-1: Überblick über das Informationsmodell (nach LEIBER ET AL. (2019))

Die Eigenschaften des *Produkts* (geometrische Gestalt, Material, ...) werden während des Produktentwicklungsprozesses festgelegt. Das Produktmodell basiert auf dem in der Konstruktion erstellten CAD-Modell, verknüpft mit weiteren für den Montageprozess relevanten Informationen. Bei der Modellierung des Montageprozesses wird für jeden Prozessschritt festgelegt, an welcher Stelle des Produkts (ROI) er durchgeführt werden soll. Dies geschieht durch Definition eines entsprechenden Bereichs am Produktmodell.

Der *Montageprozess* wird durch einen Prozessgraphen abgebildet, dessen Knoten die einzelnen Prozessschritte repräsentieren, während die Kanten die Vorrangbeziehungen zwischen

den Schritten abbilden. Die Bezeichnung der einzelnen Prozessschritte muss semantisch eindeutig sein, da nur so Betriebsmittel identifiziert werden können, die die entsprechenden Fähigkeiten besitzen. Bei der Modellierung des Montageprozesses werden daher definierte Prozessbausteine verwendet. Jeder dieser Prozessschritte verfügt über Parameter, die seine Eigenschaften beschreiben. Zur Definition einer konkreten Montageaufgabe werden vordefinierte Prozessschritte kopiert und die Werte ihrer Parameter bestimmt. Diese Prozessbausteine erfüllen die Funktion von Skills in einem PPRS-Modell und werden von dem Nutzer beziehungsweise der Nutzerin festgelegt.

Die Modelle der verfügbaren *Ressourcen* enthalten alle Informationen, die zur Überprüfung ihrer technischen Eignung für eine bestimmte Aufgabe sowie ihre Verwendung in einem Anlagenentwurf notwendig sind. Dies beinhaltet Informationen darüber, welche Prozessschritte sie durchführen können, Parameter, die technische Eigenschaften repräsentieren, sowie wirtschaftliche Kenngrößen. Neben diesen semantischen Informationen enthalten die Ressourcenmodelle geometrische und kinematische Partialmodelle sowie eine Beschreibung ihres Arbeitsraums.

Abbildung 5-2 zeigt den individuellen Leistungsbeitrag der Erstautorin und die prozentuale Beteiligung der Co-Autoren an Veröffentlichung 1.

Daria Leiber, 75 %	VH	FW	GR
--------------------	----	----	----

VH... Veit Hammerstingl, 10 % FW... Felix Weiß, 10 % GR... Gunther Reinhart, 5 %

Abbildung 5-2: Beteiligung der Erstautorin sowie der einzelnen Co-Autoren an der Erstellung von Veröffentlichung 1

6 Veröffentlichung 2 – Ablauf der Layoutplanung

In Veröffentlichung 2 beschreiben LEIBER & REINHART (2021) einen Algorithmus, der das aus wirtschaftlicher Sicht sinnvollste der vorausgewählten Betriebsmittel für jeden Prozessschritt auswählt und diese zu einem 3D-Layout der Anlage anordnet. Zwischen der Auswahl der Betriebsmittel und deren Anordnung bestehen enge Abhängigkeiten und Wechselwirkungen. Ein hinsichtlich der reinen Anschaffungskosten günstiges Betriebsmittel kann beispielsweise durch einen höheren Flächenverbrauch oder eine längere Taktzeit indirekt höhere Kosten verursachen als ein in der Anschaffung teureres Betriebsmittel. Auswahl und Anordnung werden daher innerhalb eines Bilevel-Optimierungsproblems durchgeführt. Abbildung 6-1 zeigt den Ablauf des entwickelten Algorithmus.

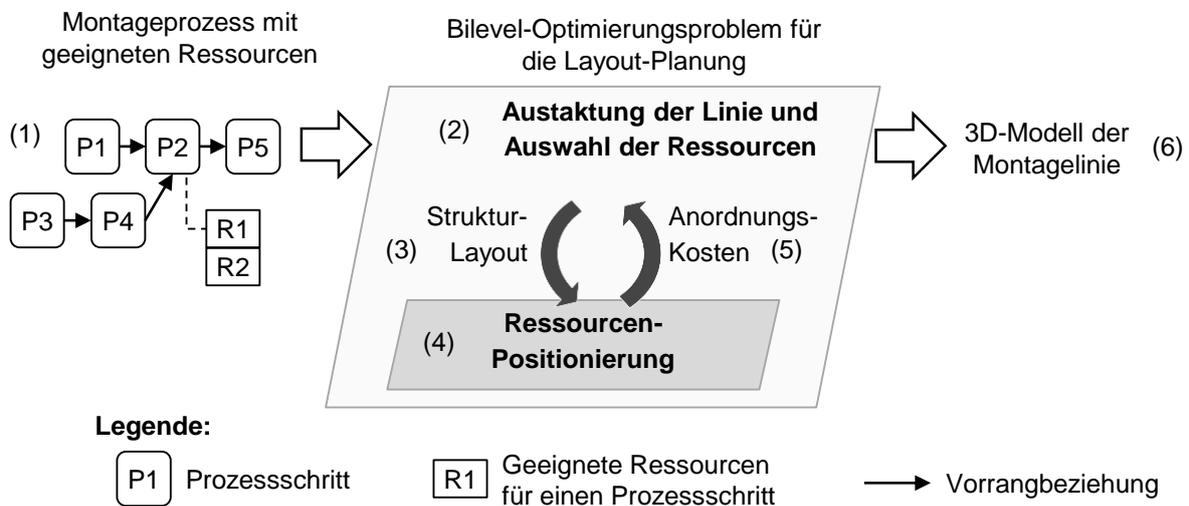


Abbildung 6-1: Ablauf des Optimierungsverfahrens (nach LEIBER & REINHART (2021))

Ziel der automatisierten Layoutplanung ist die Minimierung der Kosten der Linie. Die Zielfunktion der Optimierungsaufgabe lautet

$$\min_{\vec{x}_o} k_{ges}(\vec{x}_o, k_{pos_min}(\vec{x}_o)) \quad (7)$$

$$\text{mit } k_{pos_min}(\vec{x}_o) = \min_{\vec{x}_i} k_{pos}(\vec{x}_o, \vec{x}_i)$$

wobei k_{ges} die Gesamtkosten der Linie sind. Diese hängen von den Variablen \vec{x}_o des oberen Optimierungsproblems, die die Reihenfolge der Tasks und die Auswahl der Betriebsmittel repräsentieren, und den Kosten k_{pos_min} , die sich aus der Anordnung der gewählten Ressourcen ergeben, ab. Die Anordnungskosten k_{pos} und damit die minimalen Anordnungskosten k_{pos_min} sind sowohl von den Variablen \vec{x}_o des äußeren Optimierungsproblems als auch von den Variablen \vec{x}_i des inneren Optimierungsproblems, die die Positionierung der Ressourcen abbilden,

abhängig. Das Problem entspricht dem in Formel (6) dargestellten Spezialfall eines Bilevel-Optimierungsproblems.

Zur Ermittlung der Variablen \vec{x}_i beziehungsweise der Anordnungskosten k_{pos_min} wird das innere Optimierungsproblem

$$\min_{\vec{x}_i} k_{pos}(\vec{x}_o, \vec{x}_i) \mid \vec{x}_o = \text{konstant} \quad (8)$$

gelöst, wobei die \vec{x}_o als gegeben betrachtet werden. Das bedeutet, dass für eine gegebene Auswahl an Tasks und Betriebsmitteln eine Anordnungsoptimierung durchgeführt wird, um die Kosten, die sich aus der Anordnung ergeben, zu ermitteln.

Zur Lösung des formulierten Bilevel-Optimierungsproblems wird ein geschachtelter genetischer Algorithmus verwendet. Das entwickelte Optimierungsmodell und der Algorithmus werden in der Publikation anhand abstrahierter Beispiele evaluiert und validiert. Dabei werden die Ressourcen durch Würfel verschiedener Größe repräsentiert. Dies hat den Vorteil, dass die Qualität der Ergebnisse leichter beurteilt werden kann. Im einfachsten Fall kann die ideale Lösung analytisch ermittelt und als Referenz für die mit dem Optimierungsalgorithmus erzielten Resultate verwendet werden.

Es konnte gezeigt werden, dass der Algorithmus erfolgreich ein Gleichgewicht zwischen den Vor- und Nachteilen verschiedener Betriebsmittel herstellt und valide Layouts erzeugt. In einem Beispiel, in dem die Ressourcen nur einer Station ausgewählt und platziert werden, wich die durch den Algorithmus gefundene Lösung durchschnittlich um 1,09 % vom theoretischen Idealwert ab.

Abbildung 6-2 zeigt den individuellen Leistungsbeitrag der Erstautorin und die prozentuale Beteiligung des Co-Autoren an Veröffentlichung 2.

Daria Leiber, 90 %	GR
--------------------	----

GR... Gunther Reinhart, 10 %

Abbildung 6-2: Beteiligung der Erstautorin sowie des Co-Autors an der Erstellung von Veröffentlichung 2

6.1 Veröffentlichung 3 – Erstellung des Strukturlayouts

In Veröffentlichung 3 beschäftigen sich LEIBER ET AL. (2021) mit dem äußeren Optimierungsproblem, der Erstellung des Strukturlayouts. Dabei werden die durchzuführenden Prozessschritte auf die Stationen der Linie verteilt und für jeden Prozessschritt wird ein Betriebsmittel ausgewählt. Es handelt sich also um ein ALB-Problem.

Das präsentierte Optimierungsmodell berücksichtigt die Wahl zwischen alternativen Prozessschritten und erlaubt die Planung paralleler Stationen in der Linie. Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Linienkosten. Die geforderte Taktzeit wird dabei als Randbedingung berücksichtigt. Grundlage für die Erstellung des Strukturlayouts ist der Montageprozess des zu montierenden Produkts, definiert durch einen Prozessgraphen. Im Prozessgraph werden die Tasks durch Knoten und die Vorrangbeziehungen durch Kanten abgebildet. Die Verwendung spezieller Knoten an Verzweigungen ermöglicht auch die Modellierung von Prozessalternativen. In Abbildung 6-3 sind die Eingangsinformationen und das Ergebnis des Optimierungsmodells dargestellt.

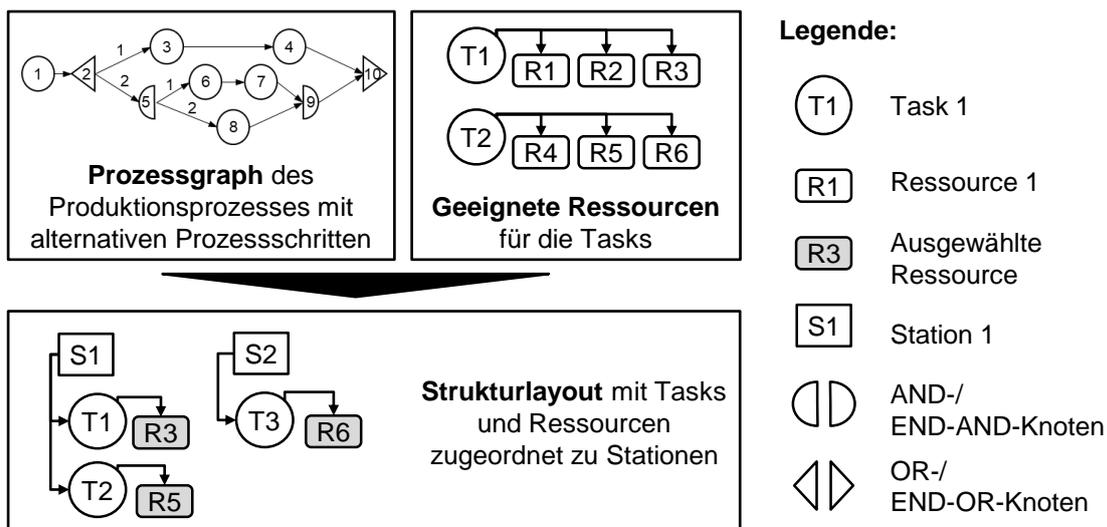


Abbildung 6-3: Eingangsinformationen und Ergebnis des präsentierten Optimierungsmodells (nach LEIBER ET AL. (2021))

In der Publikation wird ein genetischer Algorithmus zur Lösung des Problems entwickelt. Für einen effizienten Verlauf des Optimierungsverfahrens müssen die genetischen Operatoren und die Codierung der Lösungskandidaten an die jeweilige Problemstellung angepasst werden. Im vorliegenden Anwendungsfall entspricht jedes Individuum einer möglichen Zuordnung der Tasks zu den Stationen der Linie, wobei für jeden Task eine geeignete Ressource ausgewählt ist. Um von einer Generation zur nächsten zu gelangen, werden zwei Rekombinationsoperatoren und fünf Mutationsoperatoren verwendet. Eine Selektionsstrategie entscheidet, aus welchen Individuen der Population mithilfe der Operatoren die nächste Generation

erzeugt wird, und ein Reparaturmechanismus sorgt dafür, dass die entstehenden Individuen valide sind.

Der vorgeschlagene Optimierungsalgorithmus wird anhand von 486 Referenzbeispielen evaluiert. Dabei werden zunächst bekannte Probleme ohne Ressourcenauswahl und parallele Stationen gelöst, um die Funktionsweise des Algorithmus zu validieren. Anschließend werden die Beispiele erweitert, um auch die Auswahl von Ressourcen und die Planung paralleler Funktionen zu evaluieren.

Bei der Optimierung der bekannten Referenzprobleme wurde in 56 % der Fälle die ideale Lösung gefunden und in weiteren 26 % der Optimierungsläufe eine Lösung, die nur um eine Station vom Ideal abweicht. Lediglich in 3 % der Berechnungen lag die gefundene Lösung um mehr als drei Stationen daneben. Bei der zusätzlichen Betrachtung der Ressourcenauswahl wurde in 97 % der Fälle eine Lösung gefunden, die besser als der Erwartungswert bei zufälliger Ressourcenauswahl ist. Die durchschnittlichen Ressourcenkosten pro Task lagen dabei um 23,9 % unter dem Erwartungswert bei zufälliger Auswahl. Um die Auswirkungen paralleler Stationen zu untersuchen, wurde die geforderte Taktzeit halbiert. Bei der trivialsten Lösung, einer einfachen Verdoppelung der Linie, würden sich die Ressourcenkosten pro Task um den Faktor 2 erhöhen. Tatsächlich stiegen sie aber nur um den Faktor 1,32.

Abbildung 6-4 zeigt den individuellen Leistungsbeitrag der Erstautorin und die prozentuale Beteiligung der Co-Autoren an Veröffentlichung 3.

Daria Leiber, 75 %	AV	GR
--------------------	----	----

AV... Anh-Tu Vuong, 20 % GR... Gunther Reinhart, 5 %

Abbildung 6-4: Beteiligung der Erstautorin sowie der einzelnen Co-Autoren an der Erstellung von Veröffentlichung 3

6.2 Veröffentlichung 4 – Anordnung der Ressourcen

In Veröffentlichung 4 fokussieren LEIBER ET AL. (2022) das innere Optimierungsproblem, die Anordnung der Ressourcen basierend auf einem gegebenen Strukturlayout. Dazu werden zum einen die für die Positionierung relevanten Aspekte des Ressourcenmodells detailliert und zum anderen ein genetischer Algorithmus präsentiert, um die Ressourcen zu einem dreidimensionalen Modell der Linie zu kombinieren. Für die Fitnessbewertung wird dabei eine Mehrkörpersimulation eingesetzt.

Neben der Erstellung des Strukturlayouts ist die räumliche Anordnung der gewählten Ressourcen ein wichtiger Schritt in der Planung einer Montagelinie. Bei der Optimierung der Ressourcenpositionierung werden die Kosten für den Zusammenbau der Anlage selbst, die verursachten Flächenkosten sowie die Qualität der Ressourcenpositionierung aus funktionaler Sicht berücksichtigt. Auch die Zeit für die Durchführung der Prozessschritte wird durch die Anordnung der Ressourcen beeinflusst und kann simulativ ermittelt werden. Neben der Einhaltung der maximalen Taktzeit sind Überschneidungsfreiheit und Erreichbarkeit der ROIs durch die Ressourcen Bedingungen für ein zulässiges Layout.

Voraussetzung für die automatisierte Erstellung eines 3D-Layouts sind umfangreiche Informationen über die beteiligten Ressourcen. Insbesondere Geometrie, Informationen zum Verbauen der Ressource sowie eine Bewertung, welche Relativpositionen zwischen Produkt und Ressourcen vorteilhaft sind, müssen bekannt sein. In der Publikation werden diese Aspekte des Betriebsmittelmodells daher vertieft betrachtet. Die Bewertungsfunktion der Relativposition ist vom jeweiligen Betriebsmittel abhängig. Es werden daher beispielhafte Funktionen für Kameras und Industrieroboter beschrieben und eine Methode präsentiert, um eine geeignete Bewertungsfunktion für weitere Ressourcen zu ermitteln.

Zur Lösung des Optimierungsproblems wird ein genetischer Algorithmus verwendet. Ein Individuum repräsentiert dabei ein mögliches Layout mit einer Pose (Position und Orientierung) für jede Ressource. Die Auswahl geeigneter Mutations- und Rekombinationswahrscheinlichkeiten und -operatoren erfolgt mittels einer Parameterstudie.

Der vorgestellte Ansatz wird anhand von drei zunehmend komplexen Beispielen evaluiert. Im ersten Beispiel werden ausschließlich Kameras positioniert und die Fähigkeit, ein kollisionsfreies Layout zu erzeugen sowie mit Hindernissen im Kamerablickfeld umzugehen, demonstriert. Im zweiten Beispiel werden verschiedene Industrieroboter platziert und die Einbindung der Simulation zur Taktzeitermittlung gezeigt. Das letzte Beispiel umfasst schließlich eine Linie mit mehreren Stationen. Jedes der Beispielprobleme wurde zehnmal gelöst. Abbildung 6-5 zeigt für jedes Beispiel jeweils das Ergebnis eines Optimierungslaufs.

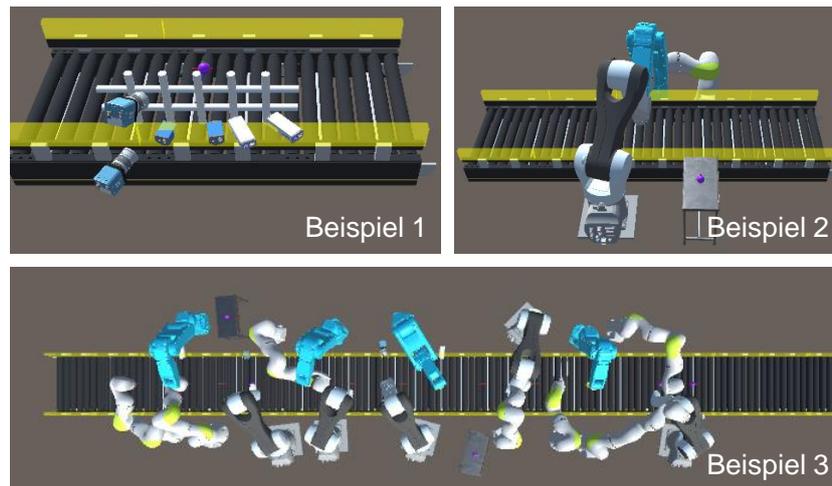


Abbildung 6-5: Resultierende Layoutvorschläge der drei Beispiele (nach LEIBER ET AL. (2022))

Anhand der betrachteten Beispiele konnte demonstriert werden, dass der vorgeschlagene Algorithmus in der Lage ist, valide Layouts zu erzeugen und dabei zwischen verschiedenen Aspekten abzuwägen. Im ersten Beispiel wurden beispielsweise nicht alle Kameras direkt auf dem Förderband montiert, was zu minimalen Montagekosten, aber zu Einschränkungen in der Qualität der erzeugten Aufnahmen geführt hätte. In den Ergebnissen des zweiten Beispiels war hingegen die Abwägung zwischen der Minimierung des Flächenbedarfs und der funktional vorteilhaftesten Positionierung zu erkennen. Anhand von Beispiel 3 konnte schließlich gezeigt werden, dass der Algorithmus auch für Linien mit mehreren Stationen zuverlässig funktioniert.

Abbildung 6-6 zeigt den individuellen Leistungsbeitrag der Erstautorin und die prozentuale Beteiligung der Co-Autoren an Veröffentlichung 4.

Daria Leiber, 55 %	DE	AV	GR
--------------------	----	----	----

DE... David Eickholt, 20 % AV... Anh-Tu Vuong, 20 % GR... Gunther Reinhart, 5 %

Abbildung 6-6: Beteiligung der Erstautorin sowie der einzelnen Co-Autoren an der Erstellung von Veröffentlichung 4

7 Veröffentlichung 5 – Bewertung der Wirtschaftlichkeit

In Veröffentlichung 5 stellen LEIBER & REINHART (2022) eine Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit automatisierter Anlagenplanungssysteme vor. Das Vorgehen kann genutzt werden, wenn Unternehmen vor der Entscheidung stehen, ob sich die Einführung eines automatisierten Planungssystems für die Anlagenplanung in ihrem Fall lohnt. Das entwickelte Vorgehen basiert auf der Kapitalwertmethode, die den Wert einer Investition abgezinst auf den aktuellen Zeitpunkt als Entscheidungsgrundlage verwendet. Anhand dieser Kenngröße werden die alternativen Szenarien „Einführung eines Planungssystems“ und „Weiterführung der manuellen Planung“ verglichen. In der Publikation werden zunächst die Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit analysiert und ein entsprechendes Kostenmodell aufgestellt. Darin werden sowohl die Investitionskosten, die bei Einführung des Systems einmalig anfallen, als auch die laufenden Kosten während seines Betriebs berücksichtigt.

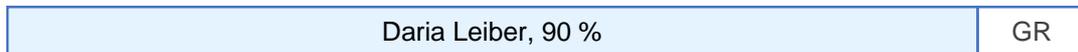
Die initialen Kosten für die Implementierung eines Planungssystems setzen sich zusammen aus den Anschaffungskosten für die benötigte Hard- und Software, den organisatorischen Kosten der Einführung (zum Beispiel Schulungen oder Aufwände für die Installation) sowie den Aufwänden für die Befüllung der Ressourcendatenbank, die von den meisten Planungssystemen benötigt wird. Da insbesondere der Aufwand, der mit der manuellen Modellierung von Ressourcen einhergeht, in der Praxis als Hemmnis für die Einführung eines automatisierten Planungssystems gesehen wird, wurde dieser genauer betrachtet. Die benötigte Zeit (und damit die Kosten) hängt maßgeblich von der Anzahl der zu modellierenden Ressourcen ab. Allerdings ist die Beziehung nicht linear, sondern die Zeit für die Modellierung einer Ressource nimmt mit zunehmender Erfahrung der durchführenden Person ab. Dieser Zusammenhang wurde durch Lernkurven abgebildet. Für die Weiterführung der manuellen Planung werden keine Investitionskosten angesetzt.

Die laufenden Kosten beinhalten für beide Alternativen die Personalkosten sowie im Falle der Nutzung eines Planungssystems die Wartungskosten oder mögliche Kosten für Softwarelizenzen im Abonnementmodell. Ziel der Einführung eines automatisierten Planungssystems ist die Einsparung von Arbeitszeit und damit Personalkosten. Wie viel Zeit eingespart werden kann, hängt vom erreichten Automatisierungsgrad des Systems ab, der daher auch für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit berücksichtigt wird.

Auf Basis des erstellten Kostenmodells wurden verschiedene Szenarien entwickelt und der Einfluss von Personalkosten pro Stunde, Anzahl der modellierten Ressourcen, Planungszeit pro Jahr sowie Automatisierungsgrad auf die Wirtschaftlichkeit beleuchtet. Dabei zeigte sich, dass der Einsatz eines automatisierten Planungssystems bereits bei moderaten Arbeitskosten

von circa 20 Euro pro Stunde wirtschaftlich vorteilhaft sein kann. Außerdem wurde deutlich, dass der erzielte Automatisierungsgrad einen starken Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat.

Abbildung 7-1 zeigt den individuellen Leistungsbeitrag der Erstautorin und die prozentuale Beteiligung des Co-Autors an Veröffentlichung 5.



GR... Gunther Reinhart, 10 %

Abbildung 7-1: Beteiligung der Erstautorin sowie des Co-Autors an der Erstellung von Veröffentlichung 5

8 Themenübergreifende Diskussion und Reflexion

Die in der vorliegenden Dissertation erläuterten Ergebnisse werden im Folgenden themenübergreifend diskutiert. Ziel der Arbeit war die Erstellung und Umsetzung einer Methode zur automatisierten Layoutplanung von Montagelinien. Um die Erreichung dieses Ziels zu beurteilen, wird im Folgenden zunächst die Erfüllung der in Abschnitt 4.1 definierten Teilziele analysiert (Abschnitt 8.1). Anschließend werden die erzielten Ergebnisse diskutiert und deren Bezug zur bestehenden Literatur aufgezeigt (Abschnitt 8.2).

8.1 Erfüllung der Teilziele

In Abschnitt 4.1 wurden aus dem übergeordneten Ziel der Arbeit die folgenden fünf Teilziele abgeleitet:

- Teilziel 1 - **Umfassendes Informationsmodell**, das die relevanten Daten für alle zu treffenden Planungsentscheidungen beinhaltet
- Teilziel 2 - **Berücksichtigung von Wechselwirkungen** zwischen den einzelnen Planungsentscheidungen
- Teilziel 3 - **Flexible Methode zur Linienausstattung**, die Ressourcenauswahl und Kostenoptimierung berücksichtigt
- Teilziel 4 - **Simulationsgestützte Methode zur Ressourcenanordnung** mit verschiedenen Ressourcentypen und mehreren Stationen
- Teilziel 5 - **Wirtschaftlichkeitsbewertung für automatisierte Planungssysteme**, um die Nutzung der Planungsmethode abzusichern

Teilziel 1 wurde maßgeblich in den Veröffentlichungen 1, 3 und 4 adressiert. Veröffentlichung 1 stellt ein Informationsmodell vor, das die relevanten Domänen Produkt, Prozess und Ressourcen umfasst. Veröffentlichung 3 spezifiziert die Modellierung des Prozesses, insbesondere im Hinblick auf die Abbildung von Vorrangbeziehungen und Prozessalternativen. Veröffentlichung 4 detailliert die Modellierung der Ressourcen hinsichtlich jener Aspekte, die für die Anordnung relevant sind.

Teilziel 2 wurde durch Veröffentlichung 2 berücksichtigt. Der dort beschriebene Algorithmus integriert die drei Planungsentscheidungen Ressourcenauswahl, Linienausstattung und Ressourcenanordnung in ein Optimierungsmodell. So können Wechselwirkungen zwischen den Entscheidungen berücksichtigt und ein Gesamtoptimum angestrebt werden.

Teilziel 3 wird durch Veröffentlichung 3 abgedeckt. Diese Publikation befasst sich mit einem Optimierungsproblem für die Linienausstattung, das die Ressourcenauswahl beinhaltet. Um die Flexibilität zu erhöhen, ermöglicht es außerdem die Wahl zwischen verschiedenen Prozessalternativen und die Planung von Linien mit parallelen Stationen.

Teilziel 4 wird durch das in Veröffentlichung 4 beschriebene Optimierungssystem erfüllt. Es erlaubt die automatische Generierung von dreidimensionalen Linienlayouts, die mehrere Stationen umfassen und verschiedene Ressourcentypen beinhalten.

Teilziel 5 korrespondiert mit den Inhalten von Veröffentlichung 5. Dort wird ein Vorgehen definiert, um zu bewerten, ob der Einsatz eines automatisierten Planungssystems wirtschaftlich ist. Außerdem werden verschiedene Szenarien analysiert. Dadurch wird ermittelt, unter welchen Rahmenbedingungen automatisierte Planungsmethoden, etwa die in dieser Dissertation erarbeitete, Vorteile bieten.

Insgesamt konnten die definierten Teilziele durch die in den Veröffentlichungen 1 bis 5 präsentierten Ergebnisse erreicht werden.

8.2 Bewertung der Ergebnisse

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde eine Methode zur automatisierten Layoutplanung von Montagelinien erstellt. Der grundlegende Ablauf der Planungsmethode ist in Abbildung 8-1 zusammengefasst, Details zu den einzelnen Schritten können den eingebundenen Veröffentlichungen entnommen werden. Im Folgenden wird dargestellt, wie die erzielten Ergebnisse auf bestehende Arbeiten aus der Literatur aufbauen beziehungsweise darüber hinausgehen. Außerdem werden bestehende Defizite der erstellten Methode aufgezeigt.

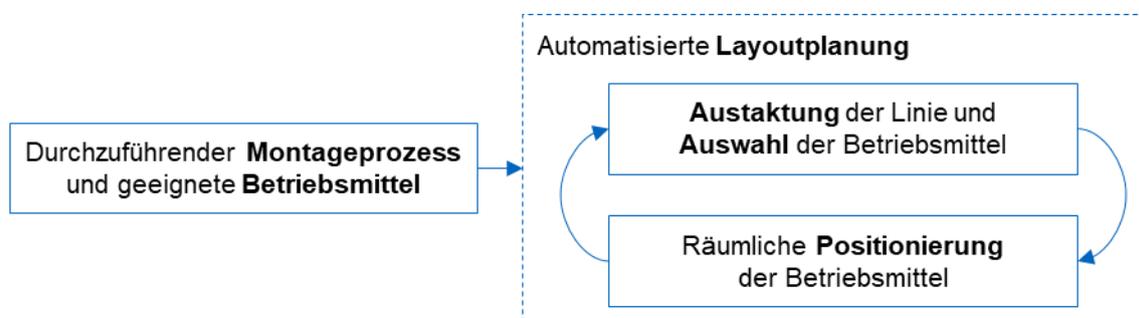


Abbildung 8-1: Überblick über den Ablauf der automatisierten Layoutplanung

Das für die Modellierung der notwendigen Eingangsinformationen verwendete Informationsmodell umfasst die drei Domänen Produkt, Prozess und Ressourcen. Diese Struktur ist an bestehende Modellierungsansätze aus dem Bereich der Montage, wie jene von BACKHAUS & REINHART (2017) oder AHMAD ET AL. (2018), angelehnt. Die Modellierung des Produkts und insbesondere die Beschreibung der ROI ist von HAMMERSTINGL (2020, S. 102-103) inspiriert. Das Prozessmodell nutzt zur Beschreibung der einzelnen Prozessschritte Bausteine, die individuell definiert werden können. Dabei können unter anderem bestehende Skill-Ontologien oder Taxonomien, wie sie beispielsweise bei HAMMERSTINGL & REINHART (2017) oder JÄRVENPÄÄ ET AL. (2019) zu finden sind, Orientierung bieten. Die Verknüpfung der einzelnen

Schritte zum gesamten durchzuführenden Montageprozess erfolgt in Form eines modifizierten Vorranggraphen, der auch die Abbildung von Prozessalternativen ermöglicht. Diese Modellierung ist eine Weiterentwicklung des Prozessgraphen von SCHOLL ET AL. (2009). Zusammenfassend ist das erarbeitete Ressourcenmodell deutlich umfangreicher als in der Literatur bestehende, da es verschiedene Aspekte wie Kinematik, Fähigkeiten und Arbeitsraumbewertung vereint und für unterschiedliche Betriebsmitteltypen genutzt werden kann. Für einzelne Teilaspekte wie die Arbeitsraumbewertung von Robotern existieren bereits Ansätze (zum Beispiel nutzen IZUI ET AL. (2013) auch die Manipulierbarkeit als Optimierungskriterium bei der Positionierung von Robotern), insgesamt ist aber kein vergleichbares Modell aus der Literatur bekannt. Die Vorauswahl der Ressourcen auf Basis technischer Kriterien stand nicht im Fokus dieser Arbeit, hierfür sei auf bestehende Ansätze (zum Beispiel SMALE (2011), KLUGE (2011) und MICHNIEWICZ (2019)) verwiesen.

Der Ablauf der automatisierten Layoutplanung mit simultaner Optimierung von Ressourcenauswahl, Linienastaktung und 3D-Positionierung der Ressourcen ist ein zentrales Ergebnis der vorliegenden Dissertation. Auf diese Weise können die Wechselwirkungen zwischen den Planungsentscheidungen berücksichtigt werden. Aus der Literatur ist kein vergleichbarer Ansatz bekannt, lediglich zu den Teilproblemen existieren bereits Ansätze. Hinsichtlich der Erstellung des Strukturlayouts, also der Austaktung der Linie und der Auswahl der Ressourcen, sind zum Beispiel OESTERLE ET AL. (2017) und ALAKAŞ ET AL. (2020) als Arbeiten mit ähnlicher Problemstellung zu nennen. Der in dieser Arbeit vorgestellte Algorithmus erweitert den möglichen Lösungsraum und die Flexibilität gegenüber bestehenden Ansätzen, indem sowohl die Betriebsmittelauswahl als auch Prozessalternativen und parallele Stationen berücksichtigt werden. Im Bereich der räumlichen Positionierung von Betriebsmitteln fokussieren sich die meisten Autorinnen und Autoren auf die Anordnung bestimmter Ressourcen wie Industrieroboter (zum Beispiel PELLEGRINELLI ET AL. (2017), LIM ET AL. (2016)). Planungssysteme, die verschiedene Ressourcentypen berücksichtigen, optimieren entweder nur ein manuell erstelltes Layout (WOENCKHAUS 1994) oder planen eine Station und keine ganze Linie (ROßGODERER ET AL. 1995). Der in dieser Dissertation präsentierte Ansatz für die Erstellung eines 3D-Layouts ermöglicht hingegen die Planung einer Linie mit mehreren Stationen und verschiedenen Betriebsmitteltypen.

Trotz der Fortschritte, die mit dieser Arbeit erzielt werden konnten, bleiben einige Defizite im Hinblick auf die einzelnen Teilziele und die praktische Anwendbarkeit der Methode bestehen:

Teilziel 1 – Umfassendes Informationsmodell

Für die Modellierung von Betriebsmitteln werden umfangreiche Informationen benötigt, die oft nicht in geeigneter Form vorliegen. Die Ressourcenbibliothek enthält daher zur-

zeit lediglich exemplarische Modelle verschiedener Ressourcenarten. Für eine sinnvolle industrielle Nutzung müssten noch zahlreiche Modelle hinzugefügt werden, was mit einem hohen Aufwand verbunden wäre.

Teilziel 2 – Berücksichtigung von Wechselwirkungen

Die Lösung des zweistufigen Optimierungsproblems, das verschiedene Planungsentscheidungen simultan betrachtet, ist sehr rechenzeitintensiv und der Rechenaufwand steigt mit der Anzahl der verplanten Ressourcen stark an. Dies bedeutet eine Einschränkung für die praktische Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Methode, da ausreichend Rechenzeit eingeplant werden muss. Die eingesetzten Algorithmen beginnen außerdem für jede Planungsinstanz von Neuem mit der Optimierung und sind nicht in der Lage, aus vergangenen Planungsfällen Erkenntnisse für die Zukunft zu ziehen.

Teilziel 3 – Flexible Methode zur Linienastaktung

Bei der Erstellung des Strukturlayouts wird der Takt der Linie als gegeben betrachtet und die Anzahl der Stationen minimiert. Es ist mit dem erstellten Algorithmus nicht möglich, die Taktzeit für eine gegebene Anzahl von Stationen zu optimieren. Außerdem besteht eine Einschränkung auf Linien zur Herstellung eines Produktmodells.

Teilziel 4 – Simulationsgestützte Methode zur Ressourcenanordnung

Die Positionierung des Produkts in der Station ist aktuell festgelegt und nicht Teil der Planung. Dies entspricht nicht der Situation in der Realität, wo das Produkt sogar während einer Taktzeit bewegt werden kann. Auch die ausschließliche Verknüpfung der Stationen mittels eines geraden Förderbands schränkt die Allgemeingültigkeit des entwickelten Systems ein. Eine weitere Einschränkung liegt darin, dass die Anordnung von Robotern auf Basis einer statischen Bewertung des Arbeitsraums erfolgt. Über eine Simulation kann zwar die Einhaltung der geforderten Taktzeit überprüft werden, die Planung der Robotertrajektorie ist aber nicht in die Optimierung integriert.

Teilziel 5 – Wirtschaftlichkeitsbewertung für automatisierte Planungssysteme

Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit wurden ein Bewertungsvorgehen und verschiedene Szenarien präsentiert. Da die Ausgangssituation in Unternehmen aber sehr individuell ist, muss trotzdem im Einzelfall überprüft werden, ob der Einsatz eines Planungssystems wirtschaftlich sinnvoll ist. Die hierfür benötigten Eingangsparameter können dabei in der Praxis schwer abzuschätzen sein.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass mittels eines zweistufigen Optimierungsproblems unterschiedliche Planungsentscheidungen der Montageplanung verknüpft werden können, was zu einem besseren Planungsergebnis als die isolierte Betrachtung der einzelnen Fragestellungen führt. Die Anwendbarkeit einer solchen Methode in der Praxis ist allerdings durch die weiterhin bestehenden Defizite noch eingeschränkt.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation präsentiert eine Methode zur automatisierten Layoutplanung von Montagelinien mit dem Ziel, die manuellen Aufwände bei der Planung neuer Montagelinien zu reduzieren. Die Verringerung der benötigten Arbeitszeit für die Planung von Montageanlagen bietet insbesondere für Firmen in Hochlohnländern wirtschaftliche Vorteile. Außerdem können so die negativen Folgen des im Ingenieurbereich herrschenden Fachkräftemangels gemildert werden. Bestehende Ansätze aus dem Bereich der automatisierten Anlagenplanung betrachten einzelne Planungsentscheidungen wie die Auswahl von Ressourcen, die Austaktung einer Linie oder die Anordnung von Betriebsmitteln. Zwischen diesen Planungsentscheidungen bestehen aber starke Wechselwirkungen, die bei einer isolierten oder seriellen Betrachtungsweise nicht berücksichtigt werden können.

Die erarbeitete Methode kombiniert daher die genannten Planungsentscheidungen zu einem zweistufigen Optimierungsproblem, das mittels eines geschachtelten genetischen Algorithmus gelöst wird. Ausgangspunkt der Planung ist der durchzuführende Montageprozess und eine Vorauswahl an geeigneten Ressourcen für jeden Prozessschritt. Basierend auf diesen Informationen werden automatisiert Prozessschritte zu Stationen zusammengefasst sowie Ressourcen zu deren Durchführung ausgewählt und räumlich angeordnet.

9.2 Ausblick

Wie in Kapitel 8 beschrieben, konnten die definierten Teilziele erreicht und über die bestehende Literatur hinausgehende Erkenntnisse erzielt werden. Dennoch existieren weiterhin Ansätze zur Verbesserung und Weiterentwicklung der erarbeiteten Methode:

- Für die praktische Anwendung der Planungsmethode in der Industrie müsste die Betriebsmittelbibliothek noch signifikant erweitert werden. Um den damit verknüpften Aufwand zu reduzieren, erscheint die Vereinfachung oder Automatisierung der Erstellung neuer Ressourcenmodelle vielversprechend.
- Eine andere Alternative wäre die Bereitstellung der Ressourcenmodelle durch die Hersteller der Betriebsmittel. Zu diesem Zweck könnte eine Plattform geschaffen werden, auf der die Modelle zur Verfügung gestellt und bei Bedarf aktualisiert werden.

- Die aktuelle prototypische Softwareimplementierung ist hinsichtlich der Laufzeit nicht ideal. Eine entsprechende softwaretechnische Umsetzung, zum Beispiel mit einer Parallelisierung von Berechnungen, könnte zu einer Verkürzung der Rechenzeit beitragen.
- Ein weiterer Ansatz zur Erhöhung der Effizienz wäre, Erfahrungen aus bereits durchgeführten Planungsfällen zu nutzen, um beispielsweise den Startpunkt des Optimierungslaufs zu verbessern. Dazu könnten zukünftig Methoden der Künstlichen Intelligenz wie Reinforcement Learning für die automatisierte Anlagenplanung eingesetzt und mittels Transfer Learning Erkenntnisse von einem Planungsfall auf den nächsten übertragen werden.
- Bei der räumlichen Planung der Stationen sollte die Position des Produkts nicht a priori fixiert sein, sondern im Zuge der Optimierung festgelegt werden. Insbesondere durch die Möglichkeit, verschiedene Orientierungen des Produkts zu berücksichtigen, könnten die erzielten Planungsergebnisse noch weiter verbessert werden.
- Die Verknüpfung der Stationen erfolgt zurzeit mittels eines geraden Förderbands. Die Integration weiterer Optionen für den Materialfluss sowie die Materialbereitstellung und damit einhergehend mehr Flexibilität bei der Anordnung der Stationen wären mögliche Weiterentwicklungen der Planungsmethode.
- Anstelle einer rein statischen Bewertung könnte bei der Positionierung von Robotern direkt die Planung der Trajektorie berücksichtigt werden. Durch eine solche Einbeziehung der Roboterbahnplanung könnte nicht nur eine Anlage für eine gegebene Taktzeit geplant, sondern die Anordnung der Betriebsmittel auch diesbezüglich optimiert werden.

10 Literaturverzeichnis

AĞPAK & GÖKÇEN 2005

Ağpak, K.; Gökçen, H.: Assembly line balancing: Two resource constrained cases. *International Journal of Production Economics* 96 (2005) 1, S. 129-140.

AHMAD ET AL. 2018

Ahmad, M.; Ramis Ferrer, B.; Ahmad, B.; Vera, D.; Martinez Lastra, J. L.; Harrison, R.: Knowledge-based PPR modelling for assembly automation. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 21 (2018), S. 33-46.

ALAKAŞ ET AL. 2020

Alakaş, H. M.; Pınarbaşı, M.; Yüzükırmızı, M.: Constraint programming model for resource-constrained assembly line balancing problem. *Soft Computing* 24 (2020) 7, S. 5367-5375.

ÁLVAREZ-MIRANDA ET AL. 2021

Álvarez-Miranda, E.; Chace, S.; Pereira, J.: Assembly line balancing with parallel workstations. *International Journal of Production Research* 59 (2021) 21, S. 6486-6506.

AMEN 2000a

Amen, M.: An exact method for cost-oriented assembly line balancing. *International Journal of Production Economics* 64 (2000) 1-3, S. 187-195.

AMEN 2000b

Amen, M.: Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A survey. *International Journal of Production Economics* 68 (2000) 1, S. 1-14.

AMEN 2001

Amen, M.: Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A comparison on solution quality and computing time. *International Journal of Production Economics* 69 (2001) 3, S. 255-264.

AMEN 2006

Amen, M.: Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds. *European Journal of Operational Research* 168 (2006) 3, S. 747-770.

BACKHAUS 2016

Backhaus, J.: Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme. Diss. TU München (2015). München: Utz 2016. ISBN: 3831645701. (Forschungsberichte iw 319).

BACKHAUS & REINHART 2017

Backhaus, J.; Reinhart, G.: Digital description of products, processes and resources for task-oriented programming of assembly systems. *Journal of Intelligent Manufacturing* 28 (2017) 8, S. 1787-1800.

BARD 1998

Bard, J. F.: *Practical Bilevel Optimization. Algorithms and Applications*. Boston: Springer US 1998. ISBN: 9781441948076. (Nonconvex Optimization and Its Applications 30).

BARRAL ET AL. 2001

Barral, D.; Perrin, J.-P.; Dombre, E.; Liegeois, A.: Simulated Annealing Combined with a Constructive Algorithm for Optimising Assembly Workcell Layout. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 17 (2001) 8, S. 593-602.

BATTAÏA & DOLGUI 2013

Battaïa, O.; Dolgui, A.: A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics* 142 (2013) 2, S. 259-277.

BECKER & SCHOLL 2006

Becker, C.; Scholl, A.: A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 168 (2006) 3, S. 694-715.

BENGEL 2009

Bengel, M.: Model-based configuration - a workpiece-centred approach. In: American Society of Mechanical Engineers et al. (Hrsg.): *ReMAR 2009, ASME/IFTOMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots, 2009*. London, 22.-24.06.2009. Piscataway, NJ: IEEE 2009, S. 689-695. ISBN: 9781424437962.

BIKAS ET AL. 2016

Bikas, C.; Argyrou, A.; Pintzos, G.; Giannoulis, C.; Sipsas, K.; Papakostas, N.; Chryssolouris, G.: An Automated Assembly Process Planning System. *Procedia CIRP* 44 (2016), S. 222-227.

BLESSING & CHAKRABARTI 2009

Blessing, L. T.; Chakrabarti, A.: *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer 2009. ISBN: 9781848825871.

BOCHTLER ET AL. 1995

Bochtler, W.; Laufenberg, L.; Eversheim, W.: *Simultaneous Engineering. Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie*. Berlin: Springer 1995. ISBN: 9783642789182.

BOUGOUFFA ET AL. 2019

Bougouffa, S.; Cha, S.; Neumann, E.-M.; Vogel-Heuser, B.: PPR Based Cost Estimation of Changes in Automated Production Systems. In: IEEE Industrial Electronics Society (Hrsg.): IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Lisbon, Portugal, 14.10.2019-17.10.2019. Piscataway, NJ: IEEE 2019, S. 2990-2995. ISBN: 9781728148786.

BOYSEN ET AL. 2007

Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A.: A classification of assembly line balancing problems. European Journal of Operational Research 183 (2007) 2, S. 674-693.

BOYSEN ET AL. 2008

Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A.: Assembly line balancing. Which model to use when? International Journal of Production Economics 111 (2008) 2, S. 509-528.

BUKCHIN & RUBINOVITZ 2003

Bukchin, J.; Rubinovitz, J.: A weighted approach for assembly line design with station paralleling and equipment selection. IIE Transactions 35 (2003), S. 73-85.

BUKCHIN & TZUR 2000

Bukchin, J.; Tzur, M.: Design of flexible assembly line to minimize equipment cost. IIE Transactions 32 (2000), S. 585-598.

BULLINGER 1986

Bullinger, Hans-Jörg (Hrsg.): Systematische Montageplanung. Handbuch für die Praxis. München: Hanser 1986. ISBN: 9783446146068.

CAPACHO ET AL. 2006

Capacho, L.; Pastor, R.; Guschinskaya, O.; Dolgui, A.: Heuristic Methods to Solve the Alternative Subgraphs Assembly Line Balancing Problem. In: IEEE (Hrsg.): International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Shanghai, China, 08.10.2006-10.10.2006. Piscataway, NJ: IEEE 2006, S. 501-506. ISBN: 1424403103.

CAPACHO ET AL. 2009

Capacho, L.; Pastor, R.; Dolgui, A.; Guschinskaya, O.: An evaluation of constructive heuristic methods for solving the alternative subgraphs assembly line balancing problem. Journal of Heuristics 15 (2009) 2, S. 109-132.

CAPACHO & PASTOR 2006

Capacho, L.; Pastor, R.: The ASALB Problem with Processing Alternatives Involving Different Tasks: Definition, Formalization and Resolution. In: Gavrilova, M. et al. (Hrsg.): Computational science and its applications - ICCSA 2006. Glasgow, UK, 08.05.2006-11.05.2006. Berlin: Springer 2006, S. 554-563. ISBN: 9783540340751. (Lecture Notes in Computer Science 3980).

CAPACHO & PASTOR 2008

Capacho, L.; Pastor, R.: ASALBP: the alternative subgraphs assembly line balancing problem. International Journal of Production Research 46 (2008) 13, S. 3503-3516.

CHEN ET AL. 2008

Chen, S.; Li, Y.; Zhang, J.; Wang, W.: Active Sensor Planning for Multiview Vision Tasks. Berlin: Springer 2008. ISBN: 3540770712.

COROMINAS ET AL. 2011

Corominas, A.; Ferrer, L.; Pastor, R.: Assembly line balancing: general resource-constrained case. International Journal of Production Research 49 (2011) 12, S. 3527-3542.

CUIPER 2000

Cuiper, R.: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen. Diss. TU München (2000). München: Utz 2000. ISBN: 3896757830. (Forschungsberichte iwv 143).

CUTTING-DECELLE ET AL. 2007

Cutting-Decelle, A.-F.; Young, R.; Michel, J.-J.; Grangel, R.; Le Cardinal, J.; Bourey, J. P.: ISO 15531 MANDATE: A Product-process-resource based Approach for Managing Modularity in Production Management. Concurrent Engineering 15 (2007) 2, S. 217-235.

CZUCHRA 2010

Czuchra, W.: UML in logistischen Prozessen. Graphische Sprache zur Modellierung der Systeme. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2010. ISBN: 9783834807960.

DELICE 2019

Delice, Y.: A genetic algorithm approach for balancing two-sided assembly lines with set-ups. Assembly Automation 39 (2019) 5, S. 827-839.

DIN 4002

DIN 4002: Merkmale und Geltungsbereiche zum Produktdatenaustausch. Berlin: Beuth 2007.

DIN 8593

DIN 8593: Fertigungsverfahren Fügen. Berlin: Beuth 2003.

DIN EN 61131-3

DIN EN 61131-3: Speicherprogrammierbare Steuerungen - Teil 3: Programmiersprachen. Berlin: Beuth 2014.

DIN EN 62424

DIN 62424: Darstellung von Aufgaben der Prozessleittechnik - Fließbilder und Datenaustausch zwischen EDV-Werkzeugen zur Fließbilderstellung und CAE-Systemen. Berlin: Beuth 2017.

DIN EN IEC 62714-1

DIN EN IEC 62714-1: Datenaustauschformat für Planungsdaten industrieller Automatisierungssysteme - Automation markup language - Teil 1: Architektur und allgemeine Festlegungen. Berlin: Beuth 2019.

DRATH & SCHLEIPEN 2010

Drath, R.; Schleipen, M.: Grundarchitektur: das Objektmodell. In: Drath, R. (Hrsg.): Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML. Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA. Berlin: Springer 2010, S. 45-94. ISBN: 9783642046735. (VDI-Buch).

DRIRA ET AL. 2007

Drira, A.; Pierreval, H.; Hajri-Gabouj, S.: Facility layout problems: A survey. Annual Reviews in Control 31 (2007) 2, S. 255-267.

ELLEFSEN ET AL. 2017

Ellefsen, K. O.; Lepikson, H. A.; Albiez, J. C.: Multiobjective coverage path planning: Enabling automated inspection of complex, real-world structures. Applied Soft Computing 61 (2017), S. 264-282.

ERDOGAN 2019

Erdogan, H.: Wettbewerbsfähig durch flexible Produktion. In: Hees, F. et al. (Hrsg.): Projektatlas Kompetenz Montage. Kollaborativ und wandlungsfähig. Aachen: RWTH Aachen University Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau 2019, S. 16. ISBN: 9783948169060.

EVERSHEIM 2002

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik 3. Arbeitsvorbereitung. 4. Aufl. Berlin: Springer 2002. ISBN: 9783642626401. (VDI-Buch).

FELDMANN 1997

Feldmann, C.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung. Berlin: Springer 1997. ISBN: 9783540620594. (Forschungsberichte iw 104).

FREITAG 2019

Freitag, H.: Business Intelligence reduziert Komplexität. In: Hees, F. et al. (Hrsg.): Projektatlas Kompetenz Montage. Kollaborativ und wandlungsfähig. Aachen: RWTH Aachen University Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau 2019, S. 41.
ISBN: 9783948169060.

GRIMME & BOSSEK 2018

Grimme, C.; Bossek, J.: Einführung in die Optimierung. Konzepte, Methoden und Anwendungen. Wiesbaden: Springer Vieweg 2018. ISBN: 9783658211509.

GRONLE & OSTEN 2016

Gronle, M.; Osten, W.: View and sensor planning for multi-sensor surface inspection. Surface Topography: Metrology and Properties 4 (2016) 2, S. 1-14.

HAMMERSTINGL 2020

Hammerstingl, V.: Steigerung der Rekonfigurationsfähigkeit von Montageanlagen durch Cyber-physische Feldgeräte. Diss. TU München (2020). <<https://mediatum.ub.tum.de/1521629>> - 03.04.2021.

HAMMERSTINGL & REINHART 2015

Hammerstingl, V.; Reinhart, G.: Unified Plug&Produce architecture for automatic integration of field devices in industrial environments. In: IEEE Industrial Electronics Society (Hrsg.): International Conference on Industrial Technology (ICIT). Seville, Spain, 17.03.2015-19.03.2015. Piscataway, NJ: IEEE 2015, S. 1956-1963.
ISBN: 9781479978007.

HAMMERSTINGL & REINHART 2017

Hammerstingl, V.; Reinhart, G.: Fähigkeiten in der Montage. TU München (2017). <<http://mediatum.ub.tum.de/?id=1370174>> - 03.04.2021.

HAZIR ET AL. 2015

Hazır, Ö.; Delorme, X.; Dolgui, A.: A review of cost and profit oriented line design and balancing problems and solution approaches. Annual Reviews in Control 40 (2015), S. 14-24.

HOSSEINI-NASAB ET AL. 2018

Hosseini-Nasab, H.; Fereidouni, S.; Fatemi Ghomi, S. M.; Fakhrzad, M. B.: Classification of facility layout problems: a review study. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 94 (2018) 1-4, S. 957-977.

HUBER 2016

Huber, W.: Industrie 4.0 in der Automobilproduktion. Ein Praxisbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016. ISBN: 9783658127329.

HUNDT ET AL. 2010

Hundt, L.; Lüder, A.; Drath, R.; Grimm, B.: Verhaltensbeschreibung mit PLCopen XML. In: Drath, R. (Hrsg.): Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML. Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA. Berlin: Springer 2010, S. 135-193. ISBN: 9783642046735. (VDI-Buch).

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS 2020

International Federation of Robotics (Hrsg.): World Robotics. Industrial Robots 2020. Frankfurt: 2020.

ISO 8373

ISO 8373: Robotics - Vocabulary. Genf: ISO 2021.

ISO/PAS 17506

ISO/PAS 17506: Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - Festlegung des COLLADA-Schemas für 3D-Visualisierung industrieller Daten. Berlin: Beuth 2012.

IZUI ET AL. 2013

Izui, K.; Murakumo, Y.; Suemitsu, I.; Nishiwaki, S.; Noda, A.; Nagatani, T.: Multiobjective layout optimization of robotic cellular manufacturing systems. Computers & Industrial Engineering 64 (2013) 2, S. 537-544.

JÄRVENPÄÄ 2012

Järvenpää, E.: Capability-based Adaptation of Production Systems in a Changing Environment. Diss. Tampere University of Technology (2012). Tampere: Tampere University of Technology 2012. ISBN: 9789521529405. (Publication 1082).

JÄRVENPÄÄ ET AL. 2011

Järvenpää, E.; Luostarinen, P.; Lanz, M.; Tuokko, R.: Presenting capabilities of resources and resource combinations to support production system adaptation. In: IEEE (Hrsg.): International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM). Tampere, Finland, 25.05.2011-27.05.2011. Piscataway, NJ: IEEE 2011, S. 1-6. ISBN: 9781612843421.

JÄRVENPÄÄ ET AL. 2018

Järvenpää, E.; Siltala, N.; Hylli, O.; Lanz, M.: Product Model ontology and its use in capability-based matchmaking. Procedia CIRP 72 (2018), S. 1094-1099.

JÄRVENPÄÄ ET AL. 2019

Järvenpää, E.; Siltala, N.; Hylli, O.; Lanz, M.: The development of an ontology for describing the capabilities of manufacturing resources. *Journal of Intelligent Manufacturing* 30 (2019) 2, S. 959-978.

KARASZEWSKI ET AL. 2016

Karaszewski, M.; Adamczyk, M.; Sitnik, R.: Assessment of next-best-view algorithms performance with various 3D scanners and manipulator. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 119 (2016), S. 320-333.

KATHREIN ET AL. 2019

Kathrein, L.; Meixner, K.; Winkler, D.; Luder, A.; Biffel, S.: Efficient Production System Resource Exploration Considering Product/ion Requirements. In: IEEE (Hrsg.): 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Zaragoza, Spain, 10.09.2019-13.09.2019. Piscataway, NJ: IEEE 2019, S. 665-672. ISBN: 9781728103037.

KEDDIS ET AL. 2014

Keddis, N.; Kainz, G.; Zoitl, A.: Capability-based planning and scheduling for adaptable manufacturing systems. In: IEEE (Hrsg.): 19th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Barcelona, Spain, 16.09.2014 - 19.09.2014. Piscataway, NJ: IEEE 2014, S. 1-8. ISBN: 9781479948451.

KFW RESEARCH 2021

KfW Research (Hrsg.): KfW-ifo-Fachkräftebarometer: Juni 2021. Fachkräftemangel nimmt trotz Lockdown zu – weitere Engpässe stehen bevor. Frankfurt: 2021.

KIEFER 2007

Kiefer, J.: Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau. Diss. Universität des Saarlandes, Saarbrücken (2007). <<https://dnb.info/999933116/34>> - 03.04.2021.

KLUGE 2011

Kluge, S.: Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme. Diss. Universität Stuttgart (2011). Heimsheim: Jost-Jetter 2011. ISBN: 9783939890812. (IPA-IAO-Forschung und Praxis 510).

KONOLD & REGER 2003

Konold, P.; Reger, H.: Praxis der Montagetechnik. Produktdesign, Planung, Systemgestaltung. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2003. ISBN: 9783663016090. (Vieweg Praxiswissen).

LEIBER ET AL. 2019

Leiber, D.; Hammerstingl, V.; Weiß, F.; Reinhart, G.: Automated design of multi-station assembly lines. *Procedia CIRP* 79 (2019), S. 137-142.

LEIBER ET AL. 2021

Leiber, D.; Vuong, A.-T.; Reinhart, G.: Alternative Subgraphs Assembly Line Balancing Problem with Resource Selection and Parallel Stations. *Engineering Optimization* 54 (2021) 11, S. 1903-1918.

LEIBER ET AL. 2022

Leiber, D.; Eickholt, D.; Vuong, A.-T.; Reinhart, G.: Simulation-based layout optimization for multi-station assembly lines. *Journal of Intelligent Manufacturing* 33 (2022), S. 537-554.

LEIBER & REINHART 2021

Leiber, D.; Reinhart, G.: A bi-level optimisation approach for assembly line design using a nested genetic algorithm. *International Journal of Production Research* 59 (2021) 24, S. 7560-7575.

LEIBER & REINHART 2022

Leiber, D.; Reinhart, G.: Economic efficiency of automated manufacturing systems design. *Procedia CIRP* 112 (2022), S. 68-72.

LI ET AL. 2018

Li, Z.; Janardhanan, M. N.; Tang, Q.; Nielsen, P.: Mathematical model and metaheuristics for simultaneous balancing and sequencing of a robotic mixed-model assembly line. *Engineering Optimization* 50 (2018) 5, S. 877-893.

LIM ET AL. 2016

Lim, Z. Y.; Ponnambalam, S. G.; Izui, K.: Nature inspired algorithms to optimize robot workcell layouts. *Applied Soft Computing* 49 (2016), S. 570-589.

LIPS 2010

Lips, S.: Beschreibung von Geometrie und Kinematik mit COLLADA. In: Drath, R. (Hrsg.): Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML. Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA. Berlin: Springer 2010, S. 95-134. ISBN: 9783642046735. (VDI-Buch).

LOFERER 2002

Loferer, M.: Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen. Diss. TU München (2002). München: Utz 2002. ISBN: 3831601186. (Forschungsberichte iw 162).

LOTTER 1992

Lotter, B.: Wirtschaftliche Montage. Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. ISBN: 3184011682.

LÜDER & SCHMIDT 2015

Lüder, A.; Schmidt, N.: AutomationML in a Nutshell. In: Vogel-Heuser, B. et al. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2015, S. 1-48. ISBN: 9783662455371.

LUETH 1992

Lueth, T. C.: Automated planning of robot workcell layouts. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nice, France, 12.05.1992-14.05.1992. Piscataway, NJ: IEEE 1992, S. 1103-1108. ISBN: 0818627204.

LUX-GRUENBERG 2020

Lux-Gruenberg, G.: Selbst-Kalibrierung roboterbasierter Koordinatenmesssysteme. Diss. TU München (2020). <<https://mediatum.ub.tum.de/1524754>> - 26.01.2022.

MICHALOS ET AL. 2015

Michalos, G.; Fysikopoulos, A.; Makris, S.; Mourtzis, D.; Chryssolouris, G.: Multi criteria assembly line design and configuration – An automotive case study. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 9 (2015), S. 69-87.

MICHNIEWICZ 2019

Michniewicz, J.: Automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung in der Montage. Diss. TU München (2019). <<https://mediatum.ub.tum.de/1442360>> - 03.04.2021.

MICHNIEWICZ ET AL. 2016

Michniewicz, J.; Reinhart, G.; Boschert, S.: CAD-Based Automated Assembly Planning for Variable Products in Modular Production Systems. Procedia CIRP 44 (2016), S. 44-49.

MILBERG ET AL. 1999

Milberg, J.; Reinhart, G.; Spath, D.; Weck, M.; Seliger, G.; Eversheim, W.; Schraft, R. D.; Tönshoff, H. K.; Pritschow, G.; Duelen, G.; Bender, K.; Sihn, W.; Specht, D.; Riedmüller, S.; Hümmeler, J.; Prust, D.; Swoboda, M.; Neu, S.; Kubin, G.; Proksch, R.; Eblenkamp, M.; Eich, B.; Fichtmüller, N.; Köhne, T.; Zäh, M.; Heitman, K.; Daniel, C.; Hohenadel, J.; Martin, M.; Hafer, G.; Fehler, F.: Produktionssystemplanung. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Gestaltung von Produktionssystemen. Berlin: Springer 1999, S. 118-244. ISBN: 9783642583995. (Produktion und Management 3).

MONICA & ALEOTTI 2018

Monica, R.; Aleotti, J.: Surfel-Based Next Best View Planning. *IEEE Robotics and Automation Letters* 3 (2018) 4, S. 3324-3331.

MÜLLER 2019

Müller, J.: Modellierung und Digitalisierung in der Projektierung von Montageanlagen. In: Hees, F. et al. (Hrsg.): *Projektatlas Kompetenz Montage. Kollaborativ und wandlungsfähig*. Aachen: RWTH Aachen University Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau 2019, S. 18-21. ISBN: 9783948169060.

MURA & DINI 2016

Mura, M. D.; Dini, G.: Worker Skills and Equipment Optimization in Assembly Line Balancing by a Genetic Approach. *Procedia CIRP* 44 (2016), S. 102-107.

OESTERLE ET AL. 2017

Oesterle, J.; Amodeo, L.; Yalaoui, F.: A comparative study of Multi-Objective Algorithms for the Assembly Line Balancing and Equipment Selection Problem under consideration of Product Design Alternatives. *Journal of Intelligent Manufacturing* 30 (2017), 1021-1046.

OESTERLE & LIONEL 2018

Oesterle, J.; Lionel, A.: Evaluation of the influence of dominance rules for the assembly line design problem under consideration of product design alternatives. *Engineering Optimization* 50 (2018) 6, S. 982-995.

PAPAKOSTAS ET AL. 2011

Papakostas, N.; Alexopoulos, K.; Kopanakis, A.: Integrating digital manufacturing and simulation tools in the assembly design process. A cooperating robots cell case. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 4 (2011) 1, S. 96-100.

PAWLEWSKI 2014

Pawlewski, P.: Multimodal Approach to Modeling of Manufacturing Processes. *Procedia CIRP* 17 (2014), S. 716-720.

PEKIN & AZIZOGLU 2008

Pekin, N.; Azizoglu, M.: Bi criteria flexible assembly line design problem with equipment decisions. *International Journal of Production Research* 46 (2008) 22, S. 6323-6343.

PELLEGRINELLI ET AL. 2014

Pellegrinelli, S.; Pedrocchi, N.; Tosatti, L. M.; Fischer, A.; Tolio, T.: Design and motion planning of body-in-white assembly cells. In: *IEEE/RSJ (Hrsg.): International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Chicago, USA, 14.09.2014-18.09.2014. Piscataway, NJ: IEEE 2014, S. 4489-4496. ISBN: 9781479969340.

PELLEGRINELLI ET AL. 2015

Pellegrinelli, S.; Pedrocchi, N.; Tosatti, L. M.; Fischer, A.; Tolio, T.: Validation of an Extended Approach to Multi-robot Cell Design and Motion Planning. *Procedia CIRP* 36 (2015), S. 6-11.

PELLEGRINELLI ET AL. 2017

Pellegrinelli, S.; Pedrocchi, N.; Tosatti, L. M.; Fischer, A.; Tolio, T.: Multi-robot spot-welding cells for car-body assembly: Design and motion planning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 44 (2017), S. 97-116.

PEREIRA 2018

Pereira, J.: Modelling and solving a cost-oriented resource-constrained multi-model assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research* 56 (2018) 11, S. 3994-4016.

PEREIRA ET AL. 2018

Pereira, J.; Ritt, M.; Vásquez, Ó. C.: A memetic algorithm for the cost-oriented robotic assembly line balancing problem. *Computers & Operations Research* 99 (2018), S. 249-261.

PÉREZ-GOSENDE ET AL. 2021

Pérez-Gosende, P.; Mula, J.; Díaz-Madroñero, M.: Facility layout planning. An extended literature review. *International Journal of Production Research* 59 (2021) 12, S. 3777-3816.

PFROMMER ET AL. 2013

Pfrommer, J.; Schleipen, M.; Beyerer, J.: PPRS: Production skills and their relation to product, process, and resource. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of 2013 IEEE 18th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*. Cagliari, Italy, 10.09.2013-13.09.2013. Piscataway, NJ: IEEE 2013, S. 1-4. ISBN: 9781479908646.

PITAKASO & SETHANAN 2016

Pitakaso, R.; Sethanan, K.: Modified differential evolution algorithm for simple assembly line balancing with a limit on the number of machine types. *Engineering Optimization* 48 (2016) 2, S. 253-271.

RAMIS FERRER ET AL. 2016

Ramis Ferrer, B.; Ahmad, B.; Vera, D.; Lobov, A.; Harrison, R.; Martínez Lastra, J. L.: Product, process and resource model coupling for knowledge-driven assembly automation. *at - Automatisierungstechnik* 64 (2016) 3, S. 231-243.

RASHID ET AL. 2012

Rashid, M. F.; Hutabarat, W.; Tiwari, A.: A review on assembly sequence planning and assembly line balancing optimisation using soft computing approaches. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 59 (2012), S. 335-349.

REINHART & ROßGODERER 1998

Reinhart, G.; Roßgoderer, U.: A System for Three-Dimensional Layout Planning of Automated and Manual Assembly Systems. *IFAC Proceedings Volumes* 31 (1998) 7, S. 29-34.

REKIEK ET AL. 2002a

Rekiek, B.; Delchambre, A.; Dolgui, A.; Bratcu, A.: Assembly Line Design: A Survey. *IFAC Proceedings Volumes* 35 (2002) 1, S. 155-166.

REKIEK ET AL. 2002b

Rekiek, B.; Dolgui, A.; Delchambre, A.; Bratcu, A.: State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews in Control* 26 (2002) 2, S. 163-174.

REUTER 2013

Reuter, A.: Definition eines mechatronischen Informationsmodells zur Modellierung von Automatisierungskomponenten und Maschinen. Diss. Universität Stuttgart (2013). München: Dr. Hut 2013. ISBN: 978-3-8439-1137-5.

RÖHLER ET AL. 2019

Röhler, M.; Riegel, J.; Paul, M.: Simulation als Werkzeug in der Montageplanung. In: Hees, F. et al. (Hrsg.): *Projektatlas Kompetenz Montage. Kollaborativ und wandlungsfähig*. Aachen: RWTH Aachen University Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau 2019, S. 66-67. ISBN: 9783948169060.

ROSMAN ET AL. 2018

Rosman, G.; Choi, C.; Dogar, M.; Fisher III, J. W.; Rus, D.: Task-Specific Sensor Planning for Robotic Assembly Tasks. In: IEEE (Hrsg.): *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Brisbane, Australia, 21.05.2018-25.05.2018. Piscataway, NJ: IEEE 2018, S. 2932-2939. ISBN: 9781538630815.

ROßGODERER 2002

Roßgoderer, U.: System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen. Diss. TU München (2002). München: Utz 2002. ISBN: 3831601542. (Forschungsberichte iw 168).

ROßGODERER ET AL. 1995

Roßgoderer, U.; Woenckhaus, C.; Reinhart, G.; Milberg, J.: A concept for automatical layout generation. In: IEEE (Hrsg.): International Conference on Robotics and Automation. Nagoya, Japan, 21.05.1995-27.05.1995. Piscataway, NJ: IEEE 1995, S. 800-805. ISBN: 0780319656.

SARWAR 2019

Sarwar, F.: Multi-objective assembly line balancing problem under uncertainty using genetic algorithm. International Journal of Services and Operations Management 34 (2019) 1, S. 33-47.

SCHÄFER 1992

Schäfer, G.: Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg (1991). München: Hanser 1992. ISBN: 3446171177. (Fertigungstechnik - Erlangen 27).

SCHMIDT 1992

Schmidt, M.: Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme. Diss. TU München (1991). Berlin: Springer 1992. ISBN: 9783540550259. (Forschungsberichte iw 41).

SCHOLL ET AL. 2009

Scholl, A.; Boysen, N.; Fliedner, M.: Optimally solving the alternative subgraphs assembly line balancing problem. Annals of Operations Research 172 (2009) 1, S. 243-258.

SCHOLZ 2018

Scholz, A.: Unterstützung des Engineerings von fertigungstechnischen Produktionssystemen mit Hilfe von Maschinenfunktionen. Diss. Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg (2018). <<https://d-nb.info/1167409728/34>> - 28.01.2018.

Schutzrecht US 6,470,301 B1

Schutzrecht US 6,470,301 B1 Patent (22.10.2002). Dassault Systems. Pr.: 09/448,776 24.11.1999. - Barral, D.: Optimization Tool for Assembly Workcell Layout.

Schutzrecht US 6,526,373 B1

Schutzrecht US 6,526,373 B1 Patent (25.02.2003). Dassault Systems. Pr.: 09/414,618 08.10.1999. - Barral, D.: Optimization Tool for Robot Placement.

Schutzrecht US 8,571,706 B2

Schutzrecht US 8,571,706 B2 Patent (29.10.2013). ABB Research Ltd. Pr.: 12/445,890 20.02.2008. - Zhang, E.-D.; Qi, L.-L.; Murphy, S.: Method and System for Optimizing the Layout of a Robot Work Cell.

SELIG 2011

Selig, A.: Informationsmodell zur funktionalen Typisierung von Automatisierungsgeräten. Diss. Universität Stuttgart (2010). Heimsheim: Jost-Jetter 2011. ISBN: 9783939890744. (ISW/IPA Forschung und Praxis 180).

SHARMA ET AL. 2017

Sharma, A.; Jha, A. K.; Halder, A.: Layout optimization of a robotic cell for foundry application by CAD based point cloud modeling – a case study. *Industrial Robot: An International Journal* 44 (2017) 6, S. 788-797.

SINHA ET AL. 2014

Sinha, A.; Malo, P.; Frantsev, A.; Deb, K.: Finding optimal strategies in a multi-period multi-leader–follower Stackelberg game using an evolutionary algorithm. *Computers & Operations Research* 41 (2014), S. 374-385.

SINHA ET AL. 2018

Sinha, A.; Malo, P.; Deb, K.: A Review on Bilevel Optimization: From Classical to Evolutionary Approaches and Applications. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 22 (2018) 2, S. 276-295.

SIVASANKARAN & SHAHABUDEEN 2014

Sivasankaran, P.; Shahabudeen, P.: Literature review of assembly line balancing problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 73 (2014), S. 1665-1694.

SMALE 2011

Smale, D.: Towards an integrated framework for the configuration of modular micro assembly systems. Diss. University of Nottingham (2011). <<http://eprints.nottingham.ac.uk/11926/>> - 28.01.2022.

SMALE & RATCHEV 2010

Smale, D.; Ratchev, S.: Application of a Reconfiguration Methodology for Multiple Assembly System Reconfigurations. In: Ratchev, S. (Hrsg.): *Precision Assembly Technologies and Systems*. International Precision Assembly Seminar. Chamonix, France, 14.02.2010-17.02.2010. Berlin: Springer 2010, S. 239-246. ISBN: 9783642115974. (IFIP Advances in Information and Communication Technology 315).

SPUR & KRAUSE 1997

Spur, G.; Krause, F.-L.: *Das virtuelle Produkt. Management der CAD-Technik*. München: Hanser 1997. ISBN: 3446191763.

STATISTA 2020

Statista (Hrsg.): Maschinenbau in Deutschland 2020. Hamburg: 2020.

STATISTICS 2020

Statistics (Hrsg.): COVID-19 Impact on Industrial Robotics - Global Market Outlook (2019-2027). Rockville: 2020. (Statistics Market Research Consulting zitiert nach de.statista.com).

SUEMITSU ET AL. 2016

Suemitsu, I.; Izui, K.; Yamada, T.; Nishiwaki, S.; Noda, A.; Nagatani, T.: Simultaneous optimization of layout and task schedule for robotic cellular manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering* 102 (2016), S. 396-407.

TASAN & TUNALI 2008

Tasan, S. O.; Tunali, S.: A review of the current applications of genetic algorithms in assembly line balancing. *Journal of Intelligent Manufacturing* 19 (2008) 1, S. 49-69.

TOMPKINS ET AL. 2010

Tompkins, J.; White, J. A.; Bozer, Y. A.: *Facilities planning*. 4. Aufl. Hoboken, NJ: Wiley 2010. ISBN: 9780470444047.

TOPALOGLU ET AL. 2012

Topaloglu, S.; Salum, L.; Supciller, A. A.: Rule-based modeling and constraint programming based solution of the assembly line balancing problem. *Expert Systems with Applications* 39 (2012) 3, S. 3484-3493.

TRUCCO ET AL. 1997

Trucco, E.; Umasuthan, M.; Wallace, A. M.; Roberto, V.: Model-Based Planning of Optimal Sensor Placements for Inspection. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 13 (1997) 2, S. 182-194.

TUBAILEH 2014

Tubaileh, A. S.: Layout of robot cells based on kinematic constraints. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 28 (2014) 11, S. 1142-1154.

UBS 2020

UBS (Hrsg.): Longer Term Investments. Automation and robotics. Zürich: 2020.

ULRICH & HILL 1976

Ulrich, P.; Hill, W.: *Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre*. *Wirtschaftswissenschaftliches Studium: Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt* (1976), S. 304-309.

VAJNA ET AL. 2009

Vajna, S.; Weber, C.; Bley, H.; Zeman, K.: CAX für Ingenieure. Eine praxisbezogene Einführung. 2. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 9783540360391.

VATHOOPAN ET AL. 2019

Vathoopan, M.; Cabral, J.; Wenger, M.; Knoll, A.; Zoitl, A.: Planning and Engineering Component-Based Automation Systems in AutomationML. In: IEEE (Hrsg.): 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Zaragoza, Spain, 10.09.2019-13.09.2019. Piscataway, NJ: IEEE 2019, S. 118-125. ISBN: 9781728103037.

VDI 2860

VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Berlin: Beuth 1990.

VDI/VDE 3682

VDI/VDE 3682: Formalisierte Prozessbeschreibungen - Konzept und grafische Darstellung. Berlin: Beuth 2015.

VDMA 2014

VDMA (Hrsg.): Maschinenbau in Zahl und Bild 2014. Frankfurt: 2014.

VDMA 2019

VDMA (Hrsg.): Ingenieurerhebung 2019. Frankfurt: 2019.

VDMA 2021

VDMA (Hrsg.): Maschinenbau in Zahl und Bild 2021. Frankfurt: 2021.

VOGEL-HEUSER 2014

Vogel-Heuser, B.: Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer 2014, S. 37-48. ISBN: 9783658046828.

WARNECKE ET AL. 1975

Warnecke, H.-J.; Löhr, H.-G.; Kiener, W.: Montagetechnik. Schwerpunkt der Rationalisierung. Mainz: Krausskopf 1975. ISBN: 378300098X. (Produktionstechnik heute 7).

WEICKER 2015

Weicker, K.: Evolutionäre Algorithmen. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015. ISBN: 9783658099572.

WEIDEMANN & DRATH 2010

Weidemann, D.; Drath, R.: Einleitung. In: Drath, R. (Hrsg.): Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML. Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA. Berlin: Springer 2010, S. 1-44. ISBN: 9783642046735. (VDI-Buch).

WOENCKHAUS 1994

Woenckhaus, C.: Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung. Berlin: Springer 1994. ISBN: 9783540572848. (Forschungsberichte iwv 65).

WOENCKHAUS & MILBERG 1993

Woenckhaus, C.; Milberg, J.: Planning of three-dimensional layouts using numerical optimization methods. In: IEEE (Hrsg.): International Conference on Robotics and Automation. Atlanta, USA, 02.05.1993-06.05.1993. Piscataway, NJ: IEEE Computer Society Press 1993, S. 44-49. ISBN: 0818634502.

ZENG ET AL. 2020

Zeng, R.; Wen, Y.; Zhao, W.; Liu, Y.-J.: View planning in robot active vision: A survey of systems, algorithms, and applications. Computational Visual Media 6 (2020) 3, S. 225-245.

ZHANG ET AL. 2017

Zhang, W.; Xu, W.; Liu, G.; Gen, M.: An effective hybrid evolutionary algorithm for stochastic multiobjective assembly line balancing problem. Journal of Intelligent Manufacturing 28 (2017) 3, S. 783-790.

ZIMMERMANN ET AL. 2019

Zimmermann, P.; Paul, M.; Ngoumou, J.; Portail, M.; Lechner, K.; Hönig, G.: Automatisierte Montageanlagenplanung. In: Hees, F. et al. (Hrsg.): Projektatlas Kompetenz Montage. Kollaborativ und wandlungsfähig. Aachen: RWTH Aachen University Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau 2019, S. 42-45. ISBN: 9783948169060.

ZVEI 2021

ZVEI (Hrsg.): Elektroindustrie in Zahlen. Frankfurt: 2021.

Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) in den Jahren 2016 bis 2022 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung der Autorin die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten. In diesen Arbeiten wurden verschiedene Fragestellungen rund um die Analyse und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen untersucht. Entstandene Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden herzlich für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit. Bachelorarbeiten sind im Folgenden mit BA, Semesterarbeiten mit SA und Masterarbeiten mit MA abgekürzt.

- Eickholt, D.: Automatisierte Layoutplanung (BA)
- Göbel, L.: Prozessmodellierung für die automatisierte Montageplanung (SA)
- Huang, Y.: Layouting von Montageanlagen mittels Reinforcement Learning (SA)
- Huang, Y.: Entwurf von Montagelinien mittels Reinforcement Learning (MA)
- Münsterer, M.: Analyse von CAD-Produktdaten als Basis für die automatisierte Anlagenplanung (MA)
- Nadj, M.: Anlagenmodellierung und automatisierte Modellgenerierung für die automatisierte Montageplanung (SA)
- Nentwich, C.: Automatisierte Layoutplanung von Montageanlagen (SA)
- Sepperer, N.: Modellierung von Produktionsressourcen für eine Betriebsmittel-Sammlung in Unity (SA)
- Weiß, F.: Konzeption und softwaretechnische Implementierung einer Softwarearchitektur und eines Datenmodells zur Generierung und Bereitstellung virtueller Prozess- und Ressourcenrepräsentanzen (MA)
- Wienke, S.: Entwicklung und Implementierung einer Methodik zur automatisierten Planung von Produktionsanlagen (SA)
- Zäpfel, M.: Entwicklung und Bewertung von Einsatzszenarien für die automatisierte Montageplanung am Beispiel von PKW-Assistenzsystemen (MA)