

Algorithmische Konzeption von hochautomatisierten Fließmontagesystemen am Beispiel des automobilen Karosseriebaus

vorgelegt von
M. Sc.
Simon Hagemann

an der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark

Gutachterin: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 16. Mai 2022

Berlin 2022

KURZFASSUNG

Die Herstellung von variantenreichen Produkten durch hochautomatisierte Anlagen stellt zunehmend eine Kernkompetenz in der Automobilindustrie dar. Insbesondere die Schnittstelle zwischen der Produktentwicklung und der Produktion – der Produktionsentwicklung – trägt diesbezüglich eine hohe Verantwortung und muss sich steigenden Herausforderungen stellen. Dabei muss in Gewerken, wie dem automobilem Karosserierohbau mit typischerweise hohen Automatisierungsgraden, die Produktionsentwicklung in erster Linie Fließmontagesysteme entwickeln, die aufgrund des hohen Investitionsaufwands eine maximale wirtschaftliche Effizienz aufweisen. Immer kürzere Produktlebenszyklen zwingen Unternehmen zusätzlich dazu, die dafür benötigten Produktionssysteme in immer kürzeren Zeitabständen zu planen. Um genau diesen Herausforderungen entgegenzuwirken, liegt der Fokus der vorliegenden Forschungsarbeit auf einer neuartigen Methode, die eine auf Algorithmen basierende Konzipierung von hochautomatisierten Montagesystemen ermöglicht. Grundlage für die algorithmische Planung bilden Produkt- und Fügefolgeinformationen sowie Projektprämissen. In einer Wissensbasis ist für die Planungsalgorithmen explizites produktionstechnisches Wissen formalisiert sowie implizites Planungswissen mittels vordefinierter Montagetemplates abgelegt.

Die Planungsalgorithmen basieren auf dem impliziten Enumerationsverfahren Branch and Bound. Ein Regelwerk bestimmt dabei, welche Montagetemplates der Wissensbasis enumeriert werden sollen. Randbedingungen stellen dabei sicher, dass die technische Realisierbarkeit der Ergebnisse eingehalten wird sowie die Berechnung einem hohen Effizienzgrad entspricht. Die erarbeitete Methode wurde prototypisch als Softwaresystem realisiert.

Der Prototyp hat Softwareexperimente ermöglicht, die zeigen, dass reale Szenarien in einer Zeit berechnet werden können, die industrielle Anforderungen übertreffen. Darüber hinaus wurde, anhand der Szenarien, die Qualität der algorithmischen Planungsergebnisse einer systematischen Analyse unterzogen. Die Analyse zeigt auf, dass die Ergebnisse einer sehr hohen Qualität entsprechen und der Einsatz im Planungsprozess zu einer deutlichen Effizienzsteigerung führt.

ABSTRACT

The production of multi-variant products using highly automated systems is increasingly becoming a core competence in the automotive industry. In particular, the interface between product development and production – the production development – bears a high responsibility and is facing increasing challenges. In production stages, such as the automotive body-in-white with typically high degrees of automation, production development must primarily develop flow assembly systems that exhibit maximum economic efficiency due to the high investment outlay involved. Furthermore, ever shorter product life cycles are forcing companies to plan the necessary production systems at shorter intervals.

In order to precisely address this challenge, the present research work focuses on a novel method that enables algorithm-based planning of highly automated assembly systems. Product and joining sequence information form the basis for the algorithmic planning. In a knowledge base, explicit production engineering knowledge is formalized, and implicit procedural knowledge is stored by means of predefined assembly scenarios. Considering the knowledge base, the implicit enumeration procedure Branch and Bound is applied and a ruled-based algorithm determines which of the knowledge elements are to be enumerated. Boundary conditions, on the other hand, ensure the technical feasibility of the results.

The developed methodology has been prototypically implemented as a software system. Software experiments have shown that industrial scenarios can be solved in reasonable time. In addition, the quality of the generated system results has been systematically analyzed. The analysis has shown that the results are of high quality and the efficiency of the planning process can be significantly increased.

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich allen Personen herzlich danken, die mich während meiner intensiven Promotionszeit begleitet und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing Rainer Stark für die Betreuung meiner Forschungsarbeit. Herzlichen Dank für die zahlreichen intensiven und richtungsweisenden Diskussionen. Mein Dank gilt außerdem Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens. Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger danke ich für die Leitung des Promotionsverfahrens.

Für die dauerhafte Unterstützung möchte ich mich bei meinen ehemaligen Vorgesetzten Dr.-Ing. Benedikt Kraß und Dr.-Ing. Bernd Lüdemann-Ravit sowie meinen Kolleg*innen Claudia Wick, Dr.-Ing. Holger Burr und Jan Spoor der Mercedes-Benz AG bedanken. Ganz besonderer Dank gilt an dieser Stelle meinen studentischen Mitarbeitern Tom Grabler, Eduard Kim, Johann Wiens, Abdulrahman El Chammaa und Tobias Fahse für die tatkräftige Unterstützung. Ihr habt entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Für das gemeinsame Forschen, den wissenschaftlichen Austausch und das erfolgreiche Veröffentlichenden von Forschungsergebnissen am Fraunhofer IPK möchte ich mich bei Dr.-Ing. Atakan Sünnetcioglu bedanken. Zusätzlich möchte ich mich für die intensive Zusammenarbeit und die gemeinsame Entwicklung der Software Autoplan herzlich bei Gregor Wrobel, Ralf-Erik Ebert und Robert Scheffler der GFaI bedanken. Die vielen spannenden Workshops in Berlin und Sindelfingen waren eine große Inspiration für meine Forschungsarbeit. Werner Krauß gilt der besondere Dank für das Lektorat meiner Dissertation.

Den erfolgreichen Abschluss von Schule, Studium und Promotion verdanke ich ganz wesentlich meinen Eltern Anke und Klaus. Durch ihre tatkräftige Förderung schufen sie den notwendigen Rückhalt und vor allem den notwendigen Ansporn für das Erreichen meiner Ziele. Vielen Dank, dass ihr immer an mich geglaubt habt!

Nicht zuletzt möchte ich meiner Verlobten Andreia für die dauerhafte Motivation, für das Lektorat meiner englischen Texte und den Verzicht auf viele gemeinsame Wochenenden danken: Muito Obrigado!

Simon Hagemann

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG.....	III
ABSTRACT	V
DANKSAGUNG	VII
INHALTSVERZEICHNIS.....	IX
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XII
PSEUDOCODEVERZEICHNIS	XIV
TABELLENVERZEICHNIS	XIV
ABKÜRZUNGS- UND NOTATIONSVERZEICHNIS.....	XV
1 EINLEITUNG	- 1 -
1.1 Motivation	- 1 -
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	- 3 -
1.3 Aufbau der Arbeit und wissenschaftliches Vorgehen.....	- 4 -
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN UND PRÄZISIERUNG DES FORSCHUNGSGEGENSTANDS.....	- 7 -
2.1 Produktionstechnische Einordnung.....	- 7 -
2.1.1 Montage	- 7 -
2.1.2 Montagesysteme.....	- 8 -
2.1.3 Automatisierte Fließmontagesysteme und Karosserierohbausysteme.....	- 9 -
2.2 Planungstechnische Einordnung	- 14 -
2.2.1 Montagesystemplanung.....	- 15 -
2.2.2 Grobplanung.....	- 17 -
2.2.3 Idealplanung und Karosserierohbauplanung	- 17 -
2.3 Die Digitale Fabrik und das PPR-Modell	- 23 -
2.4 Darlegung des Forschungsgegenstands	- 25 -
2.4.1 Abgrenzung und Strukturierung des Forschungsgegenstands.....	- 25 -
2.4.2 Teilproblemstellung I: Algorithmische Produkt- und Fügefolgeanalyse	- 26 -
2.4.3 Teilproblemstellung II: Algorithmische Stations- und Prozessgestaltung	- 27 -
2.4.4 Teilproblemstellung III: Algorithmische Systembildung.....	- 28 -

2.4.5	Anforderungen an die algorithmische Konzipierung von Montagesystemen.....	- 29 -
3	STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK	- 33 -
3.1	Defizite und Potentiale der algorithmischen Planung	- 33 -
3.2	Rechnergestützte Produktionsentwicklung	- 35 -
3.3	Ansätze der automatisierten Planung	- 37 -
3.3.1	Ansätze zur Abstimmung von Fließmontagelinien	- 39 -
3.3.2	Ansätze zur Gestaltung von Fließmontagelinien.....	- 43 -
3.3.3	Ansätze für die Gestaltung von Montagesystemen	- 46 -
3.4	Einordnung bestehender Ansätze und Ableitung der Forschungslücke.....	- 47 -
4	INFORMATIONSTECHNISCHE VERFAHREN DER PRODUKTIONS- PLANUNG.....	- 51 -
4.1	Klassifizierung bestehender Verfahren	- 51 -
4.2	Exakte Verfahren	- 53 -
4.3	Heuristiken.....	- 54 -
4.4	Formulierung der Lösungshypothese	- 57 -
5	METHODE FÜR DIE KONZEPTION VON MONTAGESYSTEMEN	- 59 -
5.1	Methodenentwurf	- 59 -
5.2	Deklarative Wissensbasis	- 66 -
5.2.1	Prozessbibliothek	- 66 -
5.2.2	Prozessprioritätsmatrix.....	- 68 -
5.2.3	Betriebsmittelbibliothek	- 69 -
5.2.4	Montagetemplates	- 71 -
5.3	Modellbildung	- 79 -
5.3.1	Informationsmodelle	- 80 -
5.3.2	Optimierungsmodell.....	- 86 -
5.3.3	Klassifizierung des Formalmodells	- 93 -
5.4	Prozedurale Problemlösungsverfahren	- 94 -
5.4.1	Produkt- und Fügefolgeanalyse.....	- 94 -
5.4.2	Stationsgestaltung	- 98 -
5.4.3	Systembildung.....	- 111 -
5.5	Beantwortung Forschungsfragen und Forschungshypothese	- 114 -
6	SYSTEM FÜR DIE KONZEPTION VON MONTAGESYSTEMEN	- 116 -
6.1	Systementwurf	- 116 -

6.2	Umsetzung der Problemlösungsalgorithmen	- 118 -
6.3	Integration in existierende Systemlandschaften	- 125 -
7	EVALUATION	- 128 -
7.1	Evaluationsplan	- 128 -
7.2	Industrieszenarien	- 129 -
7.2.1	Industrieszenario 1: Baugruppe Heckwagen	- 129 -
7.2.2	Industrieszenario 2: Baugruppe Motorhaube	- 133 -
7.2.3	Industrielle Wertebereiche der Eingangsgrößen	- 135 -
7.3	Informationstechnische und prozessuale Anforderungen	- 136 -
7.3.1	Algorithmenbewertung und -analyse	- 136 -
7.3.2	Systemintegrierbarkeit und PPR-Informationsmodell.....	- 139 -
7.4	Planungsspezifische Anforderungen	- 141 -
7.4.1	Produktspezifische Anforderungen	- 141 -
7.4.2	Produktionsspezifische Anforderungen	- 142 -
7.5	Zwischenfazit	- 147 -
8	SCHLUSSBETRACHTUNG	- 148 -
8.1	Fazit	- 148 -
8.2	Handlungsempfehlungen	- 149 -
8.3	Weitere Forschungsbedarfe	- 150 -
ANHANG		- 152 -
A1	Detailinformationen Evaluation und Industrieszenarien	- 152 -
A2	Algorithmenexperimente.....	- 154 -
A3	Expertenworkshops und Detailbewertungen	- 157 -
LITERATURVERZEICHNIS		- 159 -

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Weltweite Installationen (a) und Bestand von Industrierobotern (b)	- 1 -
Abbildung 2: Aufteilung der Tätigkeiten eines Produktionsplaners.....	- 2 -
Abbildung 3: Aufbau der Forschungsarbeit.....	- 5 -
Abbildung 4: Montageverfahren.....	- 8 -
Abbildung 5: Strukturen hochautomatisierter Montagesysteme.....	- 10 -
Abbildung 6: Prozessbeschreibung einer hochautomatisierten Montagestation.....	- 10 -
Abbildung 7: Karosserierohbau im automobilen Produktentstehungsprozess	- 11 -
Abbildung 8: Struktur des automobilen Karosserierohbaus	- 12 -
Abbildung 9: Bauteilbereitstellung	- 13 -
Abbildung 10: Handhabungsrobotermodul.....	- 13 -
Abbildung 11: Schweißrobotermodul (links); stationäre Schweißzange (rechts)	- 13 -
Abbildung 12: Vorrichtung	- 14 -
Abbildung 13: Fabriklebenszyklus	- 15 -
Abbildung 14: Einordnung der Idealplanung in den Planungsprozess	- 16 -
Abbildung 15: (a) Produktstruktur, (b) Fügefolge	- 18 -
Abbildung 16: (a) Fügelementposition, (b) Sicht auf Schweißpunkte, (c) Schnitt.....	- 19 -
Abbildung 17: Anlagenkonzept im Rahmen der Idealplanung.....	- 20 -
Abbildung 18: Systembildung	- 22 -
Abbildung 19: PPR Informationsmodell in der Idealplanung	- 24 -
Abbildung 20: Informationstechnische Unterstützung über den PEP	- 34 -
Abbildung 21: Disziplinen der automatisierten Produktionsentwicklung	- 39 -
Abbildung 22: Visualisierung der Forschungslücke	- 48 -
Abbildung 23: Disziplinen der Wissensrepräsentation	- 52 -
Abbildung 24: Lösungsverfahren für die algorithmische Anlagenplanung.....	- 53 -
Abbildung 25: Methode für die Konzipierung von Montagesystemen.....	- 60 -
Abbildung 26: Fügefolge- und Produktanalyse	- 62 -
Abbildung 27: Stations- und Prozessgestaltung.....	- 64 -
Abbildung 28: Anlagengesamtstruktur	- 65 -
Abbildung 29: Exemplarisches Stationsszenario einer Rohbauanlage	- 72 -
Abbildung 30: Ausprägung Montagetemplate j1	- 73 -
Abbildung 31: (a) Fügen in Vorrichtung, (b) stationäres Fügen, (c) Doppelequipment ..	- 74 -
Abbildung 32: Stationäres Fügen sj1	- 74 -
Abbildung 33: Stationärer Klebeprozess sj3	- 75 -
Abbildung 34: Erweitertes zweistufiges Handhabungsszenario h2	- 76 -
Abbildung 35: Stationäres Fügen und Doppelwerkzeuge.....	- 77 -
Abbildung 36: Vorgehen der Modellbildung und Verfahrensentwicklung	- 79 -
Abbildung 37: Produktgraph.....	- 80 -
Abbildung 38: Fügefolgegraph	- 82 -
Abbildung 39: Montagesystemgraph	- 83 -
Abbildung 40: Jobvorranggraph	- 84 -
Abbildung 41: Abgetakteter Montageprozess.....	- 85 -
Abbildung 42: PPR-Informationsmodell	- 86 -

Abbildung 43: Optimierungsmodell Prozess- und Stationsgestaltung.....	- 87 -
Abbildung 44: Analyse variantenbehaftete Fügefolge.....	- 95 -
Abbildung 45: Prozessüberführung und Vorrangrelation	- 97 -
Abbildung 46: Ableitung Stationsstruktur	- 98 -
Abbildung 47: Lösungsbaum	- 100 -
Abbildung 48: Entscheidungsbaum Geostation	- 103 -
Abbildung 49: Entscheidungsbaum Ausfügestation	- 106 -
Abbildung 50: Funktion Systembildung	- 112 -
Abbildung 51: Prozessspezifische Entkopplung in der Systembildung.....	- 113 -
Abbildung 52: Ressourcenspezifische Entkopplung in der Systembildung	- 113 -
Abbildung 53: Eingangs- und Ausgangsinformationen.....	- 117 -
Abbildung 54: Architektur und Informationsfluss des Softwaresystems	- 118 -
Abbildung 55: Klassenmodell Stationsgestaltung	- 119 -
Abbildung 56: Elementare Variablen für rekursive Suche	- 122 -
Abbildung 57: Einbindung in existierende Systemlandschaften	- 126 -
Abbildung 58: Fügefolge Industrieszenario 1 – Baugruppe Heckwagen	- 130 -
Abbildung 59: Montagesystem Industrieszenario 1: Baugruppe Heckwagen	- 132 -
Abbildung 60: Fügefolge Industrieszenario 2 – Baugruppe Motorhaube.....	- 133 -
Abbildung 61: Montagesystem Industrieszenario 2: Baugruppe Motorhaube	- 134 -
Abbildung 62: Wertebereich in industriellen Szenarien	- 136 -
Abbildung 63: Softwareexperimente Abschätzung Berechnungsaufwand.....	- 138 -
Abbildung 64: Defizitanalyse in den generierten Anlagenkonzepten.....	- 145 -
Abbildung 65: Stationäres Fügen eines großen Karosseriezusammenbaus.....	- 158 -
Abbildung 66: Frozen Zone einer Aufnahmestelle Zusammenbau	- 158 -

PSEUDOCODEVERZEICHNIS

Pseudocode 1: Methode BeginNewStation.....	- 120 -
Pseudocode 2: Methode EquipGeoStation.....	- 121 -
Pseudocode 3: Methode EquipRespotStation	- 125 -

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Ansätze der rechnergestützten Produktionsplanung	- 35 -
Tabelle 2: Existierende Ansätze des Assembly Line Balancing.....	- 41 -
Tabelle 3: Existierende Ansätze Robotic Assembly Line Balancing	- 42 -
Tabelle 4: Existierende Ansätze Assembly Line Design	- 44 -
Tabelle 5: Existierende Ansätze Robotic Assembly Line Design	- 45 -
Tabelle 6: Existierende Ansätze Assembly System Design.....	- 46 -
Tabelle 7: Eigenschaften exakter Verfahren	- 54 -
Tabelle 8: Eigenschaften logikbasierter Verfahren.....	- 55 -
Tabelle 9: Charakteristiken heuristischer Suchverfahren	- 56 -
Tabelle 10: Charakteristiken lernender Verfahren.....	- 57 -
Tabelle 11: Standardprozesse Verfahren Widerstandspunktschweißen	- 67 -
Tabelle 12: Standardprozesse Verfahren Kleben.....	- 67 -
Tabelle 13: Prozesse Verfahren Handhabung	- 67 -
Tabelle 14: Ausschnitt Prozessprioritätsmatrix	- 68 -
Tabelle 15: Attributierung Bauteilbereitstellung	- 69 -
Tabelle 16: Attributierung Spann- und Fixiereinrichtungen.....	- 70 -
Tabelle 17: Attributierung Handhabungseinrichtung	- 70 -
Tabelle 18: Attributierung Fügeeinrichtung	- 71 -
Tabelle 19: Übersicht Montagetemplates	- 78 -
Tabelle 20: Notationen im Fügefolgemodell	- 81 -
Tabelle 21: Notationen im Ressourcenmodell	- 82 -
Tabelle 22: Notationen im Prozessmodell	- 84 -
Tabelle 23: Klassifizierung des Formalmodells.....	- 94 -
Tabelle 24: Fügeinhalte Industrieszenario 1	- 130 -
Tabelle 25: Fügeinhalte Industrieszenario 2	- 133 -
Tabelle 26: Softwarebasierte Berechnungsergebnisse.....	- 138 -
Tabelle 27: Verifikation Anforderung C.1 und C.2	- 139 -
Tabelle 28: Verifikation Anforderung C.3.....	- 141 -
Tabelle 29: Verifikation Anforderung B.1 und B.2	- 142 -
Tabelle 30: Verifikation Anforderung A.1-A.3	- 147 -
Tabelle 31: Standardprozesszeiten.....	- 152 -
Tabelle 32: Ausschnitt Prozessprioritätsmatrix	- 153 -

ABKÜRZUNGS- UND NOTATIONSVERZEICHNIS

Abkürzungen

ALB.....	Assembly Line Balancing
ALD.....	Assembly Line Design
AML.....	AutomationML
ASD.....	Assembly System Design
BB	Branch and Bound Verfahren
BFS.....	Breitensuche, engl. Breath-first-search
CAD	Computer Aided Design
CAP	Computer Aided Planning
CAPP.....	Computer Aided Production Planning
CIM	Computer Integrated Manufacturing
DFS	Tiefensuche, engl.: Depth-first-search
EDM.....	Engineering Data Management
GUI.....	Graphical User Interface
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MIP.....	Mixed Integer Programming
OR	Operations Research
PPR.....	Produkt Prozess Ressource
PSD	Production System Design
RALB	Robotic Assembly Line Balancing
RALD.....	Robotic Assembly Line Design
SALB.....	Simple Assembly Line Balancing
UID.....	Unique Identifier
WPS.....	Widerstandspunktschweißen

Notationen

a	Montagetemplate
A	Menge aller Montagetemplates
A_e	Menge aller Templates aus Montagetemplateklasse e
b	Anzahl an Bibliotheksressourcen
B	Matrix erlaubter Zuordnungen Fügeelement e zu Prozess i
c	Taktzeitprämisse
d_g	Dauer des Prozesses g
d_{is}	Dauer der Prozesse i in Station s
d_o	Zeitlicher Abstand zweier Prozesse, die durch Kante o verbunden sind
d_s	Dauer aller Prozesse in einer Station
e	Montageaufgabe: Fügeelement oder Handhabungsschritt
e_i	Einheitsvektor mit Wert 1 an Stelle i
E	Anzahl an Fügeelementen
E_g	Anzahl aller geometriebildender Fügeelemente

E_j	.....	Anzahl Fügeelemente Job j
f	.....	Fügeschritt
F	.....	Menge aller Fügeschritte
g_i	.....	Erforderte Geometrieprozesse an der ersten Station
G	.....	Matrix Fügeelemente zu Prozessen
h	.....	Bibliotheksressourcen
H	.....	Menge aller Bibliotheksressourcen
i	.....	Bibliotheksprozess
I	.....	Menge aller Bibliotheksprozesse
j	.....	Job
J	.....	Anzahl Jobs
k	.....	Vektor der Kosten aller Bibliotheksressourcen
k_h	.....	Kosten der Ressource h
K	.....	Kosten eines Stationsverbunds
K^*	.....	bester bekannter Kostenwert für Stationsverbund
l	.....	Anzahl Montagetemplates
$\underline{L}$	.....	Untere (globale) Schranke
$\bar{L}$	.....	Obere (lokale) Schranke
m_{as}	.....	Binäre Variable zur Zuweisung eines Templates a zu Station s
M	.....	Matrix erlaubte Zuordnungen Fügeelement e zu Prozess i
n	.....	Anzahl an Stationen
n_f	.....	Anzahl eingehender Bauteile in Fügeschritt f
N	.....	Menge aller Nachfolger
o_{is}	.....	Anzahl zugeordneter Fügeelemente zu Prozessen i in Station s
o_j	.....	Anzahl zugeordneter Fügeelemente aus Job j
O	.....	Anzahlen zugeordneter Fügeelemente
O_s	.....	Anzahlen zugeordneter Fügeelemente zu Station s
p_i	.....	Anzahl zugewiesener Bibliotheksprozesse i über alle Stationen
$p_{i,crit}$	.....	Mindestanzahl zugewiesener Bibliotheksprozesse i über alle Stationen
P	.....	Vektor der Anzahl zugeordneter Bibliotheksprozesse zu Stationen
q	.....	Anzahl an Bibliotheksprozessen
Q	.....	Optimierungsproblem mit Index i
Q_i	.....	Optimierungsteilproblem mit Index i
Q'_i	.....	Relaxation des Problems Q_i
Q_0	.....	Ausgangsproblem
r_{hs}	.....	Anzahl zugeordneter Bibliotheksressourcen h zu Station s
R	.....	Vektor über die Anzahl zugeordneter Bibliotheksressourcen
R_s	.....	Vektor über die Anzahl zugeordneter Bibliotheksressourcen zu Station s
s	.....	Station
S	.....	Menge aller Stationen
S_g	.....	Menge aller Geometriestationen
S_a	.....	Menge aller Ausfügestationen
S_f	.....	Menge aller Stationen, die dem Fügeschritt f zugeordnet sind

S_g	Menge aller Geometriestationen
t_{ag}	Anzahl zugewiesener Bibliothekselemente zu Montagetemplates
T	Matrix Ressourcen zu Montagetemplates
ti_{ai}	Zuordnungsvariable einer Anzahl an Bibliotheksprozessen i zu einem Template a
TI	Template-Prozess Matrix
u_a	Ausprägung des Montagetemplates a
U	Matrix Prozesspriorität
$U(Q)$	Lösungsraum von Problem Q
$v_{i,i'}$	Priorität zwischen Prozess i und i'
V	Menge aller Vorgänger
w	Zuordnungsvektor ob Bibliotheksressourcen Fügeroboter sind
w_{crit}	Kollaborationsprämisse - max. gleichzeitig arbeitender Fügeroboter
w_h	Binäre Zuordnungsvariable ob Ressource h ein Fügeroboter ist
w_s	Anzahl Fügeroboter in Station s
w_S	Anzahl Fügeroboter Stationen S
W	Matrix Jobs zu Bibliotheksprozessen
x_{is}	Startzeit der Prozesse i in Station s
y_{eis}	Binäre Hilfsvariable für die Zuordnung von Fügeelement e zu Prozessen i in Station s
z_{is}	Endzeit der Prozesse i in Station s
z_s	Endzeit der Station s
ε_s	Stationskonfiguration durch Zuweisung von Templates
η	Verfügbarkeit
η_h	Verfügbarkeit der Bibliotheksressource h
η_s	Stationsverfügbarkeit
η_{crit}	Verfügbarkeitsprämisse auf Stationsebene
κ	Kombinationseinschränkung
μ_{ij}	Variable für erlaubte Zuordnungen Job j zu Prozess i
μ_{ie}	Variable für mögliche Zuordnungen Fügeelement e zu Prozess i
ς_κ	Kombinationseinschränkungsvektor
τ	Zeitpunkt
τ_i	Standardprozesszeit Prozess i
$\tau_{s,start}$	Taktbeginn
$\tau_{s,end}$	Taktende

1 EINLEITUNG

Die Herstellung von variantenreichen Produkten durch hochautomatisierte Anlagen stellt zunehmend eine Kernkompetenz in der Automobilindustrie dar. Insbesondere die Schnittstelle zwischen der Produktentwicklung und der Produktion – der Produktionsentwicklung – trägt diesbezüglich eine hohe Verantwortung und muss sich steigenden Herausforderungen stellen. (Stanev Stilian 1979, S. 1–2) Dabei muss in Gewerken wie dem automobilem Karosserierohbau mit typischerweise hohen Automatisierungsgraden die Produktionsentwicklung in erster Linie Montagesysteme entwickeln, die aufgrund des hohen Investitionsaufwands eine maximale wirtschaftliche Effizienz aufweisen (Walla 2015, S. 1–2). Die vorliegende Forschungsarbeit beschäftigt sich mit der algorithmischen Konzipierung von Fließmontagesystemen am Beispiel des automobilen Karosserierohbaus. In diesem Kapitel wird diesbezüglich die Motivation, Problemstellung und Zielsetzung dieser Arbeit aufgezeigt. Der letzte Abschnitt stellt den Aufbau der wissenschaftlichen Arbeit dar.

1.1 Motivation

Die Industrie unterliegt einer ungebrochenen Entwicklung hinsichtlich der Automatisierung von Produktionsvorgängen. Insbesondere die jährlich steigenden weltweiten Installationen sowie der steigende Bestand an Industrierobotern indizieren den Trend zur Automatisierung wie Abbildung 1 zeigt. Die Abbildung zeigt, dass sich die jährliche Installation an Industrierobotern zwischen den Jahren 2010 und 2020 fast verdreifacht hat, der Bestand sogar vervierfacht. (Müller 2018, S. 1–2; Statista 2019)

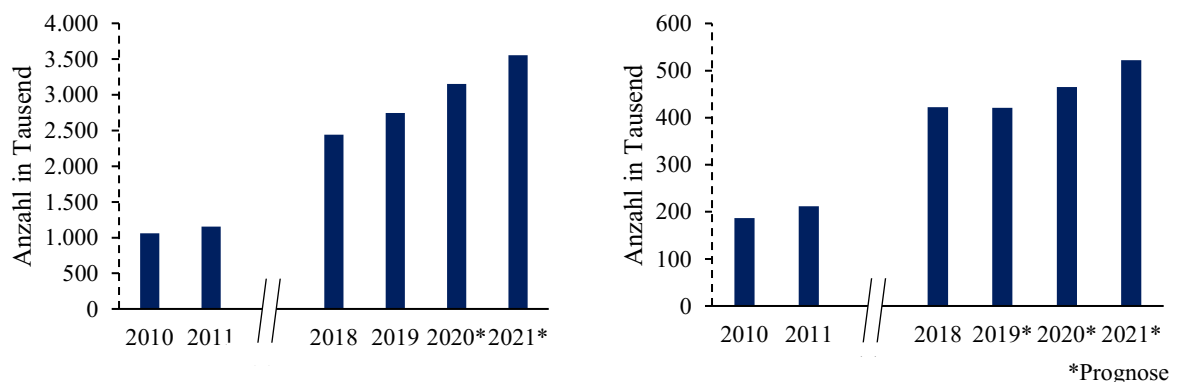


Abbildung 1: Weltweite Installationen (a) und Bestand von Industrierobotern (b) ¹

Der Automatisierung stehen große Investitionen für Hardware und Dienstleistungen gegenüber, weshalb eine umfangreiche virtuelle Planung und Absicherung unablässig sind. Für den initialen Entwurf eines Montagesystems im automobilen Karosserierohbau analysiert der technische Produktionsplaner unter Berücksichtigung der Projektprämissen zunächst das Produktmodell hinsichtlich verschiedener Varianten, möglicher Montagereihenfolgen und der Anzahl und den Eigenschaften der Verbindungselemente (VDI 2011, S. 11). Währenddessen

¹ Angelehnt an: Statista 2019.

nutzen Absicherungsspezialisten Simulationstools, um die Baubarkeit des virtuellen Produkts in Verbindung mit angenommenen Montagereihenfolgen sicherzustellen. Diese Datenbasis ermöglicht es dem Planer durch hoch iterative und komplexe Prozesse aus den einzelnen Fügeschritten eine Stationsstruktur abzuleiten, einen Montageprozess zu kreieren und benötigte Betriebsmittel zuzuweisen.

In den frühen Phasen der Produktionsentwicklung sind schnelle Entwürfe von Montagesystemen für die Bewertung von alternativen Systemlösungen und Planungsprämissen unabdingbar. Konventionelle und templatebasierte Planungsmodelle stoßen dabei insbesondere aufgrund der hohen manuellen Arbeitsanteile sowie einer steigenden Variantenvielfalt und Produktkomplexität an ihre Grenzen. Zusätzlich stellen sie einen fehleranfälligen Prozess dar und führen dazu, dass die Erstellung erster Anlagenentwürfe eine lange Zeit in Anspruch nimmt und die Entscheidungsgeschwindigkeit in naheliegende Bereiche sowie der Produktentwicklung reduziert. (Mas et al. 2015, S. 677)

Eine steigende Produktkomplexität, die insbesondere durch Bestrebungen der Gewichtsreduktion bei gleichbleibenden Sicherheit- und Komfortstandards hervorgerufen wird, hat zugleich zu einem drastischen Anstieg des Aufwands in der Produktionsentwicklung geführt. Der intelligente Leichtbau wird durch die Optimierung und Kombination verschiedener Werkstoffe getrieben und bedarf aus technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten einem Mix verschiedener Fügetechnologien. (Henning und Moeller 2011, S. 743–744)

Anlagenplaner müssen intuitiv oder anhand von einfachen Heuristiken entscheiden, welche Designalternativen nahe am wirtschaftlichen und technischen Optimum liegen, ohne dabei die Möglichkeit zu haben, alle Designalternativen zu betrachten (Burr 2008, S. 27; Kiefer 2007, S. 56–64). Das prozedurale und implizite Wissen zum Lösen der komplexen Planungsaufgabe basiert auf der individuellen Erfahrung und Kreativität des Montagesystemplaners.

In Abbildung 2 wird die zeitliche Aufteilung der Tätigkeiten eines Anlagenplaners aufgezeigt und lässt erkennen, dass nur 20% der Arbeitszeit für die reine Planung der Montageanlage verwendet wird. Jedoch bieten insbesondere die hohen Zeitanteile für die Informationsbeschaffung und Abstimmung hohe Automatisierungspotentiale. Menges spricht von einem Automatisierungspotential der Produktionsplanung von ca. 40 % bei einer konsequenten Umsetzung der digitalen Fabrik (Raimund Menges 2005, S. 14–16).

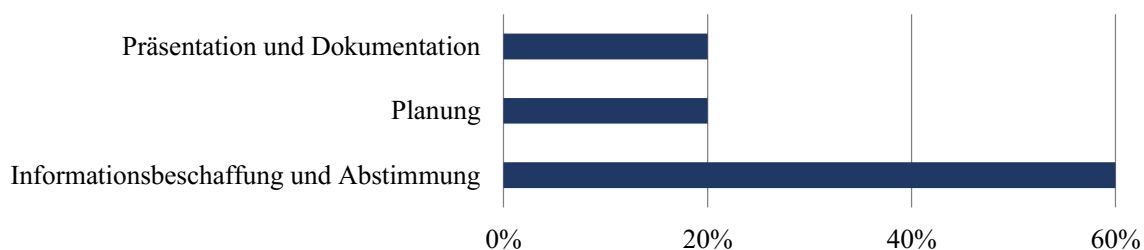


Abbildung 2: Aufteilung der Tätigkeiten eines Produktionsplaners²

² Angelehnt an: Bracht et al. 2011, S. 61.

Um der steigenden Planungskomplexität und des daraus resultierenden Mehraufwands gebührend entgegenzuwirken und eine hohe Planungsqualität sicherzustellen, ist ein standardisiertes Vorgehen und eine erhöhte rechnerbasierte Unterstützung des Montagesystemplaners notwendig. Eine strukturierte und algorithmenbasierte Montagesystemkonzeption trägt damit nicht nur zu einem elementaren Beitrag zur Verkürzung der Produktionsentwicklung bei, sondern gibt dem Planer die Möglichkeit sich auf Problemstellungen zu fokussieren, die die menschliche Kreativität, Intelligenz und Weitsicht erfordern (Bauer 2015, S. 1–2).

Kommerzielle Planungssysteme ermöglichen dem Planer die digitale Planung von Produktionssystemen, reduzieren den Aufwand einer technischen Produktionsplanung aber nur bedingt und erfordern darüber hinaus ein hohes prozedurales Expertenwissen (Michalos et al. 2015, S. 69–71; Weidner 2014, S. 51–53). In Wissenschaft und Industrie sind wenige Ansätze mit dem Ziel einer algorithmischen Montagesystemkonzeption zu finden. Existierende Ansätze wie zum Beispiel MICHELS zeigen auf, dass diese fähig sind, Teilproblemstellungen algorithmisch anhand einfacher Heuristiken zu lösen (Michels et al. 2018, 320 ff.). Den Anforderungen und Komplexitätsgraden wie sie im industriellen Karosseriebau vorzufinden sind, können diese aber nicht gerecht werden.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Der Anlagenplanungsprozess zeichnet sich insbesondere durch die Kreativität, die Problemlösungsfähigkeit und die Intuition der Anlagenplanungsexperten aus (Begoña Toledo Muñoz et al. 2015, 65; Bracht et al. 2011, S. 42). Diese Fähigkeiten ermöglichen es dem Planungsexperten trotz eines stark dynamischen Umfelds eine große Menge an Informationen und Einflussfaktoren während der Anlagenplanung zu berücksichtigen und eine Anlage zu entwickeln, die sich nahe am Optimum befindet.

Im Konzipierungsvorgang erfährt der Produktionsplaner dabei wenig softwaretechnische Unterstützung (Michalos et al. 2015, S. 69–70). Doch insbesondere in den frühen Planungsphasen muss der Planer eine Vielzahl an Einflussfaktoren und Eingangsgrößen berücksichtigen, die sich aus einer großen Anzahl an Produktvarianten und Planungsprämissen ergeben. Bereits die Menge der Eingangsgrößen impliziert eine große Anzahl an Lösungsalternativen für die zu planende Anlage. Selbst erfahrene Planungsexperten haben diesbezüglich nicht annähernd die Möglichkeit alle Planungsalternativen zu berücksichtigen. Der Anlagenentwicklungsvorgang gestaltet sich daher sehr individuell und entspricht einem stark iterativen Prozess. Hinsichtlich der algorithmischen Konzipierung von Montagesystemen lässt sich zwar das produktionstechnische und deklarative Wissen der Produktionsplaner formalisieren – das prozedurale und sehr individuelle implizite Wissen, die Kreativität und Problemlösungsfähigkeit hingegen nur bedingt. (Bracht et al. 2011, S. 64)

Vor diesem Hintergrund ist die Zielsetzung dieser wissenschaftlichen Arbeit eine Methode zu entwickeln, die es trotz der soeben beschriebenen Komplexität ermöglicht, den Produktionsplaner in den frühen Planungsphasen durch die algorithmische Konzipierung von Montageanlagen zu unterstützen und dadurch eine Effizienzsteigerung (Ziel 1) sowie Qualitätssteigerung (Ziel 2) im Produktentstehungsprozess hervorzurufen.

Ziel 1: Effizienzsteigerung in der Montagesystementwicklung

Es ist es nicht gewollt, den Produktionsplaner zu ersetzen, sondern vielmehr in frühen Planungstätigkeiten³ so zu unterstützen, dass er sich auf Arbeitsvorgänge konzentrieren kann, die seine Kernkompetenzen erfordern – der detaillierten Optimierung der Anlage mit dem Ziel, die Qualität der Anlagenplanung zu erhöhen. Die Optimierung von Produktionssystemen kann verschiedene Ziele fokussieren, wie der Effizienz- und Qualitätssteigerung oder die Nachhaltigkeit der Produktion. Die Optimierung erfolgt auf Basis eines ersten Anlagenkonzeptes und erfordert ein hohes Maß an Problemlösungsfähigkeit sowie Kreativität des Anlagenplaners. Diese kann auf verschiedenen Ansatzpunkten basieren, wie der produktionsgerechten Produktbeeinflussung, der Materialflussoptimierung auf Basis von Materialflusssimulationen oder der Entwicklung alternativer Produktionskonzepten.

Ziel 2: Erhöhung der Dokumentationsqualität der Montagesystementwicklung

Die frühen Phasen der Produktionsentwicklung finden meist manuell und ohne digitale Unterstützung statt. Für die vollständige Dokumentation von Anlagen sind Verknüpfungen zwischen dem Produkt-, dem Prozess- und dem Ressourcenmodell notwendig. Der Dokumentationsvorgang ist diesbezüglich sehr fehleranfällig und auf Grund des hohen Aufwands wird oft auf die vollständige Dokumentation der Montagesysteme verzichtet. Ziel ist es den Planer nicht nur bei der Konzipierung, sondern auch bei der Dokumentation der Planungsergebnisse zu unterstützen.

Ziel 3: Digitalisierung der frühen Konzipierungsphasen und Sicherstellung der Datendurchgängigkeit zwischen der Produkt- und Produktionsentwicklung

Durch die fehlende digitale sowie vollständige Montagesystemdokumentation kommt es zu einem Bruch in der Datendurchgängigkeit zwischen der Produktentwicklung und der Produktion. Ziel ist es, diesen Bruch zu überwinden und eine Digitalisierung und Datendurchgängigkeit zwischen der Produkt- und Produktionsentwicklung herzustellen, vgl. Ziel 3.

1.3 Aufbau der Arbeit und wissenschaftliches Vorgehen

Die vorliegende Arbeit unterteilt sich in acht Kapitel, welche drei wissenschaftlichen Phasen zugeordnet werden können (ausgenommen der Schlussbetrachtung), wie Abbildung 3 darstellt: der Analyse, der Synthese und der Evaluation. Diese Zuordnung orientiert sich an den Forschungsleitfäden von STARK und BLESSING (Stark et al. 2016, S. 10–24; Blessing und Chakrabarti 2009, 39-38).

³ In der Automobilindustrie beginnt die Produktionsentwicklung bereits zu Beginn der Produktentwicklung. Die detaillierte zeitliche Einordnung der Produktionsentwicklung in den Produktentstehungsprozess erfolgt in Kapitel 2.2.1 Seite- 19 - ff., bzw. in Abbildung 14.

Der Analyseteil dieser Arbeit befasst sich mit der Untersuchung des Forschungsgegenstands und umfasst die Kapitel 1-3. Kapitel 3-6 befassen sich mit der Synthese der Lösung und Kapitel 7 mit der Evaluation. Kapitel 8 stellt die Schlussbetrachtung dar.

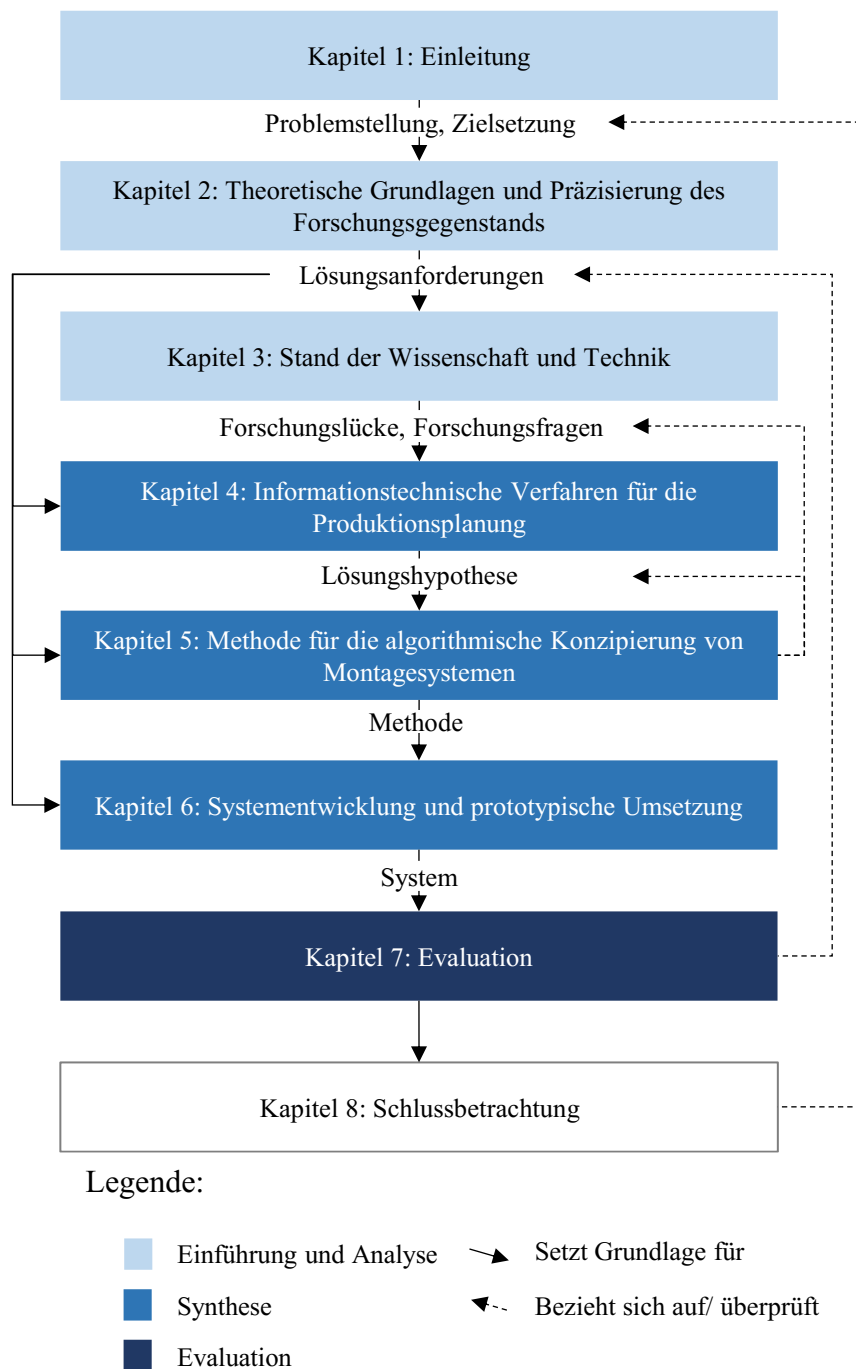


Abbildung 3: Aufbau der Forschungsarbeit⁴

In diesem ersten Kapitel 1 werden die Motivation, Problemstellung und die Zielsetzung dieser Arbeit beschrieben. Auf Basis der Problemstellung wird in Kapitel 2 der Forschungsgegenstand präzisiert. Zunächst wird dieser anhand der dargelegten theoretischen Grundlagen unter produktions- (Abschnitt 2.1) und planungstechnischen Aspekten (Abschnitt 2.2) in den

⁴ Eigene Abbildung

Gesamtkontext positioniert. Daraufgehend wird dieser detailliert analysiert und beschrieben sowie Anforderungen an eine Lösung abgeleitet (Abschnitt 2.3). Kapitel 3 untersucht den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik. Einleitend wird dabei in Abschnitt 3.1 auf das Spektrum manueller und templatebasierter Planungsverfahren eingegangen und das Potenzial der Planungsautomatisierung anhand bestehender Veröffentlichungen aufgezeigt. Folgend werden rechnergestützte (Abschnitt 3.2) und automatisierte Verfahren (Abschnitt 3.3) für die Konzipierung von Montagesystemen untersucht. In Abschnitt 3.4 werden die existierenden Ansätze, wie in Kapitel 2 der Forschungsgegenstand dieser Arbeit, in den Forschungskontext eingeordnet und gegen die definierten Anforderungen bewertet. Kapitel 4 leitet die Synthese ein. In diesem Kapitel werden Verfahren der Informationstechnik untersucht, die ein hohes Potential hinsichtlich der Anwendung für die algorithmische Konzipierung von Montagesystemen aufzeigen. Diese werden folglich gegen die Lösungsanforderungen bewertet. Kapitel 5 stellt den Kern der Synthese dar: die Methodenentwicklung.

Die Methodenentwicklung basiert auf der Forschungslücke und verfolgt das Ziel, die Lösungsanforderungen zu erfüllen und die Forschungsfragen zu beantworten. Bezugnehmend darauf wird zunächst der Methodenentwurf und der Zusammenhang zwischen den einzelnen Teilkomponenten beschrieben (vgl. Abschnitt 5.1), deren spezifische Funktionsweisen in den letzten zwei Kapiteln näher erläutert werden (vgl. Abschnitt 5.2 & 5.4). In Kapitel 6 wird vorgestellt, wie die entwickelte Methode in ein Softwaresystem überführt wird. Dabei wird die Systemarchitektur beschrieben, die prototypische Implementierung der Wissensbasis und die Problemlösungskomponenten, aber auch die Integration in die bestehende Systemlandschaften. Die entwickelte Methode und das System ermöglichen in Kapitel 7 die Evaluation anhand der Lösungsanforderungen und definierten Ziele. Kapitel 8 stellt die Schlussbetrachtung dar, in der primär auf die Erfüllung der Zielsetzung eingegangen wird.

In dieser wissenschaftlichen Arbeit wird eine Lösung für ein existierendes industrielles Problem erarbeitet. Damit ist sie eindeutig der Realwissenschaft zuzuordnen. Diese Arbeit folgt somit dem Anspruch der Anwendungsorientiertheit. Die in Abschnitt 1.2 definierten industriellen Ziele und die in Abschnitt 2.4.5 definierten Lösungsanforderungen als Teil der Analyse legen diesbezüglich die Grundlage. Sowohl die Ziele als auch die Lösungsanforderungen werden in Kapitel 7 als Teil der Evaluation auf Einhaltung überprüft, wie in Abbildung 3 durch die rückführenden Pfeile dargestellt. Dieses Gerüst der wissenschaftlichen Arbeit stellt sicher, dass die wissenschaftlichen Erkenntnisse aus dem Syntheseteil auch zu einem signifikanten industriellen Mehrwert für die geschilderten realen Probleme der Arbeit führen.

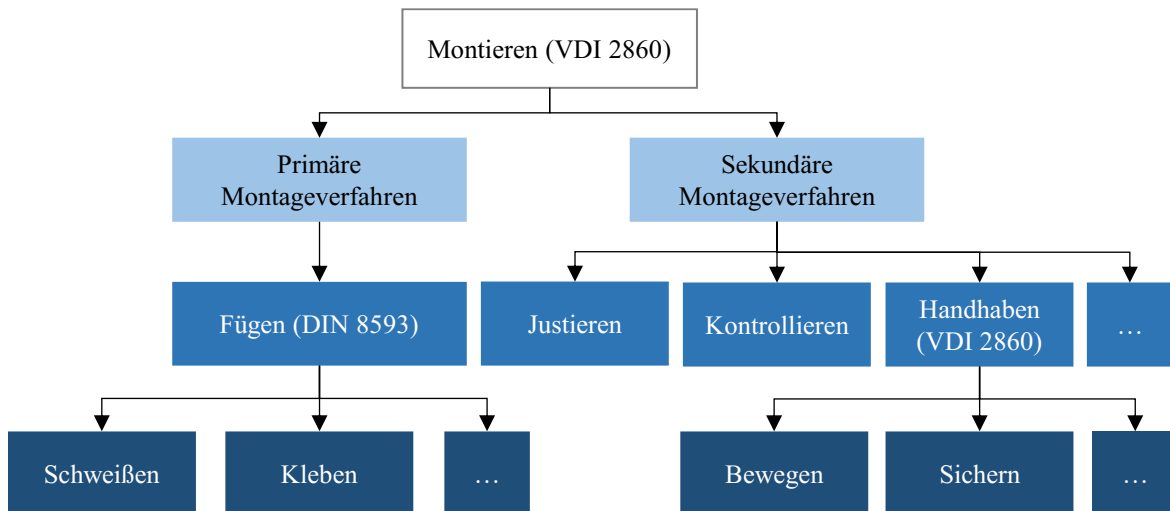
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN UND PRÄZISIERUNG DES FORSCHUNGSGEGENSTANDS

Dieses Kapitel dient der Präzisierung des Forschungsgegenstands. Diesbezüglich wird die Problemstellung anhand der produktions- und planungstechnischen Grundlagen im Gesamtkontext positioniert. Sowohl Abschnitt 2.1 als auch Abschnitt 2.2 folgen einem Vorgehen vom Groben ins Feine – leiten vom Gesamtkontext in den spezifischen Kontext dieser Forschungsarbeit über. Diesbezüglich wirkt Abschnitt 2.3 ergänzend und führt in den Themenkomplex der Digitalen Fabrik ein. Abschnitt 2.4 führt die produktions- und planungstechnischen Sichtweisen wieder zusammen und legt den Forschungsgegenstand dar. Besonders fokussiert werden dabei industrielle Aspekte des automobilen Karosseriebaus, dem in der Wissenschaft selten Aufmerksamkeit gewidmet wird.

2.1 Produktionstechnische Einordnung

2.1.1 Montage

Die Aufgabe der Montage ist es aus mehreren Einzelteilen oder Zusammenbauten ein Produkt höherer Komplexität und vorgegebener Funktion zu kreieren (Stefan Hesse und Viktorio Malisa 2016, S. 530). Dabei kann das Themenfeld Montage weiter in die primäre und sekundäre Montage unterteilt werden, wie Abbildung 4 zeigt (Lotter 2006, S. 59). Diese zwei Bereiche der Montage unterscheiden sich insbesondere durch ihren Wertschöpfungsgrad der entsprechenden Montageverfahren. Primäre Montageverfahren beschreiben genau die Verfahren, die der Wertschöpfung in der Montage dienen und damit den Fügeprozessen. Sekundäre Montageverfahren beschreiben hingegen nicht wertschöpfende Montageverfahren, wie z.B. Handhabungsverfahren. Das Fügen stellt das elementare Verfahren der Montage dar und ist keinesfalls mit dem Begriff der Montage gleichzusetzen. Das Fügen wird in DIN 8593-0 als „das auf Dauer angelegte Verbinden [...] von zwei oder mehr Werkstücken [...]“ bezeichnet (DIN 8593-0, S. 3). Damit fasst der Begriff Fügen mehrere Fügeverfahren zusammen, die auszugsweise nach der DIN 8593-0 in Abbildung 4 dargestellt werden (DIN 8593-0, S. 5). Auch die sekundären Montageverfahren werden in der Abbildung weiter untergliedert. Insbesondere die Handhabungsverfahren spielen für die Montagekonzipierung eine entscheidende Rolle und werden aus diesem Grund weiter nach VDI 2860 untergliedert (VDI 2860, S. 4).

Abbildung 4: Montageverfahren⁵

2.1.2 Montagesysteme

Die Einrichtung für das Ausführen der eingeführten Montageprozesse wird als Montagesystem bezeichnet (Jonas 2000, S. 9). Montagesysteme können durch eine Vielzahl von Eigenschaften differenziert werden. Die folgende Charakterisierung nach Fertigungsart, Montageprinzip und Automatisierungsgrad dient in diesem Kontext der produktionstechnischen Einordnung des Forschungsgegenstands. Die *Fertigungsart* wird durch die Anzahl an Wiederholungen eines Prozesses im Produktionsablauf bestimmt und kann konkret in (i) Einzelfertigung, (ii) Serienfertigung und (iii) Massenfertigung unterteilt werden (Sihn et al. 2016, S. 33). Von der Einzelfertigung wird dabei genau dann gesprochen, wenn – wie der Name indiziert – das Produkt nur ein einziges Mal hergestellt wird und aus diesem Grund auch nur genau einmal montiert werden muss. Dadurch zeichnet sich die Einzelmontage insbesondere durch ihre hohe Flexibilität aus, führt jedoch aufgrund der Individualität zu sehr hohen Kosten (Spur et al. 2013, S. 525). Die Einzelfertigung spielt in der industriellen Produktion aus diesem Grund eine untergeordnete Rolle. Die Serienfertigung hingegen zeichnet sich durch die Wiederholung der Fertigungstätigkeit aus und wird bei sehr hohen Wiederholungen auch Massenfertigung genannt. Für die Serienfertigung und Massenfertigung bieten sich verschiedene Montageprinzipien an (i) Werkstattmontage, (ii) Reihenmontage, (iii) Fließmontage und (iv) Zwangsmontage (Boysen 2005, S. 6). In der *Werkstattmontage* werden Betriebsmittel gleicher Funktion örtlich in Werkstätten gegliedert. Der Montageablauf orientiert sich dabei an der räumlichen Anordnung der Werkstätten, dem sogenannten Funktionsprinzip (Boysen 2005, S. 6; Sihn et al. 2016, S. 40–44). Alle anderen Montageprinzipien (ii–iv) unterliegen dem Flussprinzip. Im Flussprinzip werden die Fertigungsinstanzen anhand der Reihenfolge der erforderlichen Arbeitsschritte angeordnet. Bei der *Reihenfertigung* werden die einzelnen Arbeitsschritte voneinander durch Puffer entkoppelt und die Bearbeitungszeit individuell festgelegt. Die Weitergabe der Werkstücke erfolgt nach Bedarf. Die Reihenfertigung bietet keine Vorteile gegenüber der *Fließfertigung*, in der die einzelnen Montagestationen ebenfalls anhand einer festgelegten Reihenfolge angeordnet werden, die Arbeitsschritte aber zeitliche

⁵ Angelehnt an DIN 8593-0, S. 5; VDI 2860, S. 4; Jonas 2000, S. 7.

aufeinander abgestimmt werden. (Jonas 2000, S. 8–9) Zuletzt die *Zwangsfertigung*, in der die zeitliche Abhängigkeit zwischen Montagestationen erzwungen wird, in dem die höchste Bearbeitungszeit aus allen einzelnen Stationen als Wert festgelegt wird, an dem die Bauteile weitergegeben werden. (Boysen 2005, S. 6)

Weiter können Montagesysteme nach ihrem Automatisierungsgrad unterschieden werden. Grundlegend wird zwischen (i) manuellen, (ii) hybriden und (iii) automatisierten Montagesystemen unterschieden (Lotter und Wiendahl 2006, S. 106). In *manuellen Montagesystemen* werden Montageprozesse ausschließlich durch Monteure ausgeführt. *Hybride Montagesysteme* kombinieren automatisierte und manuelle Anteile. Dabei kommt es oft zu einer Kooperation von Mensch und Maschine. *Automatisierte Montagestationen* führen Montageprozesse ohne menschlichen Eingriff durch. Dabei kommen zumeist Roboter zum Einsatz. Die drei Automatisierungsgrade haben großen Einfluss auf die Produktivität, die Variantenvielfalt, die Flexibilität und die Ausbringung. Automatisierte Montagesysteme ermöglichen das Produzieren von hohen Stückzahlen unter einer hohen Produktivität, wohingegen sie in der Flexibilität und der Variantenvielfalt weniger gute Eigenschaften aufzeigen. (Lotter und Wiendahl 2006, S. 113) Manuelle Montagesysteme verhalten sich konträr, sie zeigen hohe Qualitäten in Flexibilität und Variantenvielfalt, haben aber große Nachteile in der Produktivität und den Stückzahlen. Hybride Systeme liegen je nach Ausprägung in ihren Eigenschaften zwischen der manuellen und automatisierten Montage. (Spur et al. 2013, S. 482)

2.1.3 Automatisierte Fließmontagesysteme und Karosserierohbausysteme

Der automobile Karosserierohbau ist der Kategorie der automatisierten Fließmontagesystemen zuzuweisen. In Großserien der Automobilindustrie werden vermehrt alle Fügetätigkeiten automatisiert durchgeführt und führen somit zu Automatisierungsgraden von über 90% (Kiefer 2007, S. 7; Fritsche et al. 2012, S. 709). Die Form der Montagesystemstruktur variiert dabei sehr stark und basiert für automatisierte Fließmontagesysteme auf verschiedenen Logikebenen, welche Abbildung 5 aufzeigt. (Lotter und Wiendahl 2006, S. 101–102) Die höchste Ebene eines Montagesystems ist das Montagesystem selbst, welches darunterliegende Montagestationen bündelt. Die Stationsebene wiederum vereint mehrere Montagemodule. Montagemodule entsprechen einer Bündelung von mehreren Ressourcen und führen jeweils einen oder mehrere der in Abschnitt 2.1.1 vorgestellten Montageprozessarten aus. Für einen Schweißprozess würde in dem Montagesystem dementsprechend ein Schweißmodul vorgesehen werden, welches aus einem Roboter, einer Schweißzange und einer Steuereinheit besteht (Kusiak 1987, S. 321). Die Strukturform einer Montagelinie nimmt in dieser Einordnung eine Sonderstellung ein. Sie differenziert sich durch die rein sequenzielle Verkettung der Stationen von der Struktur des Montagesystems: denn die Struktur eines Montagesystems basiert zwar ebenso auf der Bündelung mehrerer Stationen, jedoch kann die Anordnung der Stationen von der rein sequenziellen Verkettung abweichen. Wie in Abbildung 5 ersichtlich wird, kann somit eine Montagelinie ein Teil eines Montagesystems darstellen. Unabhängig von der Struktur eines Montagesystems führt jedes System einen Prozess aus, der gleichermaßen einen Teil eines Montagesystems darstellt wie die Ressourcen. Abbildung 6 (rechts) zeigt in Form eines Gantt-Diagramms einen Montageprozess für die zuvor betrachteten Ressourcen der Montagestation (links). Montagestationen dieser Art kommen im Karosseriebau der Automobilindustrie sehr häufig zum Einsatz.

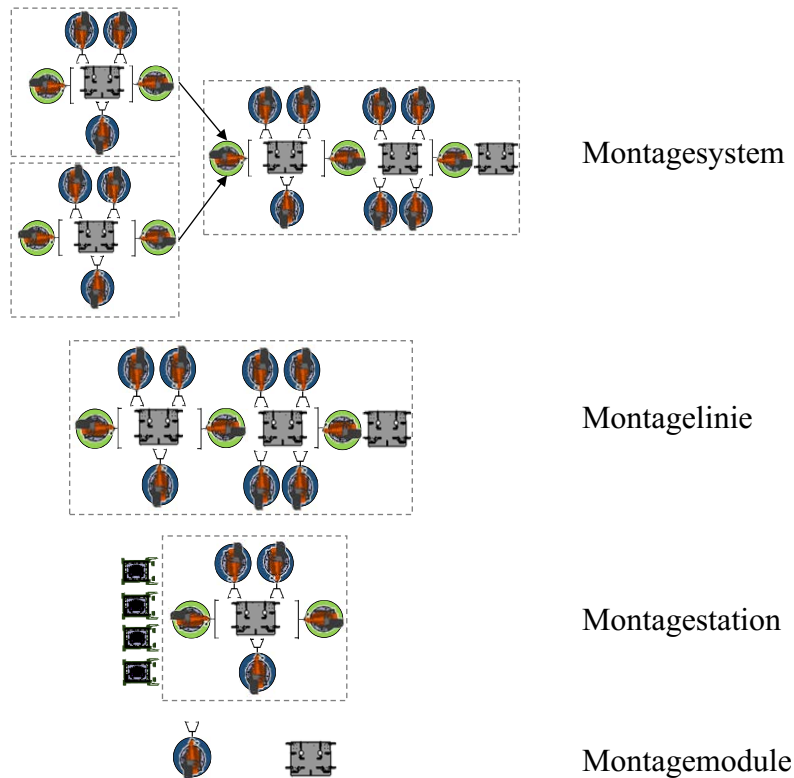


Abbildung 5: Strukturen hochautomatisierter Montagesysteme⁶

Der Prozess einer Station ist dabei in Fließmontagesystemen durch die Taktzeit limitiert. Die einzelnen Prozessbausteine sind in der Abbildung eingefärbt und stellen Handhabungsprozesse (grün) und Fügeprozesse (blau) dar und folgen damit der Einfärbung der Ressourcen in der Montagestation (links). In dem dargestellten Prozess stellen Prozessschritt 1 und 2 den Einlegeprozess, der zu fügenden Bauteile, in die Vorrichtung dar. Prozessschritte 3 und 4 entsprechen Einsammelprozessen, durch welche die Bauteile für den nächsten Stationstakt eingesammelt werden. Die Prozessschritte 5-8 sind Fügeprozesse (z.B. Widerstandspunktschweißen) im Rahmen welcher jeweils mehrere Fügeelemente gesetzt werden können. Prozessschritt 8 stellt zuletzt den Entnahmeprozess der gefügten Bauteile aus der Vorrichtung dar sowie der Weitergabe des Montagegegenstands in die folgende Montagestation.

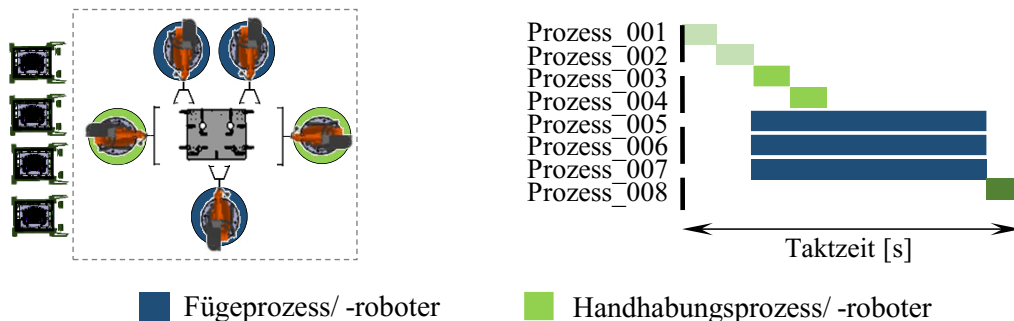


Abbildung 6: Prozessbeschreibung einer hochautomatisierten Montagestation⁷

⁶ Angelehnt an Jonas 2000, S. 10.

⁷ Eigene Abbildung

Montagesysteme können eine beliebige Größe annehmen und stellen dennoch nur einen Teil eines Produktionsverbandes mehrerer Gewerke dar. Die Automobilproduktion ist im Regelfall in sechs Gewerke unterteilt: dem Presswerk, dem Karosserierohbau, der Oberfläche, der Gießerei, dem Antriebsstrang und der Endmontage, siehe Abbildung 7 (Birkert et al. 2013, S. 43). Das Presswerk ist für die Fertigung einzelner Karosserieteile verantwortlich. Der Karosseriebau für deren Zusammenbau und wird aus diesem Grund als erster Teil der Montage im automobilen Produktentstehungsprozess betrachtet (Spur et al. 2013, S. 700). Der Karosserierohbau geht darauffolgend in die Lackierung, bevor in der sogenannten Endmontage das Interieur, wie zum Beispiel Cockpit und Sitze montiert werden, aber auch der komplette Antriebsstrang mit der Karosserie verbunden wird.

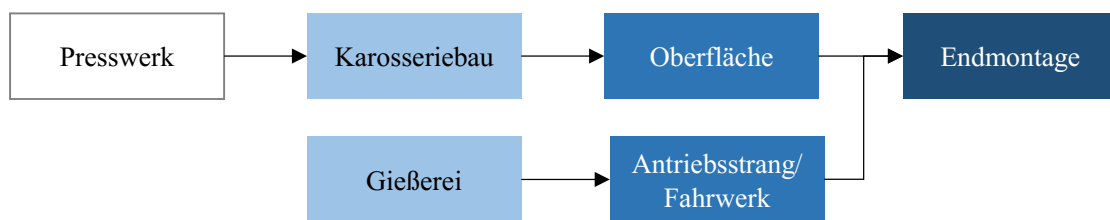


Abbildung 7: Karosserierohbau im automobilen Produktentstehungsprozess⁸

Selbsttragende Karosserien in Personenkraftwagen bestehen aus mehreren hundert Bauteilen (Brockmeyer 2010, S. 6). Im Karosserierohbau werden diese Bauteile in getakteten, hochautomatisierten Montagesystemen, die nach dem Flussprinzip fungieren, miteinander verbunden (Herlyn 2012, S. 56). Die Gesamtstruktur von Karosserierohbauanlagen unterteilt sich dabei in drei sequenziell angeordnete Zusammenbaustufen: (i) Unterbau, (ii) Aufbau und (iii) Anbauteile wie in der folgenden Abbildung 8 dargestellt ist. In der industriellen Praxis werden für die Benennung der Zusammenbaustufen häufig die Abkürzungen Z1, Z2 und Z3 vorgefunden (Burr 2008, S. 153; Kiefer 2007, S. 9). In jeder der drei Zusammenbaustufen wiederum wird die Karosserie traditionell in Baugruppen (BG) unterteilt. So besteht die erste Zusammenbaustufe aus dem Hauptboden, dem Vorbau und dem Heckwagen. Die zweite Zusammenbaustufe aus den Seitenwänden und dem Dach und die dritte Zusammenbaustufe aus den Anbauteilen wie der Motorhaube, Türen und Heckklappe. In der industriellen Produktion hat sich dadurch eine Baumstruktur durchgesetzt, in der sich für jede Fertigungsstufe die einzelnen Baugruppen um sogenannte Hauptlinien anordnen. Die Struktur innerhalb der Baugruppen hängt wiederum sehr stark von der Produktstruktur ab und variiert von daher zwischen linienförmigen bis hin zu baumartigen Strukturen.

⁸ Angelehnt an Kiefer 2007, S. 8; Wemhöner 2005, S. 19; Dangelmaier 2001, S. 84.

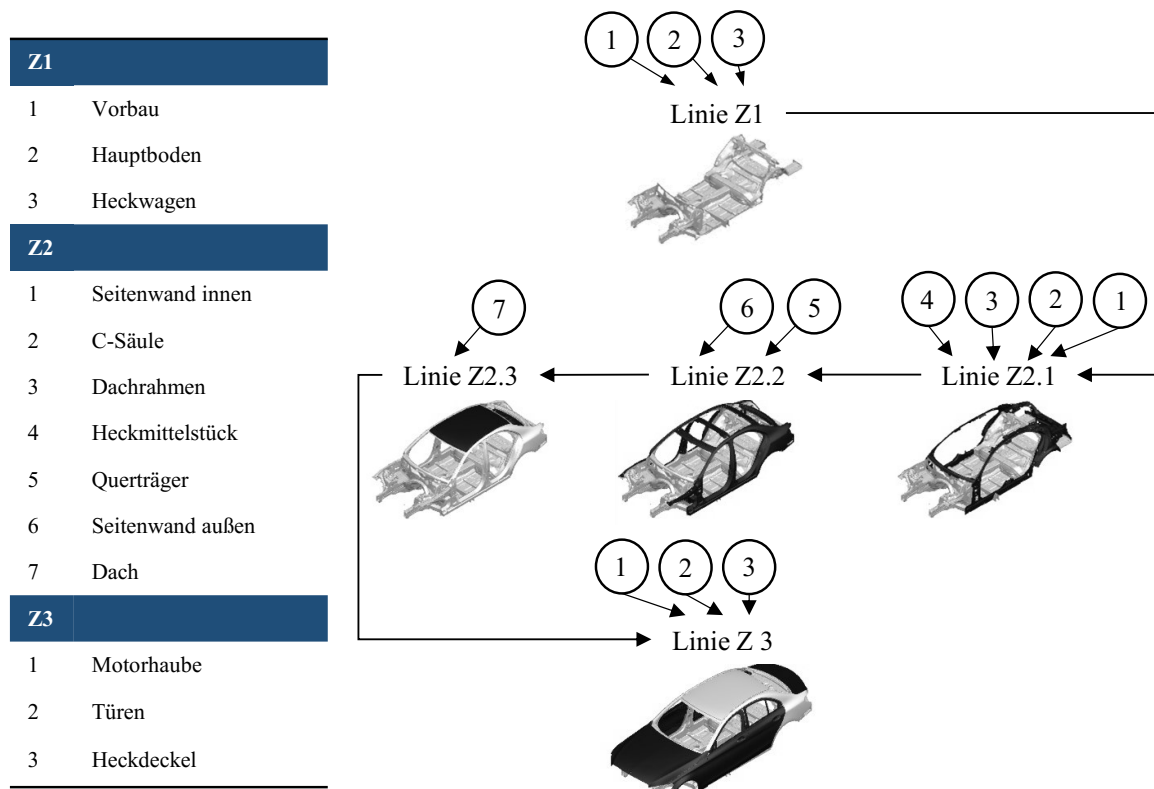


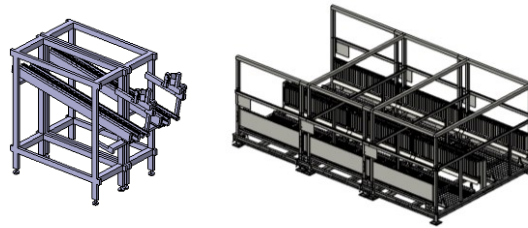
Abbildung 8: Struktur des automobilen Karosserierohbaus⁹

Für diese wissenschaftliche Arbeit soll folgend festgelegt werden, dass sich der Begriff Montagesystem im Kontext des Karosseriebaus immer auf die Strukturebene einer Baugruppe bezieht, vgl. (Grundig 2015, S. 82). Wie zuvor beschrieben, bestehen die einzelnen Stationen aus Ressourcenmodulen, die im Karosserierohbau den folgenden Modulkategorien zugeordnet werden können: Bauteilbereitstellung, Handhabungseinrichtung, Fügeeinrichtung, Spann- und Fixierkonzept (Lambertz 2009, S. 11–19; Walla 2015, S. 87–100). Die einzelnen Modulkategorien werden im Folgenden näher beschrieben:

Bauteilbereitstellung

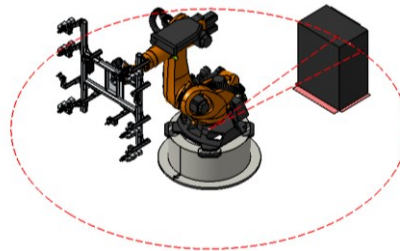
Die Bauteilbereitstellung sorgt für die Bereitstellung der Einzelbauteile und Zusammenbauten an den jeweiligen Stationen. Werden Einzelteile und Zusammenbauten durch die Logistik angeliefert, so werden hierfür verschiedenen Arten von Ladungsträger verwendet. Werden Zusammenbauten aus Vorgängerstationen für die Folgestation bereitgestellt, so finden z.B. einfache Ablagen Verwendung. In der folgenden Abbildung 9 ist links eine Bauteilrutsche zu sehen, in welcher mehrere Bauteile eingelegt werden können. Wie der Name der Bauteilrutsche bereits indiziert, rutschen die Bauteile durch die Neigung nach vorne und können dort durch einen Menschen oder durch einen Roboter entnommen werden. In der Abbildung rechts zu sehen ist ein Sonderladungsträger, der in diesem Fall genutzt wird, um große Karosseriebauteile an einer Station bereitzustellen. Diese Art von Ladungsträger wird im Normalfall in einem Logistikbereich befüllt und mit einem Gabelstapler an die entsprechende Station gefahren.

⁹ Angelehnt an Kiefer 2007, S. 9; VDI Wissensforum et al. 2018, S. 694.

**Abbildung 9: Bauteilbereitstellung¹⁰**

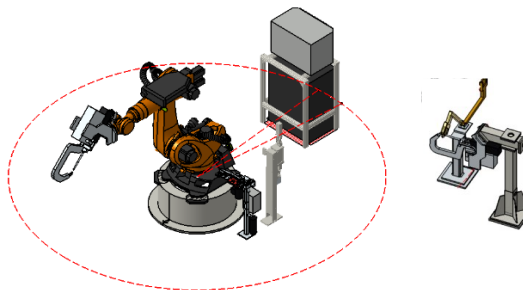
Handhabungseinrichtungen

Handhabungseinrichtungen dienen dem Transport von Einzelbauteilen und Zusammenbauten in und zwischen Stationen. Dabei sind in erster Linie Greifer notwendig, die die Bauteile greifen. Greifer bestehen aus einem Rahmen und einer Anzahl an Spannern, um die z.B. Bauteile zu greifen. Diese Greifer sind im Regelfall an Industrierobotern befestigt, wie Abbildung 10 zeigt. Handhabungsroboter können somit Bauteile an die entsprechende Zielposition manövrieren. Im Hintergrund zu sehen ist die Steuerungseinheit des Roboters.

**Abbildung 10: Handhabungsrobotermodul¹¹**

Fügeeinrichtungen

Fügeeinrichtungen dienen dem Setzen der Fügeelemente, die den einzelnen Fügeschritten zugeordnet sind. Dazu sind in erster Linie Werkzeuge notwendig, die entweder stationär durch eine Halterung in der Anlage platziert oder an einem Roboter montiert sind. Die folgende Abbildung 11 zeigt ein Fügerobotermodul. Die Schweißzange, die an dem Industrieroboter befestigt ist, dient dem Setzen von Punktschweißelementen. Sowohl der Roboter als auch die Schweißzange werden durch die dahinterliegende Steuerungseinheit gesteuert.

**Abbildung 11: Schweißrobotermodul (links); stationäre Schweißzange (rechts)¹²**

¹⁰ Eigene Abbildung

¹¹ Eigene Abbildung

¹² Eigene Abbildung

Spann- und Fixiereinrichtungen

Spann- und Fixiereinrichtungen dienen der Bauteilfixierung während des Fügeprozesses. Dabei kommen im Regelfall sogenannte Vorrichtungen zum Einsatz. Vorrichtungen bestehen aus Tischen, welche mit Spannern und Stiften versehen sind, die der Bauteilfixierung dienen. Abbildung 12 zeigt exemplarisch eine Vorrichtung.

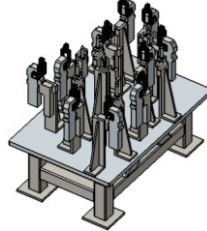


Abbildung 12: Vorrichtung¹³

Montagesysteme im Karosserierohrbau, wie sie soeben beschrieben wurden, werden für 1...n Fahrzeugderivate ausgelegt, die sich in unterschiedliche Varianten aufgliedern können. Aus diesem Grund müssen die Rohbauanlagen eine spezifische Flexibilität aufweisen. (Wemhöner 2005, S. 46) Die benötigte Flexibilität wirkt sich zum einen darin aus, dass das Montagesystem genügend Kapazität für die Montage jeder Variante aufweist und zum anderen eine Zugänglichkeit der Fügeressourcen sichergestellt ist. Zusätzlich müssen die Spann- und Fixiereinrichtungen die unterschiedlichen geometrischen Ausprägungen der verschiedenen Varianten abdecken können. Ein weiterer Aspekt in Bezug auf die Erhöhung der Flexibilitätsbedarfe im automobilen Karosseriebau ist das immer größer werdende Spektrum an eingesetzten Fügeverfahren. Zwar stellt das Widerstandspunktschweißen weiterhin das meistverwendete Fügeverfahren dar, jedoch führen steigende Aktivitäten im intelligenten Leichtbau unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu einem Mix verschiedener Werkstoffe, die gleichermaßen zum Einsatz alternativer Fügetechnologien führen (Henning und Moeller 2011, S. 743–744). Dazu gehören unter anderem: Laserschweißen, Bolzenschweißen, Durchsetzfugen, Stanznieten, Kleben und Falzen. (Walla 2015, S. 37)

2.2 Planungstechnische Einordnung

Der Begriff der Planung steht für die systematische Analyse einer Ausgangssituation und die geistige Vorwegnahme möglicher Handlungsalternativen für die zielgerichtete Bewertung und Auswahl (Boysen 2005, S. 26; Lermen 1992, S. 6; Pfohl, S. 16). Die systematische Analyse der Ausgangssituation entspricht in der Systementwicklung der Analyse des Produktionsgegenstands und der Projektprämissen. Die Vorwegnahme von Handlungsalternativen entspricht einem gestalterischen kreativen und impliziten Vorgang. Damit steht die Qualität des Planungsergebnisses in direktem Zusammenhang mit der intellektuellen Fähigkeit und der Planungsprozessrobustheit. Aus diesem Grund unterliegt die Planung einem großen unternehmerischen Risiko (Boysen 2005, S. 26–27). Dieser Abschnitt dient der Einordnung des Forschungsgegenstands in den planungstechnischen Gesamtkontext.

¹³ Eigene Abbildung

2.2.1 Montagesystemplanung

Die Produktionsplanung ist eine Disziplin, die sich in die langfristige sowie in die mittelfristige und kurzfristige Produktionsplanung unterteilt (Boysen 2005, S. 2). Für die Systemplanung, der langfristigen Produktionsplanung, ist in der Literatur auch die Bezeichnung technische Produktionsplanung gängig (Kiefer 2007, S. 28). Abbildung 13 visualisiert die fünf Phasen des Fabriklebenszyklus in Anlehnung an SCHENK und WIRTH und ordnet die Systemplanung in diesen Fabriklebenszyklus ein (Schenk und Wirth 2004, S. 25). Die letzteren zwei Teildisziplinen werden diesbezüglich der Betriebsphase zugeordnet, finden aber in dieser wissenschaftlichen Arbeit keine weitere Aufmerksamkeit. Der Fabriklebenszyklus wird hier durch einen geschlossenen Kreislauf aus fünf Phasen beschrieben, der mehrfach durchlaufen werden kann. Die Produktionsentwicklung oder Systemplanung einer Fabrik stellt die erste Phase des Fabriklebenszyklus dar. Nach dieser Phase wird das Produktionssystem realisiert und folgend in Betrieb genommen. Die Betriebsphase stellt die zeitlich längste Phase des Fabriklebenszyklus dar, bevor das System abgebaut und bei Weiternutzung der Fabrik ein neues/ adaptiertes Produktionssystem entwickelt wird. (Schenk und Wirth 2004, S. 109; VDI 2011, S. 12)

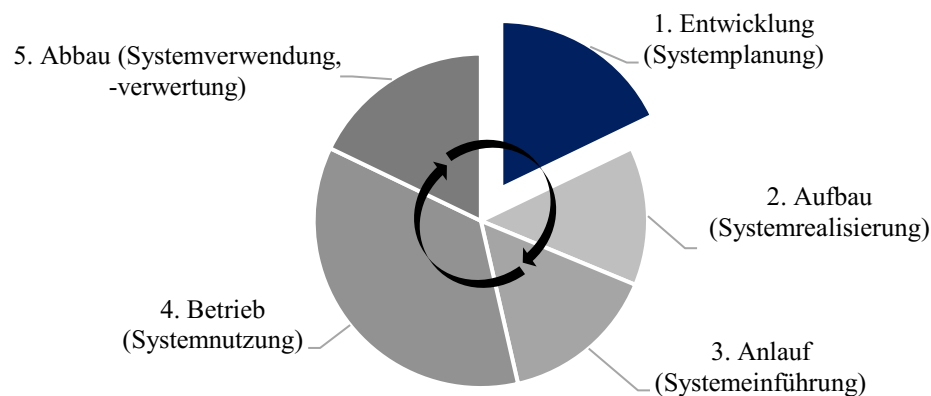


Abbildung 13: Fabriklebenszyklus¹⁴

Ziel der Systemplanung ist die technische, funktionale und wirtschaftliche Entwicklung eines Produktionssystems. Während dieser Phase ist der Planer mit zahlreichen Planungsalternativen konfrontiert. Seine Aufgabe ist es, in einem stark iterativen Prozess die bestmögliche vieler Planungsalternativen zu erarbeiten (Schenk und Wirth 2004, S. 109; Eversheim 2002, S. 17–20). Die Systemplanung umfasst sowohl Fertigungs- als auch Montageplanungsaktivitäten und kann weiter in zwei verschiedene Planungsszenarien unterteilt werden: die Neutypplanung und die Integrationsplanung, siehe Abbildung 14 (VDI 2011, S. 4). Die Neutypplanung, welche hier betrachtet wird, wird in konventionellen Planungsverfahren weiter in einzelne Phasen unterteilt. Die folgende Auswahl an Planungsverfahren nach (Grundig 2015; Bullinger 1986; Thaler 1993; REFA Verband 1990; Eversheim 2002; Milberg et al. 1999; Pawellek 2014; Dangelmaier 2001; Spur et al. 2013; Schmigalla 1995) und deren Analyse ergibt, dass die einzelnen Phasen und Begriffe der Montagesystemplanung in die Phasen Konzeptplanung, Grobplanung und Feinplanung verallgemeinert werden können, wie Abbildung 14 darstellt.

¹⁴ Angelehnt an Schenk und Wirth 2004, S. 109–111.

Für die Strukturierung und zeitliche Abfolge von Montageplanungsprozessen werden in den genannten Standardwerken Phasenmodelle herangezogen, in welchen eine sequenzielle Abfolge einzelner Phasen abgebildet ist. In der industriellen Praxis erfolgt die Planung meist nicht in rein sequenzieller Abfolge, vielmehr entspricht der Planungsprozess einem stark iterativen Prozess (Burr 2008, S. 8; Bracht et al. 2011, S. 27). Diese Iterationen sind insbesondere aufgrund der fortlaufenden Produktanpassungen und sich verändernden Rahmenbedingungen in der Anwendung der beschriebenen Phasenmodelle unumgänglich.

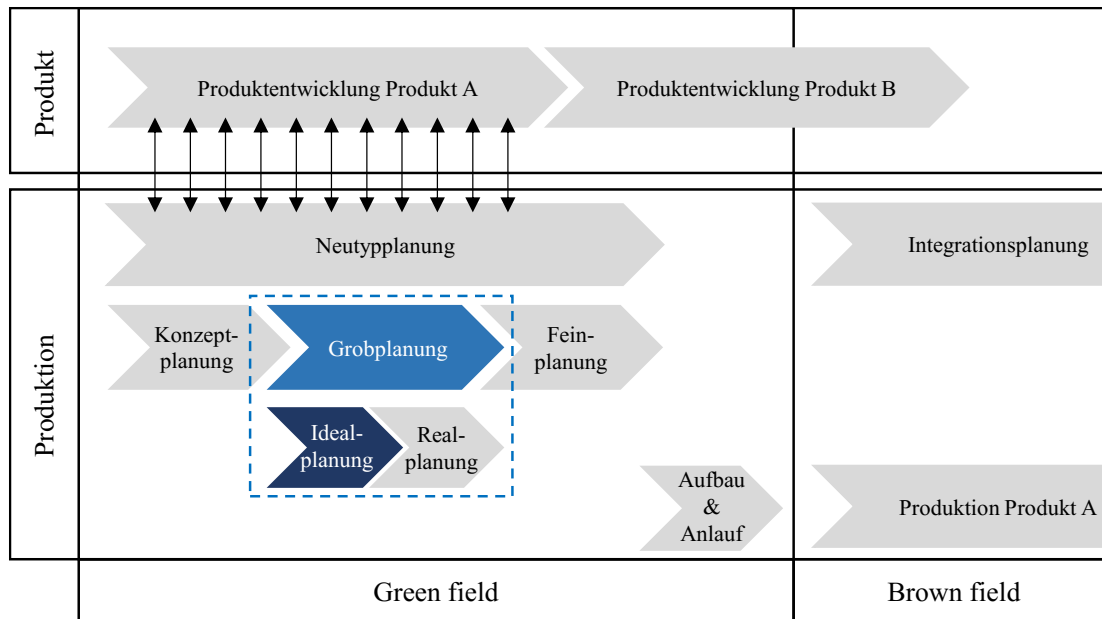


Abbildung 14: Einordnung der Idealplanung in den Planungsprozess¹⁵

Die Konzeptplanung umfasst die Abwägung zwischen verschiedenen Produktionskonzepten hinsichtlich einer Kostenabschätzung und dem Abschätzen des Flächenbedarfs (Eversheim 2002, S. 17–18). Wird die Konzeptplanung in den Produktentstehungsprozess eingeordnet, so startet diese parallel oder leicht versetzt zu der Produktentwicklung. Aus diesem Grund existieren zu diesem Zeitpunkt noch keine detaillierten Produktdaten. So können lediglich die Gesamtzahl an Bauteilen, Fügeverfahren und die Anzahl an Verbindungselementen anhand der Vorgängerfahrzeuge abgeschätzt werden und mit Materialkonzepten zu Anlagenplanungsvarianten führen (Burr 2008, S. 57–82). Die Grobplanung basiert im Gegensatz zur Konzeptplanung auf dem zu diesem Zeitpunkt aktuellen Produktentwicklungsstand. Dem Planer stehen somit neben den Geometriedaten und der Produktstruktur bzw. Fügefolge auch die Art und Anzahl der Verbindungselemente zur Verfügung, die jedoch insbesondere in den frühen Planungsphasen nicht vollständig sind und großen Änderungen unterliegen. Diese Datenbasis befähigt den Planer eine Konzeption der Montageanlage vorzunehmen (Walla 2015, S. 24–30). Die Gestaltung umfasst dabei die Festlegung des Montageprozesses, einer Anlagenstruktur, der Zuweisung von Montagemodulen und einem Groblayout. In der Feinplanung folgt die detaillierte Zellenausplanung, Betriebsmittelkonstruktion, die Offlineprogrammierung und

¹⁵ Angelehnt an Kiefer et al. 2018, S. 803.

schließlich die virtuelle Absicherung. Der Feinplanung folgen dann die Aufbau-, Anlauf- und Betriebsphasen, die jedoch nicht mehr Teil der Systemplanung sind.

2.2.2 *Grobplanung*

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt, wie Abbildung 14 zeigt, im Bereich der Grobplanung. Dabei indizieren bereits die eingeführten Bezeichnungen der Planungsphasen – Konzeptplanung, Grobplanung, Feinplanung – eine Planung vom Groben ins Detail. Die Grobplanung in sich folgt darüber hinaus einem Vorgehen vom Idealen zum Realen (Grundig 2015, S. 80), woraus sich die Idealplanungs- und Realplanungsphase ergibt, vgl. Abbildung 14. Die zwei Phasen differenzieren sich insbesondere durch die Berücksichtigung von Randbedingungen. Während es das Ziel der Idealplanung ist, einen von räumlichen Restriktionen unabhängigen, idealen Planungsentwurf zu erstellen, berücksichtigt die darauffolgende Realplanung alle zu diesem Zeitpunkt existierenden Randbedingungen. Das Ergebnis der Idealplanung dient dessen ungeachtet als wesentliche Grundlage der Realplanung des Montagesystems. Das gesamtgesellschaftliche Ziel der Grobplanung ist es damit, einen optimalen Montagesystementwurf zu erstellen, der auf einem aktuellen Produktdatenstand basiert und alle relevanten realen Randbedingungen berücksichtigt. Reale Randbedingungen umfassen die Projektprämissen, wie z.B. der benötigten Ausbringung, die realen räumlichen Randbedingungen (Hallengeometrien) sowie die produktspezifischen Randbedingungen. Die Grobplanung führt dadurch zu einem deutlich detaillierteren und optimaleren Planungsstand als die Konzeptplanung und stellt eine erste technische und betriebswirtschaftliche sinnvolle Prinzipiellösung dar. In der industriellen Praxis der Automobilindustrie ist es üblich, dass nur die Konzeptplanung und Grobplanung in den eigenen Planungsabteilungen erfolgen und der Prozess somit auch als „Configure to Order“ oder „Engineering to Order“ bezeichnet wird. Die nachkommende Phase der Feinplanung wird dann an Anlagenlieferanten vergeben und durch diese bis zum Start der Produktion verantwortet.

Der nachfolgende Abschnitt stellt die Ziele und Inhalte der Idealplanung dar und zeigt die Einordnung der Problemstellung in die Idealplanung auf. Die detaillierte Vorgehensweise in der Idealplanung im Kontext der Karosserierohbauplanung wird in dem folgenden Abschnitt 2.3 detailliert für die Darlegung des Forschungsgegenstands untersucht.

2.2.3 *Idealplanung und Karosserierohbauplanung*

Nach Boysen beginnt die Planung eines Fließmontagesystems bereits mit der montagegerechten Produktentwicklung (Boysen 2005, S. 23). In der Produktentwicklung wird für jede Produktvariante ein 3D Modell entwickelt, inklusive der entsprechenden Produktstruktur. Knoten einer Produktstruktur stellen Zusammenbauten (ZB) oder Einzelbauteile (ET) dar. Die Produktstruktur und der Inhalt eines ZB werden durch den Produktentwickler festgelegt und orientieren sich an eher funktionalen Aspekten, nicht jedoch an fertigungsspezifischen Aspekten. Dabei sind Produktstrukturen grundsätzlich als Baumstrukturen abbildbar. In Abbildung 15 (a) ist, exemplarisch anhand der inneren Seitenwandstruktur einer Fahrzeugkarosserie, ein ZB aus Produktentwicklersicht dargestellt.

Toleranzeinhaltung sicherzustellen. Alle anderen Fügeelemente, die Ausfügeelemente, sorgen dafür, die benötigte Strukturfestigkeit sicherzustellen.

Die Fügeelemente des zu produzierenden Produkts werden bereits in der Produktentwicklung festgelegt und in dem Konstruktionsmodell vorgesehen. Gängige CAD-Werkzeuge ermöglichen darauf basierend eine automatische Ausleitung wichtiger Fügeelementeigenschaften (Burr 2008, S. 78–81). Neben der Geometrie der Fügeelemente leiten sich die Eigenschaften der Fügeelemente vor allem aus den zu verbindenden Flanschen ab. Die folgende Abbildung 16 (a) und (b) zeigt exemplarisch die Lage von verschiedenen Schweißpunkten entlang eines Längsträgers auf. Dabei sind in Abbildung 16 (b) hellblaue und dunkelblaue Kugeln zu erkennen, die der visuellen Hervorhebung der Schweißpunktpositionen dienen. Hellblaue Punkte sind Dreiblech-Schweißpunkte, während die dunkelblauen Punkte Zweiblech-Schweißpunkte darstellen, wie in dem X-Schnitt in Abbildung 16 (c) zu erkennen ist. Der Schnitt ist durch die zwei in Abbildung 16 (b) hervorgehobenen Punkte gelegt.

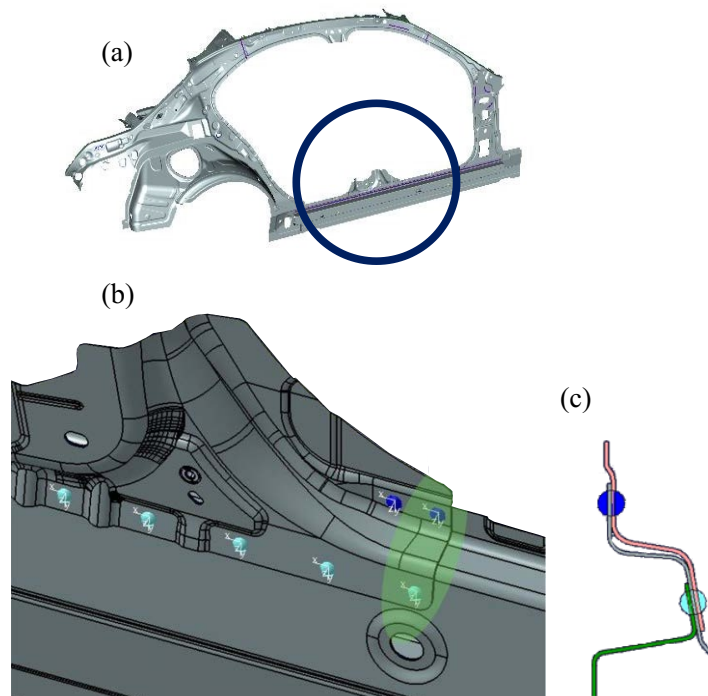


Abbildung 16: (a) Fügeelementposition, (b) Sicht auf Schweißpunkte, (c) Schnitt

Wichtige ausleitbare Eigenschaften eines Fügeelements für die Idealplanung sind: verbindende Bauteile, Materialien der verbindenden Bauteile, Materialstärken der verbindenden Bauteile, etc.

Für die Sicherstellung der Produzierbarkeit einer Fügefolgen muss weitergehend untersucht werden, ob die Fügeelemente für die einzelnen Fügeschritte (bzw. Zusammenbauzuständen) mit herkömmlichen Werkzeugen erreicht werden können. Diese Überprüfung kann entweder manuell durch den Planer erfolgen oder durch Erreichbarkeitssimulationen.¹⁷

¹⁷ Insbesondere durch den Aspekt der Erreichbarkeit von Fügeelementen ist die Anzahl der Bauteile in einem Fügeschritt limitiert. Mit steigender Anzahl der Bauteile in einem Fügeschritt steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauteil die Zugänglichkeit eines Fügeelementes auf Grund der geometrischen Lage verhindert.

In der Idealplanung, auch Konfigurationsplanung genannt (Müller 2018, S. 2), wird basierend auf der Produktanalyse ein Funktionsschema des zu gestaltenden Montagesystems kreiert (Grundig 2015, S. 80). Funktionsschemata bezwecken eine ideale quantitative Gestaltung des Planungsgegenstands, unter Vernachlässigung räumlicher, anordnungsbezogener und flächenbezogener Restriktionen. Dies umfasst die Auswahl der Funktionseinheiten (Betriebsmittel) sowie die funktionsbezogene Beschreibung des Montageprozesses mit dem Ziel die Kosten der Anlage zu minimieren (Grundig 2015, S. 80; Eversheim und Schuh 1999, 11 f.). Die Funktionseinheiten basieren dabei auf der Auswahl und Referenzierung von Montagemodulen einer Betriebsmittelbibliothek und werden häufig in Blocklayouts visualisiert, wodurch grobe Flächenabschätzungen und Vergleiche erfolgen können. Ein qualitatives Prozessschema basiert auf Standardprozesszeiten, die hingegen aus einer Prozessbibliothek entnommen werden. Um das Vorgehen der Idealplanung zu verdeutlichen, soll im Folgenden der Fügeschritt 2 aus Abbildung 15 exemplarisch in ein Anlagenkonzept überführt werden. Die folgende Abbildung 17 zeigt diesbezüglich ein mögliches Anlagenkonzept auf.

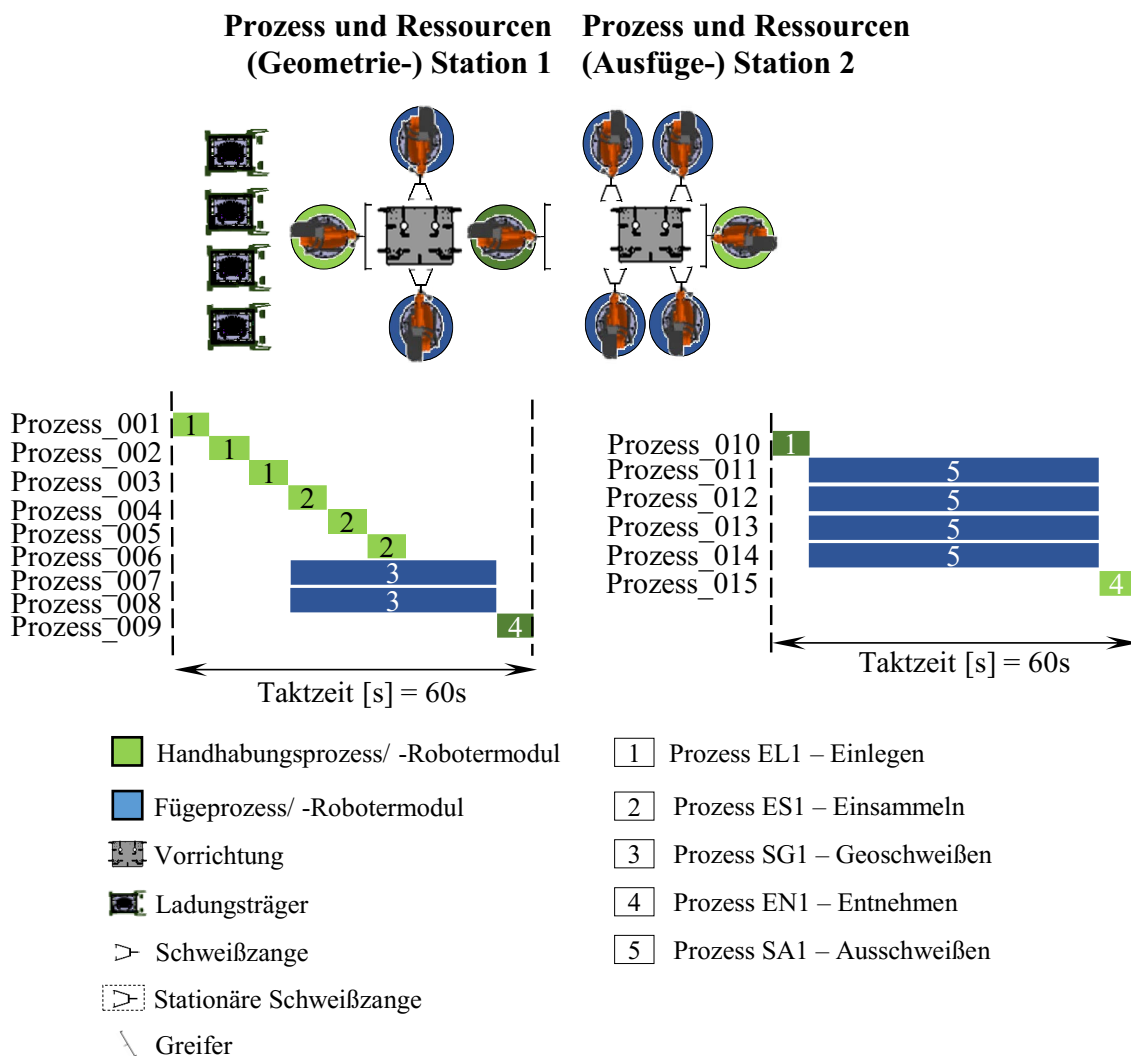


Abbildung 17: Anlagenkonzept im Rahmen der Idealplanung¹⁸

¹⁸ Eigene Abbildung

In der Abbildung werden sowohl die Ressourcen-, als auch der dazugehörigen Prozesse dargestellt. Links zu sehen ist die sogenannte geometriebildende Station (kurz Geometrie- oder Geostation). Die Geostation dient der Abarbeitung von geometriebildenden Fügeelementen, die dem Zusammenbau eine erste Struktur geben. Die Ladungsträger auf der linken Seite stellen die in Fügenschritt zwei neu dazukommenden Bauteile B5 und B6 zur Verfügung (siehe Abbildung 15). Die Prozesse 001 - 003 sorgen dafür, dass der linke Handhabungsroboter die zu fügenden Eingangsteile (vgl. Abbildung 15, B5, B6 und ZB aus Fügenschritt 1) in die Vorrichtung der Geostation einlegt. Durch die Farbgebung der Ressourcen ist ersichtlich, welche Roboter, welche Prozesse ausführt. Folgend sammelt der Roboter bereits die Bauteile für den Folgetakt ein (vgl. Prozesse 004 - 006).

Die blauen Fügeroboter setzen direkt nach dem Einlegevorgang die geometriegebenden Fügeelemente. Wichtig ist dabei, dass diese erst mit dem Prozess beginnen können, sobald alle Bauteile eingelegt sind. Die Anzahl der Roboter ist abhängig von der Anzahl der Fügepunkte. Umso mehr Fügepunkte in dem Fügenschritt verortet sind, umso mehr Roboter werden benötigt. Zuletzt entnimmt der zweite Handhabungsroboter den zusammengehefteten ZB aus der Vorrichtung und legt diesen in die nächste Station, was gleichzeitig dem ersten Prozessschritt der zweiten Station entspricht. Die zweite Station dient dem Setzen der Ausfügepunkte. Durch die höhere Anzahl an Ausschweißpunkten müssen auch entsprechend mehr Fügeroboter vorgesehen werden. Zuletzt entnimmt der letzte Roboter den fertig gefügten ZB aus der Vorrichtung und kann diesen wiederum in die Folgestation gegeben werden. Das gezeigte Anlagenkonzept ist dabei nur eine Möglichkeit die Anlage zu planen. Explizite Vorgehensmodelle für die Planung von Karosseriebauanlagen gibt es nach dem Wissen des Autors in der Literatur nicht. Der Anlagenplaner hat damit, in der Gestaltung der Anlage, viele Freiheitsgrade.

Wie durch Abbildung 17 aufgezeigt wird, betrachtet der Produktionsplaner zunächst einzelne Fügeschritte und entwirft für diese mögliche Anlagenlösungen. Diese Einzellösungen müssen folgend zu einem Gesamtsystem vereint werden, wie Abbildung 18 zeigt. Auf der rechten Seite der Abbildung ist die Lösung des Fügenschritts 2 aus Abbildung 17 zu sehen („Lösung Fügenschritt i“).

Vor dem Fügenschritt *i* können je nach Fügefolgenentwurf mehrere weitere Fügeschritte liegen. Für diese muss der Produktionsplaner gleichermaßen Anlagenlösungen entwerfen, welche in der Abbildung links unter „i-1“ und „i-2“ zu finden sind. Im Rahmen der sogenannten Systembildung müssen diese zu einem Gesamtsystem zusammengeführt werden. Die Systembildung orientiert sich dabei an der Vorgänger-/Nachfolgerrelation der Fügeschritte der Fügefolge und überführt diese auf die Anlagenlösungen. Somit gilt: ist ein Fügenschritt *i-1* Vorgänger eines Fügenschritts *i*. So ist auch die Anlagenlösung des Fügenschritts *i-1* Vorgänger der Anlagenlösung des Fügenschritts *i*. Aus produktionstechnischer Sicht müssen entsprechende Übergangs- und Entkopplungsbereiche zwischen den einzelnen Fügenschrittlösungen vorgesehen werden, wie ebenfalls in Abbildung 18 dargestellt wird.

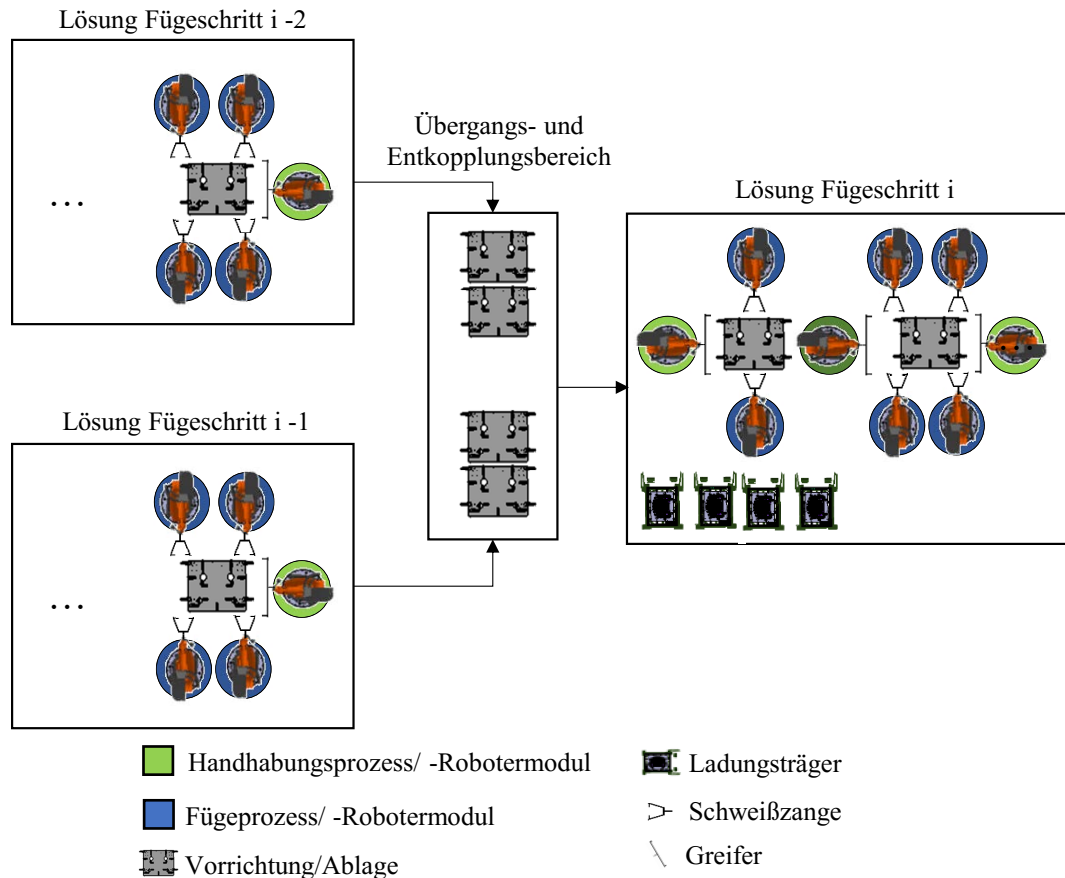


Abbildung 18: Systembildung¹⁹

Die Notwendigkeit solcher Entkopplungsbereiche kann verschiedene Hintergründe haben. Ein elementarer Hintergrund ist die Sicherstellung, dass die Zusammenbauten aus in die Folgestationen transferiert werden können. Zumeist ist es aus Layoutaspekten nicht möglich die Bauteile von mehreren Stationen direkt in Folgestationen zu übergeben, ohne entsprechende Ablagebereiche vorzusehen. Dabei können z.B. Ablagen zum Einsatz kommen, wie in der Abbildung zu sehen ist. Nach Fertigstellung eines Zusammenbaus kann dieser in eine Ablage gelegt werden und die Folgestation entnimmt diesen wiederum aus der Ablage. Die Ablagen dienen gleichzeitig auch der zeitlichen Entkopplung. Denn es kann nicht immer sichergestellt werden, dass die Stationsprozesse enden, sobald die Folgestation auf die Bauteile angewiesen ist. Die Ablagen dienen somit auch als Puffer mit einer Kapazität für ein Bauteil.

Das Erreichen der optimalen Montagesystemgestaltung stellt für Montageplaner eine große Herausforderung dar, unter anderem da der Lösungsraum mit steigender Größe des Planungsgegenstands exponentiell ansteigen kann²⁰ (Hagemann und Stark 2020, S. 509–511). Somit bestehen existierende Verfahren darin, in der Idealplanung mehrere Systemlösungen zu entwerfen und diese zu vergleichen. Durch die begrenzte Anzahl an Produktinformationen müssen Produktionsplaner zusätzlich meist mit sogenannten Vorhalten planen, die es

¹⁹ Eigene Abbildung

²⁰ In (Hagemann und Stark 2020) wird aufgezeigt, dass der Lösungsraum für die Produktionsplanung innerhalb eines Anlagenbereichs, in Abhängigkeit der Eingangsvariablen und -größen, exponentiell ansteigen kann. Der exponentielle Komplexitätsanstieg kann je nach Wahl des Entkopplungs- und Pufferkonzepts begrenzt werden. Der Anstieg des Lösungsraums zu den Eingangsgrößen ist somit exponentiell begrenzt.

ermöglichen, zu einem späteren Zeitpunkt weitere Varianten bzw. Nachfolgeprodukte in die Anlage zu integrieren.

Basierend auf der Beschreibung der Idealplanung kann festgehalten werden, dass die hier behandelte Problemstellung aus planungstechnischer Sicht eindeutig der Idealplanung zuzuordnen ist. Abbildung 14 visualisiert und verstärkt diese abschließende Einordnung in den planungstechnischen Gesamtkontext durch die logische Aufteilung der Neutypplanung in die Grobplanung mit den Teilphasen Idealplanung und Realplanung.

2.3 Die Digitale Fabrik und das PPR-Modell

Die Digitale Fabrik wird in der VDI 4499 als der

„Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen, [...] die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.“ (VDI 2008, S. 3)

bezeichnet. Durch die Digitale Fabrik wird eine Effizienzsteigerung durch die Parallelisierung von Produktentwicklung und Produktionsplanung sowie der vollumfänglichen Digitalisierung von Prozessen ermöglicht. Die digitale Produktentwicklung hat eine lange Tradition und ist schon heute in Unternehmen etabliert. Ein integriertes Datenmanagement legt diesbezüglich die Grundlage (VDI 2008, S. 4). Der Betrachtungsrahmen der Digitalen Fabrik liegt auf der Produktionsplanung und all ihren Phasen, insbesondere mit dem Ziel der Effizienzsteigerung der Produktionsentwicklung (VDI 2008, S. 4). Einen großen Anteil an der Effizienzsteigerung schaffen Methoden und Modelle, die in informationstechnische Werkzeuge integriert sind. Die informationstechnische oder auch rechnerunterstützte Planung können dem Begriff der Computerintegrierten Produktion (CIM) zugeordnet werden. CIM ist die informationstechnische Integration aller Entwicklungs-, Planungs- und Produktionsprozesse in übergreifenden Applikationen (Jonas 2000, S. 27). CIM umfasst einzelne Disziplinen wie das CAD (Computer Aided Design), CAP (Computer Aided Planning), CAM (Computer Aided Manufacturing) sowie auch das EDM (Engineering Data Management) (Kiefer 2007, S. 29; Spur et al. 2013, S. 465). Der Einsatz von CAD und CAP Systemen ermöglicht eine integrative Planung im PPR (Produkt, Prozess und Ressource) Informationsmodell und bildet somit den Grundstein für die Datendurchgängigkeit zwischen der Produktentwicklung über die Produktionsplanung bis hin zur operativen Produktion. In der industriellen Praxis, insbesondere in den frühen Planungsphasen, wird zwar die digitale durchgängige Planung angestrebt und durch informationstechnische Systeme unterstützt, jedoch stellt insbesondere die Planung nach dem PPR (Produkt, Prozess, Ressource) Modell Unternehmen vor große Herausforderungen (Hagemann et al. 2019, S. 163–164). Die folgende Abbildung 19 stellt das PPR Modell in der Theorie (links) dar sowie den industriellen Umsetzungsstand des PPR-Modells (rechts). Innerhalb des linken Dreiecks, das das PPR Modell darstellt, werden die in der Theorie für die Karosserierohbauplanung vorgesehenen und in Kapitel 2 eingeführten Informationsmodelle dargestellt.

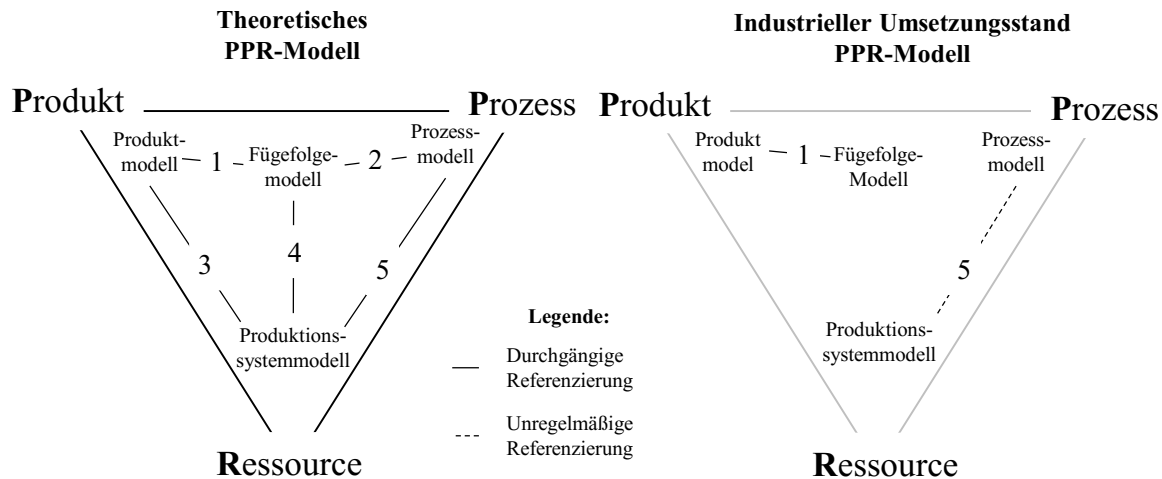


Abbildung 19: PPR Informationsmodell in der Idealplanung²¹

Das Produktmodell, welches in Abschnitt 2.2.3 in Abbildung 15 eingeführt wurde, beschreibt das Produkt als Struktur mit zusätzlichen grafischen Repräsentationen. Das Fügefolgemodell, welches ebenfalls in Abbildung 15 eingeführt wurde, unterteilt die einzelnen Zusammenbau-stufen der Produktstruktur in einzelne Fügeschritte. Die Verknüpfung zwischen einzelnen Zu-sammenbauten des Produktmodells zu den einzelnen Fügeschritten ist in der Abbildung durch die Zahl 1 gekennzeichnet. Das Prozessmodell wurde in Abbildung 17 beschrieben und be-schreibt die einzelnen durch Ressourcen ausführbaren Prozessschritte. Jeder Fügeschritt wird durch mehrere Prozessschritte durchgeführt, die entsprechende Referenzierung zwischen den einzelnen Modellinstanzen ist in der Abbildung unter Ziffer 2 zu finden. Das Produktionssys-temmodell wurde ebenfalls in Abbildung 17 beschrieben. Das Produktionssystemmodell, auch Ressourcenmodell genannt, beschreibt die für das Produktionssystem verplanten Be-triebsmittel inkl. deren Zusammenhänge. Das Produktionssystemmodell muss folgend auf das Produktmodell (Ziffer 3), die Fügefolge (Ziffer 4) und das Prozessmodell (Ziffer 5) referen-ziert werden. Die Referenz 3 zum Produktmodell beschreibt, welche Ressourcen welche Pro-duktelemente bearbeiten. Referenz 4 beschreibt hingegen welche Ressourcen welche Füge-schritte bearbeiten und Referenz 5 beschreibt welche Prozesse durch welche Ressourcen aus-geführt werden. In der Praxis müssen nicht alle Verknüpfungen vollständig vorliegen. Denn das Prozessmodell stellt diesbezüglich eine zentrale Rolle dar, indem es das Ressourcenmo-dell mit dem Produktmodell verknüpft. Dadurch sind auch implizit alle notwendigen Verknüpfungen zwischen dem Produkt und der Ressource bekannt.

Auf der rechten Seite wird gleichermaßen der aktuelle Stand der Industrie in den frühen Pla-nungsphasen aufgezeigt. Die Abbildung macht diesbezüglich ersichtlich, dass zwar digitale Produkt-, Fügefolge-, Produktionssystem- und Prozessmodelle existieren, diese aber aufgrund von fehlenden modellübergreifenden Instanzreferenzen zu Brüchen in der Datendurchgängig-keit führen. Insbesondere die fehlende Verknüpfung zwischen der Fügefolge und den einzel-nen Prozessschritten (Ziffer 2) bzw. der nicht durchgängigen Verknüpfung von Ressourcen

²¹ Hagemann et al. 2019.

zu Prozessen (Ziffer 5) stellen einen großen Bruch in der Beschreibung von Produktionssystemen dar.

Die informationstechnischen Werkzeuge der Digitalen Fabrik haben auch zu einer Standardisierung in der Produktionsentwicklung geführt und damit zu weiteren Effizienzsteigerungen. Ein prominentes Beispiel der Standardisierung sind templatebasierte Ansätze. Standardmodule können in der Idealplanung z.B. die Zusammenstellung eines Robotermoduls bedeuten (Ressource & Prozess) bis hin zu ganzen Anlagentemplates, auf deren Basis neue Anlagen geplant werden (Kiefer 2007, S. 35). Doch auch eine prozessuale Standardisierung der Planungsprozesse hat die Abläufe beschleunigt, Fehler vermieden und zu einer regelbasierten und rechnerunterstützten Kommunikation zwischen den verschiedenen Planungsdisziplinen bis hin zur Produktentwicklung geführt.

2.4 Darlegung des Forschungsgegenstands

Die produktions- (Abschnitt 2.1.1) und planungstechnische Einordnung (Abschnitt 2.1.2) des Forschungsgegenstands legen die Grundlage für die in diesem Abschnitt vorliegende detaillierte Analyse und Darlegung des Forschungsgegenstands. Diesbezüglich werden zunächst eindeutige Grenzen des Betrachtungsraums festgelegt, darauffolgend die Gesamtproblemstellung analysiert, in Teilproblemstellungen untergliedert und der Forschungsgegenstand dargelegt. Der detaillierten Analyse und Charakterisierung der Teilprobleme können zusätzlich Anforderungen an eine Problemlösung entnommen werden, die in dem letzten Abschnitt aufgezeigt werden.

2.4.1 Abgrenzung und Strukturierung des Forschungsgegenstands

Im Bereich des automobilen Karosserierohbaus bedarf es anhand der produktspezifischen, produktionstechnischen und planungstechnischen Diversität einer Eingrenzung des Betrachtungsraums. Genau diese drei Diversitätsarten werden herangezogen, um die Abgrenzung des Forschungsgegenstands in diesem Abschnitt zu bilden.

Aus der *Produktperspektive* wird der Betrachtungsraum zunächst dadurch gebildet, dass alle im Automobilbau gängigen Kraftfahrzeug-Karosseriebauweisen abgedeckt werden müssen. Diese umfassen selbsttragende Strukturen, Rahmenstrukturen und auch strukturelle Mischbauweisen (Birkert et al. 2013, S. 9–15; Haken 2015, S. 127). Abweichende Produkte werden in der in dieser Arbeit entwickelten Methode nicht zwangsweise vollumfänglich abgedeckt. Der Zuständigkeitsbereich des Karosserierohbaus umfasst das Fügen von Strukturteilen, meist Blechteilen aus dem Presswerk. Fügeprozesse der Endmontage sind nicht Teil des Forschungsgegenstands. Innerhalb des Karosserierohbaus werden jedoch alle gängigen Materialien und Materialkombinationen sowie die Fügeverfahren berücksichtigt. Dazu gehört das Löten, das Kleben, das Schweißen, das Umformen und das An- bzw. Einpressen. (DIN 8580-0, S. 11)

Aus der *Planungsperspektive* wird der Forschungsgegenstand eindeutig der Idealplanungsphase zugeordnet. Diese umfasst das Erstellen einer Ressourcenstruktur und eines Produktionsprozesses. Das automatisierte Positionieren der Betriebsmittel der Montageanlage

innerhalb der Produktionshalle, als Teil der Realplanung, wird somit nicht berücksichtigt.²² Abweichende Phasen, wie zum Beispiel die Feinplanung einer Anlage, liegen nicht im Betrachtungsraum dieser Arbeit. Der Forschungsgegenstand fokussiert sich im Bereich der Produktionsplanung auf Greenfield-Szenarien.²³ Des Weiteren bezieht sich die Planung in dieser wissenschaftlichen Arbeit auf die sogenannte Mechanikplanung.²⁴

Aus der *produktionstechnischen Perspektive*, dazu gehören der Produktionsprozess- als auch die Produktionsressourcen, kann zunächst festgehalten werden, dass sich diese Forschungsarbeit auf hochautomatisierte Fließmontagesysteme fokussiert, wie sie heute insbesondere im Rohbau der Automobilindustrie vorzufinden sind. Diese sind verkettet, getaktet und folgen einem vorgegebenen Produktionsprozess.²⁵ Wie der Begriff Fließmontagesysteme bereits impliziert, werden nicht nur rein sequenzielle Fließbänder berücksichtigt, sondern insbesondere auch Systeme abweichender Strukturen.

Unter diesen gegebenen Randbedingungen wird der Forschungsgegenstand folgend in drei Teilproblemstellungen unterteilt. Die Teilprobleme wurden in Kapitel 2.2.3 im Rahmen der Idealplanung eingeführt und werden in den folgenden Abschnitten 2.4.2 - 2.4.5 detailliert hinsichtlich der algorithmischen Lösbarkeit untersucht und charakterisiert. Die Unterteilung folgt dabei auf Basis elementar differenzierbarer Problemcharakteristiken, Qualitätsanforderungen sowie der logischen Abfolge im Produktionsplanungsprozesses.

- Teilproblem 1: Produkt- und Fügefolgeanalyse
- Teilproblem 2: Stations- und Prozessgestaltung
- Teilproblem 3: Systembildung

2.4.2 Teilproblemstellung I: Algorithmische Produkt- und Fügefolgeanalyse

In Abbildung 15 (b) (siehe Seite - 18 -) wurde die Fügefolgestruktur eingeführt. Die Produkt- und Fügefolgeanalyse befasst sich mit der umfangreichen Analyse dieser gegebenen produktspezifischen Daten, auf der die Produktionsplanung basiert. Dazu gehört die Fügefolgestruktur, inklusive der zugeordneten Fügeelemente und deren Beschreibung. Aufgrund der vorhandenen Produktdiversität müssen dabei mehrere Varianten analysiert werden und die einzelnen Fügeschritte miteinander verglichen werden. Aufgabe der algorithmischen Produkt-

²² Das Stellen des Layouts wird in der Produktionsplanung als ein Folgeprozess der Idealplanung betrachtet und erfordert die Betrachtung weiterer Einflussfaktoren (Grundig 2015, S. 80; Müller 2018, S. 2). Zu Beginn der Produktionsplanung unterliegen Produktdaten und Planungsprämissen noch großen Änderungen. Für konzeptionelle Untersuchungen wird in Planungsmethoden aus diesem Grund zunächst auf die Erstellung eines Mengengerüsts und eines Produktionsprozesses verwiesen (Grundig 2015, S. 80; Dangelmaier 2001, S. 330). Für weiterführende Untersuchungen wird darauf basierend ein Groblayout gestellt. Die Automatisierung des Groblayouts kann unabhängig von dem hier vorliegenden Forschungsgegenstand betrachtet werden, wie z.B. in (Ripon et al. 2013; Merker 1998).

²³ Die Integration neuer Produkte in Bestandsanlagen wird somit nicht betrachtet.

²⁴ Die Elektro- und Steuerungstechnikplanung liegen nicht im Betrachtungsraum. Ebenso werden Teilbereiche der Karosserie-Produktionsplanung, die sich mit der Qualitätssicherung oder der Oberflächenplanung befassen, nicht berücksichtigt.

²⁵ Entkoppelte und wandlungsfähige Produktionskonzepte werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Auch manuelle Montagefließbänder sind nicht Teil des Forschungsgegenstands, wie sie zum Beispiel in der automobilen Endmontage aufzufinden sind.

und Fügefolgeanalyse ist es, für jeden Fügeschritt die benötigten Fähigkeiten und Kapazitäten einer Anlage zu berechnen, sodass folgend der Ressourcen- und Prozessbedarf abgeleitet werden kann.

Diese Teilproblemstellung erfordert bei Durchführung eines Produktionsplaners ein sehr analytisches Vorgehen und ist gleichzeitig sehr repetitiv. Der Produktionsplaner kann bei der Analyse den Schritten einer eindeutigen Vorgangsbeschreibung folgen. Bei fehlerfreier Datenanalyse durch die Produktionsplanung sind alle Analyseergebnisse eindeutig festgelegt und das Vorgehen somit determiniert. Dennoch sind heutige manuelle Planungsverfahren aufgrund der Produktkomplexität sehr fehleranfällig. Für das algorithmische Lösen des Problems ist, zumindest für die Initialanalyse, rein explizites Wissen notwendig und das Lösungsvorgehen somit gut formalisierbar. Die genannten Eigenschaften, wie das determinierte Planungsverfahren, dem notwendigen expliziten Wissen und der guten Formalisierbarkeit sind im Folgenden noch einmal aufgelistet. Aus diesen Eigenschaften kann eine Abschätzung über die Komplexität der Teilproblemstellung I abgeleitet werden. Da der Produktionsplaner das Problem durch das Befolgen einer eindeutigen Vorgangsbeschreibung lösen kann und dabei vor allem auf explizites Wissen zurückgreift, kann das menschlich Vorgehen durch einen Algorithmus nachgebildet werden. Die algorithmische Problemlösungskomplexität wird somit als gering eingestuft.

Die Produkt- und Fügefolgeanalyse kann autark von dem Vorgang der Gestaltung, bzw. Konfiguration des Montagesystems durchgeführt werden. Unter anderem aus diesem Grund wird diese in der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit als eine getrennte Teilproblemstellung definiert. Als ein weiterer Grund sind die folgenden stark abweichenden Charakteristiken der Teilproblemstellung I zu den Teilproblemstellungen II und III zu nennen wie die folgende Auflistung zeigt. In den folgenden Abschnitten ist eine Auflistung für die Problemstellung II und III zu finden.

Charakteristiken der Teilproblemstellung I

- Planungsvorgehen: deterministisch, determiniert
 - Notwendiges Wissen: explizites Wissen
 - Formalisierbarkeit: ja
 - Komplexität der algorithmischen Problemstellung: gering
-

2.4.3 Teilproblemstellung II: Algorithmische Stations- und Prozessgestaltung

Die Stations- und Prozessgestaltung basiert auf den Ergebnissen, also den benötigten Montagekapazitäten für die Montage des Produkts, der Produkt- und Fügefolgeanalyse. Für jeden analysierten Fügeschritt muss dabei ein abgetakteter Montageprozess gestaltet werden und die dazugehörigen Betriebsmittel ausgewählt werden. Der Vorgang wurde in Abschnitt 2.2.3 anhand von Abbildung 17 (siehe Seite - 20 -) eingeführt. Die ausgewählten Betriebsmittel müssen in diesem Rahmen Stationen zugeordnet werden, sodass diese in ihrer Gesamtheit, bei gegebener Taktzeit, die geforderte Kapazität aufweisen. Die Kapazität eines Betriebsmittels steht in direktem Zusammenhang mit dem für das Betriebsmittel gestalteten Prozess und der gegebenen Taktzeit. Die Stations- und Prozessgestaltung stellt den Teil der Problemstellung dar, den der Produktionsplaner unter Anwendung von Intuition, Kreativität und Heuristiken

löst: dem impliziten Planungswissen. Dabei kann dieses Teilproblem als ein diskretes Optimierungsproblem verstanden werden, das einem großen Lösungsraum aus allen Gestaltungsalternativen unterliegt. Fokus der Problemstellung II ist es, Stationen oder Stationsverbünde für einzelne Fügeschritte unter gegebenen Prämissen algorithmisch so zu gestalten, dass die daraus folgenden Kosten möglichst gering sind, bzw. die Effizienz maximiert. Produktionsplaner haben die Fähigkeit, die Problemstellung trotz der hohen Anzahl an Alternativen so zu lösen, dass die erarbeiteten Lösungen nahe am Optimum liegen.²⁶ Das menschliche Vorgehen entspricht aber beim Planen einer Anlage keinem optimalen und determinierten Verfahren. Vielmehr nutzt der Planer unbewusst Heuristiken oder Approximationen. Prominente Montageplanungsverfahren bieten zwar allgemeingültige Vorgehensmodelle für die Planung von Montagesystemen wie in Abschnitt 2.2 vorgestellt, eine Verfahrensanweisung für das Lösen der Teilproblemstellung II existiert in der Literatur allerdings nicht.²⁷

Die Stations- und Prozessgestaltung unterscheidet sich aufgrund der hohen Komplexität und dem sehr kreativen und intuitiven Problemlösungsvorgehen stark von der vorherigen Problemstellung. Um der Komplexität dieses Problems gerecht zu werden, wird es in dieser wissenschaftlichen Arbeit unabhängig von Problemstellung III betrachtet, welches ebenfalls die Gestaltung des Produktionssystems umfasst, jedoch nicht auf Stations- und Betriebsmittel-ebene, sondern auf der Ebene des Montagesystems. Auch für diese zweite Problemstellung stellt die folgende Auflistung die maßgeblichen Charakteristiken zusammen.

Charakterisierung der Teilproblemstellung II:

- Planungsvorgehen: nicht determiniert, nicht deterministisch, nicht optimal
 - Notwendiges Wissen: explizites, implizites und prozedurales Wissen
 - Formalisierbarkeit: nur teilweise formalisierbar
 - Komplexität der algorithmischen Problemstellung: hoch
-

2.4.4 Teilproblemstellung III: Algorithmische Systembildung

Ziel der Systembildung ist es, aus den Ergebnissen der Teilproblemstellung II, also den Stationen oder Stationsverbünden, ein Gesamtsystem zu bilden. Die Systembildung wurde in Kapitel 2.2.3 mit Hilfe von Abbildung 18 (siehe Seite - 22 -) eingeführt. Die Stations- und Prozessgestaltung befasst sich jeweils mit der Konzipierung von Teillösungen für einzelne Fügeschritte, nicht mit ganzen Montagesystemen. Die einzelnen Teillösungen müssen im Rahmen der Systembildung einander überführt werden. An den Punkten, an denen einzelne Teilstrukturen ineinander übergehen, müssen diesbezüglich entsprechende Ressourcen und Prozesse geplant werden, die das Einsammeln der fertigen ZB aus vorherigen Anlagenzweigen ermöglichen sowie die zeitliche Harmonisierung der eingehenden Takte gewährleisten. Die gestalterische Komplexität der Teilproblemstellung III ist nicht mit Teilproblemstellung II

²⁶ Dennoch zeigen bestehende algorithmische Ansätze, die die Automatisierung von Planungsvorgängen betrachten, dass die Effizienz der manuell geplanten Anlagen um mehr als 15% übertroffen werden konnten (Michalos et al. 2015, S. 86; Michels et al. 2018, S. 331)

²⁷ Wird im folgenden Kapitel 5 „Stand der Wissenschaft und Technik“ ausführlich dargelegt.

vergleichbar. Für eine detaillierte Ausplanung der Übergänge und notwendigen Entkopplungen sind insbesondere Simulationsergebnisse notwendig, die jedoch erst nach Erstellung eines ersten Konzepts erlangt werden können. Der Planer folgt hierbei für ein erstes Konzept einem sehr standardisierten und determiniertem Vorgehen, wodurch auch die algorithmische Komplexität als niedriger eingestuft wird, wie die Stationsgestaltung. Durch das standardisierte Vorgehen der Planer kann auch von einer guten Formalisierung in Form eines Algorithmus ausgegangen werden. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass die Teilproblemstellung III unabhängig von der Gestaltung der Teillösung vorgenommen werden kann. Wie auch für die vorherigen Problemstellungen werden die Charakteristiken dieser Problemstellung im Folgenden zusammengefasst.

Charakterisierung Teilproblemstellung III

- Vorgehen des Produktionsplaners: determiniert, zumeist deterministisch, vollständig
- Notwendiges Wissen: explizites und prozedurales Wissen
- Formalisierbarkeit: ja
- Komplexität der algorithmischen Problemstellung: mittel

2.4.5 Anforderungen an die algorithmische Konzipierung von Montagesystemen

In diesem Kapitel wurde der Forschungsgegenstand präzisiert und in den produktionstechnischen und planungstechnischen Kontext eingeordnet. Insbesondere die Bedarfe angrenzender Bereiche der Produktionsplanung führen zu zahlreichen Anforderungen an ein algorithmisches Planungsverfahren, die in diesem letzten Abschnitt abgeleitet und formuliert werden. Zu den angrenzenden Bereichen zählen die vorgelagerte Produktentwicklung mit produktgetriebenen Anforderungen (B) sowie die nachgelagerten Bereiche der Idealplanung mit planungs- und produktionstechnischen Anforderungen (A). Des Weiteren werden informationstechnische Anforderungen (C) formuliert, die oft in direkten Zusammenhang zu Anforderungen der Einheiten (A) und (B) stehen. Die Anforderungen werden folglich diesen drei Kategorien (A), (B) und (C) zugeordnet.

A. Produktions- und planungstechnische Anforderungen:

Diese Kategorie umfasst Anforderungen, die dem produktions- und planungstechnischen Kontext abgeleitet wurden, welcher in Abschnitt 2.1 und 2.2 dargelegt wurde. Anforderung A.1 fordert, dass die algorithmische Konzipierung von Montagesystemen in den heutigen Planungsprozess integrierbar ist. Nur dann können eine Effizienzsteigerung und eine Entlastung des Planers sichergestellt werden. Diesbezüglich muss die Methode gegebene Eingangsgrößen verarbeiten können (vgl. Anforderungen B1 und B2) und Ergebnisse generieren, die den Ansprüchen der Folgeprozesse entspricht.

Anforderung A.1: Die algorithmische Konzipierung von Montagesystemen muss in den Planungsprozess des Karosseriebaus integrierbar sein und zu einer Effizienzsteigerung sowie zu einer Komplexitätsreduktion führen.

Anforderung A.2 beschreibt die notwendigen Funktionen für die algorithmische Konzipierung. Der Planungsalgorithmus muss fähig sein, automatisiert eine Montagesystemstruktur zu generieren. Zu der Montagestruktur gehören benötigte Hierarchieebenen: Anlage, Station und Montagemodul wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben. Dabei ist es wichtig, dass nicht nur linienförmige Montagesysteme berücksichtigt werden können, sondern auch im Karosserierohrbau übliche Baumstrukturen, wie bereits durch Abbildung 5 (siehe Seite - 10 -) eingeführt. Der Montageprozess muss auf jeden dieser Hierarchieebenen beschrieben sein. Gleichzeitig müssen Ressourcen-, Produkt- und Prozessmodelle zu jedem Zeitpunkt nach dem PPR-Informationsmodell (Produkt-, Prozess- und Ressourcenmodell) zueinander referenziert sein. Der Algorithmus muss die Planung von primären und sekundären Montageprozessen ermöglichen. Für primäre Montageprozesse bedeutet das insbesondere die umfassende Gestaltung von Fügeprozessen unter Berücksichtigung aller gängigen punkt- und linienförmigen Fügeverfahren sowie dem Fügen in Vorrichtungen und stationären Zangen (vgl. Abbildung 11). Im Montagesystem müssen diesbezüglich Geometriestationen und Ausfügestationen geplant werden. Für sekundäre Prozesse müssen hingegen das Einsammeln von Einzelteilen aus Ladungsträgern, das Beladen der Stationen und auch das Entladen bzw. Weitergeben des Montagegegenstands geplant werden.

Anforderung A.2: Automatische Erstellung eines technisch sinnvollen Fließmontagesystems, eines Montageprozesses und die Zuordnung der dafür benötigten Montageressourcen unter Berücksichtigung gegebener Eingangsparameter.

Anforderung A.3 beschreibt die Anforderung an die Ergebnisgüte. Die Ergebnisse müssen nahe dem monetären Optimum liegen unter der Berücksichtigung der zu dieser Phase vorliegenden meist noch rudimentären Eingangsgrößen und des Granularitätsgrades der Idealplanung. Das monetäre Optimum definiert sich durch die kostengünstigste Anlagenkonfiguration für das jeweilige Anlagenszenario. Damit wird mit der algorithmischen Konzipierung das Ziel verfolgt, die kostengünstigste Anlagenkonfiguration zu finden. Des Weiteren sollte der Automatismus von determiniertem Charakter sein und damit reproduzierbare und vergleichbare Ergebnisse liefern. Die Vergleichbarkeit ist insbesondere wichtig aufgrund des sehr dynamischen Umfelds in der Idealplanungsphase. Ändern sich Produktdaten oder Projektprämissen, können durch die algorithmische Konzipierung die Auswirkungen auf das Produktionssystem objektiv und unumgänglich aufgezeigt werden.

Anforderung A.3: Die Ergebnisse müssen nahe dem monetären Optimum liegen und einen determinierten Charakter aufweisen, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicher zu stellen.

B. Produktgetriebene Anforderungen:

Das Produktmodell stellt die Haupteingangsgröße der Montageplanung dar. Aus diesem Grund ist es von hoher Wichtigkeit, eindeutige Anforderungen an das Planungsverfahren hinsichtlich der Analyse und Interpretation des Produkts zu formulieren. Anforderung B.1 fordert, dass alle gängigen Kraftfahrzeug-Karosseriebauweisen durch den Automatismus

bearbeitet werden können, dazu gehören selbsttragende Strukturen, Rahmenstrukturen und auch strukturelle Mischbauweisen. (Birkert et al. 2013, S. 8–16) Diese Karosseriebauweisen haben sich in der Automobilindustrie etabliert und werden durch die Produktentwicklung insbesondere aus strukturellen Aspekten festgelegt. Selbsttragende Strukturen zeichnen sich dadurch aus, dass die hergestellten Blechteile durch ihre Form und Anordnung zueinander so miteinander verbunden werden, dass eine (sich selbsttragende) Struktur entsteht. Dazu gehören sowohl Struktur-, als auch Außenhautteile. (Birkert et al. 2013, S. 13–15) Rahmenstrukturen basieren hingegen auf zumeist profilförmigen Bauteilen, die zunächst zu einer tragenden Struktur verbunden (dem sogenannten Rahmen) und dann mit Beplankungsteilen ergänzt werden. Im Gegensatz zu der selbsttragenden Struktur findet bei der Rahmenstruktur also eine Trennung zwischen strukturellen und Beplankungsteilen statt. Wobei die Beplankungsteile keinen nennenswerten Strukturbeitrag leisten und aus ästhetischen Gründen hinzugefügt werden. (Birkert et al. 2013, S. 10–12)

In Bezug auf die gewählte Karosseriebauweise gilt es auch die dafür angewandten Materialien und Fügeelemente und -verfahren zu beschreiben. Grundsätzlich kommen im Karosseriebau in erster Linie Metalle, Kunststoffe und Gummiwerkstoffe zum Einsatz (Mekonnen Asmare Fentahun und Mahmut Ahsen Savaş 2018, S. 43). Historisch begründet spielen bis heute Stahlwerkstoffe eine dominante Rolle im automobilen Karosseriebau. Die Auswahl und der Mix unterschiedlicher Materialien führt dabei auch zu der Notwendigkeit unterschiedliche Fügeverfahren einzusetzen. In der Vergangenheit wurden diese Stahlwerkstoffe mit dem Fügeverfahren Punktschweißen verbunden. Dieses Fügeverfahren stellt weiterhin die kostengünstigste Art dar Karosseriebauteile miteinander zu verbinden. Weitere Fügeverfahren werden genau dann verwendet, wenn andere Materialien oder sogar der Mix verschiedener Materialien Anwendung finden. Laut BORNSCHLEGL gehören zu den heute angewendeten Verfahren im Karosseriebau das Punktschweißen, Bolzenschweißen, Laserschweißen, MIG/MAG-Schweißen, Vollstanznieten, Kleben, Halbhohnnieten, Schraubverbindungen und Laserlöten (BORNSCHLEGL 2016, S. 80).

Anforderung B.1: Die Methode muss alle gängigen Kraftfahrzeug-Karosseriebauweisen berücksichtigen und alle in diesem Umfeld verwendeten Materialien und Fügeverfahren.

In gleicher Weise müssen alle Teile dieser Karosserien durch die Methode verarbeitet werden können wie in Anforderung B.2 gefordert. Zu den unterschiedlichen Bereichen gehören die in diesem Abschnitt eingeführten produktseitigen Baugruppen. Diesbezüglich müssen auch unterschiedliche Arten von Verbindungselementen, unterschiedliche Materialien und Materialzusammensetzungen abgedeckt werden. Zusätzlich sind innerhalb der Baugruppen unterschiedliche Strukturen vorzufinden, das algorithmische Planungsverfahren muss also auch in dieser Hinsicht die notwendige Flexibilität aufweisen.

Anforderung B.2: Die Methode muss einem generischen Ansatz folgen und alle gängigen Baugruppen eines Karosserierohbaus gleichermaßen abdecken. Diesbezüglich gilt es verschiedene Materialien, Verbindungsformen und verschiedene Produktstrukturen zu berücksichtigen.

C. Informationstechnische Anforderungen:

Die letzte Anforderungskategorie umfasst Anforderungen aus dem Bereich der Informationstechnik. Diese beziehen sich auf die Algorithmik, die Architektur und die Integrierbarkeit des Verfahrens bzw. die eines Softwaresystems in bestehende industrielle IT-Systemlandschaften.

Anforderung C.1 betrifft die Berechnungszeit des Verfahrens. Der Automatismus soll in „angemessener Zeit“ auf einem handelsüblichen Rechner²⁸ Ergebnisse generieren können. Denn die Idealplanung ist eine sehr dynamische Phase, die von regelmäßigen Änderungen an Produktdaten und Projektprämissen geprägt ist, auf die schnell reagiert werden muss. Die Berechnungszeit darf diesbezüglich nicht die abendliche/ nächtliche Arbeitsunterbrechung überschreiten. Diesbezüglich werden nach § 5 (1) ArbZG für die maximale Berechnungszeit 11 h festgelegt (Arbeitszeitgesetz (ArbZG) 2014, S. 20).

Anforderung C.1: Die Berechnung muss für industrielle Anwendungsfälle des automobilen Karosserierohbaus in einer für den Planungsprozess angemessenen Zeit möglich sein.

Anforderung C.2 wurde den Anforderungen A.1-A.3 abgeleitet. Für die Einhaltung dieser Anforderungen müssen auch die eingesetzten informationstechnischen Verfahren und Algorithmen die durch die Anforderung festgehaltenen Eigenschaften aufweisen.

Anforderung C.2: Der Berechnungsalgorithmus muss optimal, vollständig, determiniert und die Ergebnisse nachvollziehbar sein.

Die letzte Anforderung C.3 fordert eine Integrierbarkeit in bestehende Systemlandschaften. Für die Integration ist eine Flexibilität notwendig, die eine Modularität der zu entwickelnden Systemarchitektur erfordert. Die Anwendung standardisierter und offener Datenformate sowie flexibler Schnittstellen zur Übertragung der Planungsergebnisse in die existierenden industriellen Planungssysteme ist ebenso notwendig. Zusätzlich gilt es, bereits existierende Teillösungen aus industriellen Anwendungen zu nutzen, um eine Duplikation von Funktionen und Informationen sowie Dateninkonsistenzen zu vermeiden.

Anforderung C.3 Die Lösung muss in bestehende Software-Systemlandschaften integrierbar sein.

²⁸ Die Berechnungszeit bei einer gegebenen Optimierungsaufgabe hängt hauptsächlich von drei Kriterien ab: (i) der Prozessor(en)geschwindigkeit, (ii) der max. möglichen Threads, (iii) der Effizienz des (parallellaufenden) Programms. In dieser Arbeit wird zu Validierungszwecken die folgende Hardware eingesetzt: Core i5; 2,60 GHz; 8GB RAM. Durch den Einsatz eines leistungsstärkeren Computers wie z.B. Core i7; 4,10 GHz; 16GB RAM könnte die Berechnungszeit dementsprechend verkürzt werden. Um diesbezüglich eine Abschätzung der Zeitverkürzung treffen zu können, müssen wiederum die drei genannten Aspekte betrachtet werden. Zu (i): die Frequenz ist bei beiden Prozessoren vergleichbar. Zu (ii): durch den Einsatz eines i7 Prozessors erhöht sich die Anzahl möglicher Threads von $N_5 = 12$ (i5) auf $N_7 = 16$ (i7). Zu (iii): Unter dem Einsatz eines i5 wird eine Effizienz E_N von $E_{12}=0,8$ angenommen und unter Anwendung eines i7 Prozessor eine Effizienz $E_{16}=0,68$ (Koch et al. 2012, S. 81–82). Die Berechnungsgeschwindigkeit eines parallellaufenden Programms kann somit *schätzungsweise* um den Faktor $X \approx (E_{16} - E_{12}) * \frac{N_7}{N_5} \approx 1,08$ erhöht werden.

3 STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK

In diesem Kapitel wird in Bezug auf den dargelegten Forschungsgegenstand der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik aufgezeigt. Ziel dieses Kapitels ist es, den Stand der Technik gegen die im vorherigen Kapitel definierten Anforderungen abzugleichen und anhand der gewonnenen Erkenntnisse die Forschungslücke abzuleiten. Zunächst wird ein Überblick über die Potentiale der algorithmischen Planung gegeben sowie folgend ein Einblick in die grundlegenden Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik. Darauf aufbauend werden bestehende Automatisierungsansätze vorgestellt, diese in den Forschungskontext eingeordnet, den Anforderungen dieser Forschungsarbeit gegenübergestellt und die Forschungslücke abgeleitet.

3.1 Defizite und Potentiale der algorithmischen Planung

Die industrielle, computergestützte Produktionsentwicklung ist ein Forschungsfeld, welches in den letzten Jahrzehnten nur unzureichend von Forschung und Industrie betrachtet wurde. Durch die defizitäre Erforschung der Potentiale und Verfahren ist Ende des 21. Jahrhunderts zunächst eine große Kluft zwischen den einzelnen Phasen des Produktentstehungsprozesses entstanden (Klauke 2002, S. 34). Durch umfangreiche Forschungsaktivitäten im Themenfeld der Digitalen Fabrik konnte diese Kluft kompensiert werden. Dennoch liegt die informationstechnische Unterstützung in der Produktionsplanung noch immer hinter der Produktentwicklung und Produktionssteuerung. In Abbildung 20 ist dieses Defizit visualisiert, in dem auf der horizontalen Achse die Phasen des Produktentstehungsprozesses über die Zeit aufgetragen sind und auf der vertikalen Achse der Grad der informationstechnischen Unterstützung der Ingenieure. Durch den unteren Graphen, in dem auch die Errungenschaften der Digitalen Fabrik ergänzt wurden, wird das Defizit der informationstechnischen Unterstützung der Produktionssystemplanung²⁹ im Vergleich zu den benachbarten Disziplinen ersichtlich. Gleichzeitig zeigt der zweite, obere Graph die mittelfristige Vision einer höheren informationstechnischen Unterstützung auf, dabei wird die Unterstützung der Produktionsplanung nach KLAUKE stärker ansteigen als in den benachbarten Disziplinen. Trotz der hohen Komplexität und der Implizität des Produktionsentwicklungsprozesses wird in einer großen Anzahl von Veröffentlichungen das Potenzial durch die informationstechnische Unterstützung aufgezeigt (Hagemann und Stark 2018, S. 192–193). Zahlreiche Quellen beschreiben diese unter dem Begriff der computergestützten Produktionsentwicklung oder -Planung (CAPP, engl.: Computer Aided Production Planning). So beschreiben BRACHT ET AL. das große Potential durch die Automatisierung nichtkreativer Routineaufgaben wie der Auswahl von Betriebsmitteln oder Kollisions- und Zugänglichkeitsbetrachtungen durch Simulationen (Bracht et al. 2011, S. 64).

²⁹ Mit den Disziplinen des Computer-aided Production Planning (CAPP) und Computer-aided Facility Planning (CAFP)

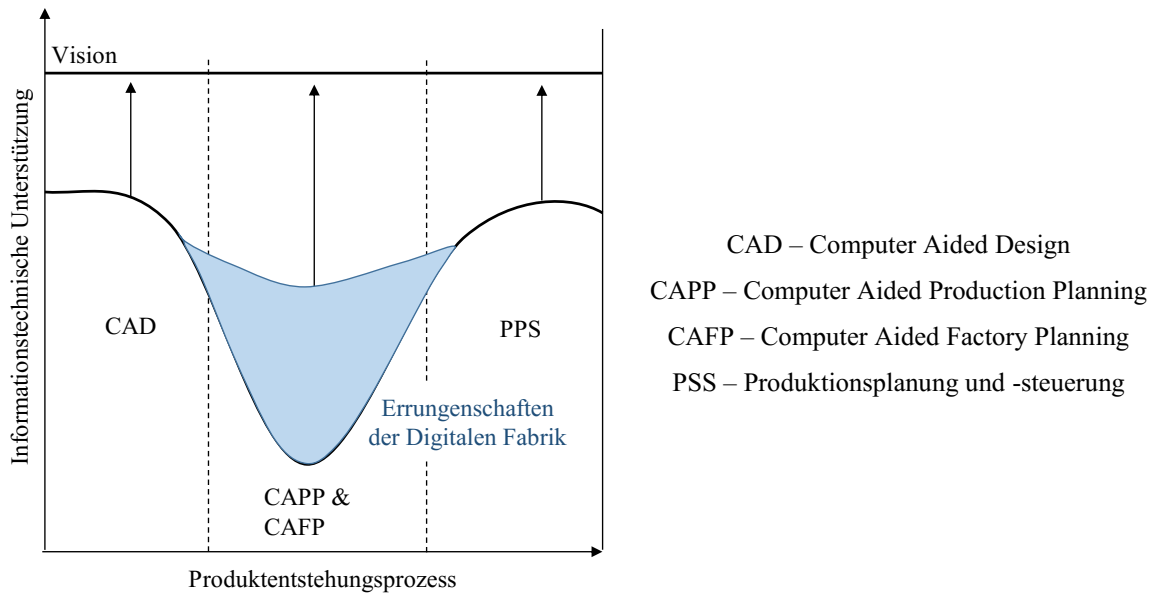


Abbildung 20: Informationstechnische Unterstützung über den PEP³⁰

JASPERNEITE & NIGGEMANN sehen ein hohes Potential durch intelligente und selbstlernende Assistenzsysteme für die Diagnose, die Optimierung und die Konfiguration von Produktionssystemen. Diesbezüglich sieht er sogar eine ernstzunehmende Notwendigkeit für die Planungsautomatisierung aufgrund der steigenden und durch den Menschen allmählich nicht mehr beherrschbaren Komplexität. Er sieht aktuelle, überwiegend manuelle Vorgehensmodelle genau dann scheitern, wenn die Systemkomplexität durch exponentiell ansteigende Abhängigkeiten (z.B. durch eine steigende Variantenanzahl) innerhalb der Anlagen durch den Planungsingenieur nicht mehr zu beherrschen sind. Die Rolle des Ingenieurs wird sich seiner Meinung folgend vom Eigner prozeduralem Planungswissens hin zum deklarativen Entscheidungsträger entwickeln (Jasperneite und Niggemann 2012, 36 ff.; Bauernhansl et al. 2014, S. 173). MICHALOS ET AL. beschreiben die steigende Komplexität heutiger Anlagen im automobilen Karosseriebau und fordern Methoden, die den Planer im Konzeptionsprozessen unterstützen, in welchen Stationen sequenziell angeordnet werden müssen (Michalos et al. 2015, S. 1). Die Autoren sehen den primären Vorteil neuartiger algorithmischer Planungsmethoden nicht etwa in der Reduzierung des Arbeitsaufwandes, sondern im Erreichen optimierter Systemkonfigurationen, welche Ingenieure möglicherweise nicht berücksichtigt hätten. BOYSEN ET AL. betonen die hohen Investitionskosten für das Planen und Bauen industrieller Montagesysteme. Folglich ist eine optimale Systemkonfiguration unumgänglich und von höchster Priorität für die Wirtschaftlichkeit produzierender Unternehmen. Um optimale Anlagenkonfigurationen zu generieren, besteht der dringende Bedarf an geeigneten und für industrielle Anforderungen maßgeschneiderten Optimierungsmodellen (Boysen et al. 2007). MENGES sieht demgegenüber schon ein Aufwandreduzierungspotenzial von bis zu 40 % im Bereich der Produktionsentwicklung durch die allumfassende Umsetzung des Konzepts der Digitalen Fabrik (Raimund Menges 2005, S. 15). JÄGER kritisiert, dass die Automatisierung in der Produktionsentwicklung heute lediglich in der Absicherung durch die

³⁰ angelehnt an Klauke 2002, S. 34.

Simulation erstellter Planungslösungen genutzt wird. Die Schwachstelle der computergestützten Produktionsentwicklung sieht er in der Beschaffung, Aufbereitung und der Verdichtung der planungsrelevanten Daten. Erst darauffolgend sieht er ein großes Potential für eine elementare Effizienzsteigerung durch die Automatisierung in der Produktionsentwicklung. (Andreas Jäger 1990, 1-4, 56-59)

Mit all den soeben aufgezeigten Defiziten und Potentialen beschäftigt sich die Disziplin der rechnergestützten Produktionsentwicklung, als Teil der Digitalen Fabrik, welche bereits in Abschnitt 2.3 eingeführt wurde. Konkrete Lösungsansätze hinsichtlich der Automatisierung der Produktionsentwicklung werden hingegen in Abschnitt 3.3 weitergehend untersucht.

3.2 Rechnergestützte Produktionsentwicklung

Die rechnergestützte Produktionsentwicklung ist eine Teildisziplin der digitalen Fabrik und beschäftigt sich zum einen mit der digitalen Planung, zum anderen mit der assistierten Planung von Produktionssystemen.

BRACHT, KÜHN, WESTKÄMPER und DANGELMAIER haben Standardwerke verfasst, die die Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik ausführlich beschreiben. Auf eine Replikation der bewährten Inhalte wird im Folgenden verzichtet, vielmehr wird im Folgenden auf neue, innovative Forschungsansätze der Digitalen Fabrik eingegangen (Bracht et al. 2011; Kühn 2006; Westkämper et al. 2013; Dangelmaier 2003). Tabelle 1 zeigt ausgewählte, analysierte und kategorisierte Ansätze auf, die eine konkrete methodische und rechnergestützte Unterstützung der Planung fokussieren. Diese Ansätze werden, zusammen mit weiteren Ansätzen, in Abbildung 22 in den Kontext des hier behandelten Forschungsgegenstands eingeordnet. Auf einzelne ausgewählte Publikationen wird im Folgenden detailliert eingegangen.

Tabelle 1: Ansätze der rechnergestützten Produktionsplanung

Quelle	ID	Unterstützungsbasis
(Ralf Cuiper 2000)	1	Durchgängige rechnergestützte Planung
(Jonas 2000)	2	Durchgängige rechnergestützte Planung
(Kiefer 2007)	3	Digitale funktionale und integrierte Planung
(Loferer 2002)	4	Durchgängige rechnergestützte Planung
(Matt 2008)	5	Templatelogik
(Nielsen 2003)	6	Digitale funktionale und integrierte Planung
(Roubanov 2016)	7	Digitale funktionale und integrierte Planung
(Henning 2006)	8	Templatelogik
(Stark et al. 2017)	9	Digitale funktionale und integrierte Planung
(Walla 2015)	10	Templatelogik

Die betrachteten Publikationen können drei Kategorien zugeordnet werden. Der durchgängigen und rechnergestützten Planung, der digitalen funktionalen und integrierten Planung sowie der Templatelogik.

JONAS stellt zunächst eine Analyse konventioneller und rechnergestützter Montageplanungsmodelle vor und wurde in Tabelle 1 der durchgängigen rechnergestützten Planung zugeordnet. Konventionelle Modelle kritisiert er hinsichtlich ihrer defizitären Parallelisierung der Produkt- und Montageplanung und damit dem ungenutzten Potential zur Effizienzsteigerung. Des Weiteren zeigt er auf, dass ein sequenzieller Ablauf die informationstechnische Durchgängigkeit erschwert. Bestehende rechnergestützte Ansätze zeigen zum Teil eine Parallelisierung der Vorgänge auf; einen ganzheitlichen Ansatz verfolgt aber keines der untersuchten Planungsmodelle. Auf dieser Basis stellt er eine allumfassende Methode für die rechnergestützte Montageplanung vor, welche den Faktor „Mensch“ besonders in den Vordergrund stellt. Ein Hauptaspekt der Methode ist somit das Modul Änderungsmanagement, das dem Anwender eine einfache und vor allem konsistente Möglichkeit bietet, Änderungen während des Planungsvorgangs durchzuführen. Um die allumfassende Rechnerunterstützung durch die Integration in bestehende Systemwelten zu ermöglichen, hat JONAS ein unabhängiges und neuartiges Datenmodell geschaffen. Um der Forderung der durchgängigen Planung gerecht zu werden, hat er neben dem Datenmodell auch graphische Oberflächen geschaffen, in welchen dem Anwender nur eine durchgängige Planung ermöglicht wird. (Jonas 2000) CUIPER, welcher auch der durchgängigen rechnergestützten Planung zugewiesen wurde, kritisiert in ähnlicher Weise die getrennte Betrachtung von Produkt, Montagevorgang (Prozess) und Montageanlage (Ressource). Seine Methodik ermöglicht eine durchgängige rechnergestützte Planung von Montagevorgängen bei bestehender Anlage und bestehendem Produkt unter realen industriellen Anforderungen. Das im Rahmen der Arbeit vorgestellte prototypische System CosMonAut unterstützt die Planung des Montagevorgangs von der Reihenfolgestruktur über die Ablauf- und Arbeitsgangfolgeplanung bis zum Steuerungsprogramm. Das vierstufige Planungsmodell kann je nach Szenario produkt- oder anlagengetrieben erfolgen und deckt den kompletten Montageplanungsablauf ab. (Ralf Cuiper 2000)

Die Publikationen der funktionalen und integrierten Planung beschäftigen sich neben der durchgängigen und rechnergestützten Planung mit der Integration neuer funktionaler Aspekte, wie dem funktionalen Zusammenwirken der verschiedenen Disziplinen der Anlagenplanung³¹. STARK ET AL. beschreiben in ihrer Veröffentlichung den starken Wandel der Produktionssysteme hin zu integrierten, kommunizierenden und autonomen Cyber-physischen Systemen. Jedoch kritisieren die Autoren diesbezüglich, dass sich die Produktionsentwicklungsprozesse noch auf herkömmliche Verfahren basieren. Sie fordern neue Entwicklungs- und Architekturprinzipien sowie die Möglichkeit mechatronische Systemmodelle zu validieren und zu verifizieren. Folgend zeigen sie ein Vorgehen auf, welches die funktionale Integration, also das Zusammenwirken mechatronischer Elemente eines Cyber-physical Systems schon während der Anlagenplanung ermöglicht. Auch die Publikation von KIEFER kann der

³¹ Zu den Disziplinen der Anlagenplanung gehören der Maschinenbau, die Elektrotechnik und die Informationstechnik (Kiefer 2007). Aus diesem Grund wird neben dem Begriff der funktionalen Planung auch der Begriff der mechatronischen Planung verwendet.

funktionalen und integrierten Planung zugeordnet werden. Seine Arbeit fokussiert sich auf den automobilen Karosseriebau und beschreibt ein Planungsvorgehen, mit welchem sowohl die Produktionsplanung als auch der Produktionsanlauf deutliche Verbesserungspotentiale erschließen können. Die Basis seines Planungsvorgehens basiert auf dem PPR-Modell, welches als interdisziplinäres Kommunikationsmodell agiert. Auf diesem Weg zeigt er auf, wie basierend auf dem Modell automatisiert SPS-Programme generiert werden und das Gesamtsystem in einer 3D-Plattform validiert werden kann.

Die Publikation von RUDOLF wird der Templatelogik zugeordnet. RUDOLF geht von einer in der Zukunft auf Lösungskonfiguratoren und Standardbibliotheken beruhenden Planung aus. Diese Bibliotheken bestehen nicht wie heute zumeist in der Industrie genutzten rein ressourcengetriebenen Bibliotheken, sondern aus Standardkomponenten, die sowohl eine Ressourcen- als auch Prozesskomponente beinhalten. In seiner Arbeit fokussiert sich RUDOLF aus diesem Grund genau auf die genannte Prozesskomponente. Neben der objektorientierten Wissensrepräsentation, die bereits in kommerziellen Planungssystemen unterstützt wird, basiert das Konzept von Rudolf darauf, in ein bestehendes kommerzielles Planungssystem ein Wissensselement zu integrieren, um den Planer in zahlreichen manuellen sowie repetitiven Tätigkeiten zu entlasten. Ein offenes Forschungsfeld sieht er insbesondere in der allumfassenden produkt-, prozess- und ressourcenbezogenen Produktionsplanung. (Henning 2006)

Der Abschnitt 2.3 wie auch dieser Abschnitt 3.2 hat einen Einblick in den umfassenden Themenkomplex der Digitalen Fabrik und der rechnergestützten Produktionsplanung gegeben und gezeigt, dass die Methoden, Werkzeuge und das Datenmanagement ein hohes Potenzial für die Effizienzsteigerung im Produktionsentwicklungsprozess aufzeigen. Des Weiteren wurde aufgezeigt, dass die Digitale Fabrik durch ihre Planungsmodelle eine informationstechnische Grundlage für die Automatisierung der Produktionsentwicklung aufzeigt, jedoch eine Automatisierung insbesondere kreativer Planungsvorgänge nicht vorsieht. Genau diese wird im folgenden Abschnitt 3.3 näher untersucht.

3.3 Ansätze der automatisierten Planung

Die in dieser Forschungsarbeit definierte und behandelte Problemstellung ist dem Forschungsfeld des „Production System Design“ (PSD) (auf Deutsch: Entwurf von Produktionssystemen) zugeordnet. Auf Grund der Vielzahl an Teildisziplinen des PSD wurde das in Abbildung 21 ersichtliche Modell im Rahmen dieser Arbeit erstellt. Abbildung 21 zeigt in der äußeren Schale das PSD und ordnet weitere Disziplinen des PSD zueinander zu. Das PSD stellt dabei die umfassendste Disziplin dar, welche sich mit der automatisierten oder algorithmischen Planung von Produktionssystemen befasst. Die Disziplin des PSD inklusive aller darunterliegenden Disziplinen ist ein sehr breites Forschungsgebiet. In diesem Abschnitt 3.3 werden die einzelnen Teildisziplinen des PSD eingeführt und einzelne ausgewählte Veröffentlichungen dieser Disziplinen näher vorgestellt. Darüber hinaus werden weitere Quellen in Form von Tabellen der einzelnen Disziplinen kategorisiert, um diese in Abschnitt 3.4 in den Gesamtkontext einzuordnen sowie daraus folgend die Forschungslücke abzuleiten. Das Assembly System Design (ASD) (auf Deutsch: Entwurf von Montagesystemen) ist die erste Teildisziplin des PSD, die in diesem Kapitel eingeführt werden soll. Das ASD fokussiert sich auf den automatisierten Entwurf von Montagesystemen und ist dem PSD untergeordnet, siehe Abbildung 21.

Abweichende Produktionssysteme, die durch das PSD betrachtet werden, aber nicht der Montage zugeordnet sind, sind somit nicht im Betrachtungsraum des ASD. Dazu gehört zum Beispiel die Fertigung von Einzelbauteilen. Unterhalb des ASD können fünf weitere Teildisziplinen identifiziert werden. Als erstes soll auf Assembly Line Design (ALD) (auf Deutsch: Entwurf von Montagelinien) eingegangen werden. Diese Disziplin hat einen weiter eingegrenzten Betrachtungsrahmen, denn sie fokussiert sich auf die Gestaltung von Montagelinien, also Montagesystemen, in denen die Stationen rein sequenziell aufeinander folgen. Unter die Disziplin ALD fällt dann wiederum die Kategorie ALB (vgl. Abbildung 21) die Disziplin des Assembly Line Balancing (ALB) (auf Deutsch: Abstimmung von Montagelinien). Diese befasst sich, wie der Name bereits andeutet, auch mit linienförmigen Montagesystemen, jedoch geht es hierbei in erster Linie um die Abstimmung von Montagelinien, nicht um deren Gestaltung.

Die Unterscheidung zwischen der Gestaltung von Montagelinien und der Abstimmung von Montagelinien wird in der Wissenschaft intensiv diskutiert. So schreibt BOYSEN, dass die Gestaltung von Montagesystemen eine Teildisziplin der Abstimmung von Montagesystemen (ALB) darstellt (Boysen et al. 2007, S. 677–681). MICHELS hingegen grenzt die Gestaltung von Montagesystemen (ALD) eindeutig von der Abstimmung von Montagesystemen ab (MICHELS ET AL. 2018, S. 322). Die folgenden Aspekte sollen aufzeigen, warum aus Sicht des Autors dieser wissenschaftlichen Arbeit eine Trennung zwischen der Abstimmung von Montagesystemen und der Gestaltung von Montagesystemen erforderlich ist.

- Das ALB ist eine sehr akademische Betrachtung der Montagesystemplanung. Dabei werden als Input theoretische Vorranggraphen betrachtet. Auf dieser Basis werden Montagelinien geplant. Das ALD hingegen orientiert sich an industriellen Rahmenbedingungen und umfasst die vollumfängliche Gestaltung von Montagesystemen, inklusive der Produktanalyse, der Prozessgestaltung, der Ressourcenauswahl und -Zuordnung.
- Das ALB fokussiert sich auf die Zuordnung von Fügeaufgaben zu Montagesystemen. Die Bildung eines dezidierten Prozesses innerhalb von einzelnen Montagestationen wird dabei nicht betrachtet. Auch die umfängliche Betrachtung von Handhabungsprozessen wird zumeist nicht im Detail betrachtet, stellt aber wiederum einen elementaren Teil des ALD dar. Gleichmaßen ist die dezidierte Auswahl von Ressourcen eine grundlegende Aufgabe des ALD, aber nicht Teil des ALB.
- Das ALB befasst sich mit der Bildung einzelner Linienabschnitte. Die Zusammenführung dieser Abschnitte zu einem Gesamtsystem wird hierbei nicht betrachtet und einen elementaren Teil der Gestaltung von Montagesystemen (ASD) dar.
- Das ALB betrachtet hauptsächlich manuelle Montagelinien. Die Zuordnung der einzelnen Prozesse ist dabei unabhängig von der Fähigkeit der einzelnen Ressourcen (Mensch oder Maschine). Die gezielte Auswahl von Ressourcen aus Ressourcenbibliotheken ist im Gegensatz ein elementarer Teil des ALD.

Äquivalent zu den Disziplinen ASD, ALD, ALB, die zumeist manuelle Montagevorgänge betrachten, gibt es für hochautomatisierte Montagesysteme, in denen Arbeitsvorgänge ausschließlich durch Roboter getätigt werden, die folgenden Disziplinen: (i) Robotic Assembly System Design (auf Deutsch: Entwurf hochautomatisierter Montagesysteme); (ii) Robotic

Assembly Line Design (RALD) (auf Deutsch: Entwurf roboterbasierter Montagelinien) und zuletzt das (iii) Robotic Assembly Line Balancing (RALB) (auf Deutsch: Abstimmung hoch-automatisierter Montagesysteme).

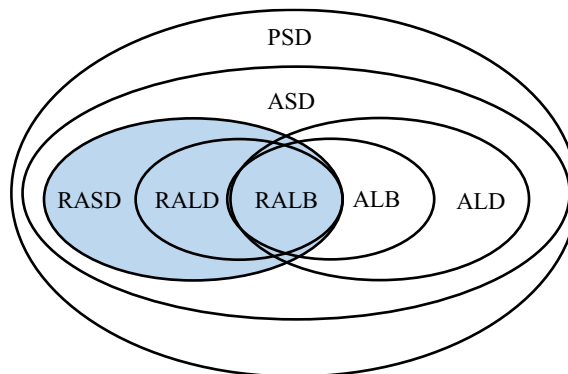


Abbildung 21: Disziplinen der automatisierten Produktionsentwicklung³²

Das in dieser wissenschaftlichen Arbeit betrachtete Forschungsproblem ist eindeutig dem RASD zuzuordnen und wurde im Vorfeld zu dieser wissenschaftlichen Arbeit von HAGEMANN & STARK eingeführt und analysiert (Hagemann und Stark 2020, S. 1). Die folgenden Abschnitte vertiefen die Themenkomplexe, die mit dem RASD Problem in Verbindung stehen. Zunächst werden die Disziplinen zur Montagelinienabstimmung analysiert, also dem ALB und dem RALB. Darauf folgend werden die gestaltenden Disziplinen zunächst für rein sequenzielle Montagelinien (ALD und RALD) untersucht und zuletzt die gestaltenden Disziplinen für Montagesysteme (ASD und RASD).

3.3.1 Ansätze zur Abstimmung von Fließmontagelinien

Die Abstimmung von Fließmontagelinien hat zum Ziel, Montageaufgaben zu Stationen und deren Ressourcen automatisiert so zuzuweisen, dass ein oder mehrere Optimierungskriterien bestmögliche Werte annehmen (Naveen Kumar & Dalgobind Mahto 2013). Ausgangsbasis für die Abstimmung der Fließmontagesysteme sind dabei klassischerweise Vorranggraphen und nicht, wie im vorliegenden Forschungsgegenstand, eine gegebene eindeutige Fügefolge. Zu der Abstimmung von Fließmontagesystemen gehören die zwei bereits eingeführten Disziplinen des ALB und RALB.

3.3.1.1 Assembly Line Balancing – ALB

Das ALB Problem wurde 1955 erstmals von SALVESON erwähnt (Salveson 1955). Es handelt sich dabei um das Abstimmen von Fließmontagesystemen, in denen die Stationen in Bezug auf den Materialfluss rein sequenziell angeordnet sind. Die Montageprozesse werden dabei rein manuell ausgeführt. Ähnlich wie auch das RASD Problem wird auch das ALB aus Sicht der Komplexitätstheorie als NP-schweres Probleme klassifiziert (Lopes et al. 2017; Boysen et al. 2007; Rekiek und Delchambre 2006). Klassische ALB Szenarien wurden in einer hohen Anzahl von Publikationen untersucht und sind eine bekannte Problemstellung des Operations

³² Eigene Abbildung

Research. Damit ist das ALB das meistuntersuchte Problem der hier eingeführten Forschungsdisziplinen. Literaturübersichten und Erhebungen wie zum Beispiel (Naveen Kumar & Dalgobind Mahto 2013; Boysen und Fliedner 2008; Lopes et al. 2017; Rekiek und Delchambre 2006; Sivasankaran und Shahabudeen 2014; Boysen et al. 2007) zeigen die große Anzahl existierender und abgeschlossener Forschungsprojekte sowie Veröffentlichungen auf und klassifizieren diese. BOYSEN ordnet diesbezüglich klassische ALB Probleme in vier Kategorien (Boysen et al. 2007).

- Kategorie I: Zuweisung von Fügeaufgaben zu Stationen bei gegebener Taktzeit mit dem Ziel, die Anzahl der Stationen zu minimieren.
- Kategorie II: Zuweisen von Fügeaufgaben zu Stationen mit dem Ziel, die Taktzeit zu reduzieren.
- Kategorie E: Zuweisen von Fügeaufgaben zu Stationen mit dem Ziel, die Anzahl der Stationen und die Taktzeit zu reduzieren.
- Kategorie F: Zuweisen von Fügeaufgaben zu Stationen, dabei sind Taktzeit als auch die Anzahl der Stationen feste Konstanten.

Für Probleme aller genannter Kategorien wurden in der Vergangenheit Vereinfachungen angenommen, um die großen Lösungsräume des ALB zu beherrschen, was zu dem Begriff „Simple Assembly Line Balancing“ (SALB) führte. Insbesondere für klassische ALB Szenarien, die eine große Anzahl an Freiheitsgraden zulassen, sind Vereinfachungen für das Erforschen erster Vorgehensweisen unumgänglich. Jedoch ist es auf Grund der Vereinfachung nicht möglich, diese für industrielle Anwendungsfällen zu nutzen. Für das Lösen der ALB Problemstellung unter Randbedingungen industrieller Szenarien gibt es noch immer ein großes Defizit aussagekräftiger Studien (Boysen et al. 2007). Die folgende Tabelle 2 zeigt eine Auswahl existierender Arbeiten. Außerdem zeigt sie eine Klassifizierung der Arbeiten nach der Struktur der untersuchten Montagesysteme, der Kategorie nach Boysen, der Berücksichtigung von Varianten, den angewendeten Algorithmen und zuletzt nach den berücksichtigten Faktoren in der Zielfunktion. Die Klassifizierung bestätigt, dass das ALB, im Gegensatz zu den im Karosseriebau vorkommenden abweichenden Montagesystemstrukturen, ausschließlich sequenzielle Montagelinien betrachtet. Für die Montagelinien werden jedoch verschiedenste Szenarien unter Anwendung unterschiedlichster Zielfunktionen betrachtet. Auch verschiedene Algorithmen werden für die Lösung des ALB Problems in Betracht gezogen. Neben klassischen optimalen kombinatorischen Algorithmen wie dem Branch and Bound Verfahren werden vornehmlich bio-inspirierte Algorithmen angewandt. Insbesondere Ameisenalgorithmen finden häufig Anwendung. Die in der Tabelle ersichtlichen Forschungsarbeiten sind in Abbildung 22 in den Betrachtungsrahmen der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit eingeordnet und dienen darauf aufbauend der Ausarbeitung der Forschungslücke.

Tabelle 2: Existierende Ansätze des Assembly Line Balancing

Quelle - ALB	ID	Struktur Montagesystem	Kategorie	Varianten	Angewandte Algorithmen	Kriterien in Zielfunktion
(Ağpak und Gökçen 2005)	1	Sequenziell	SALB-1	Nein	Diverse Heuristiken	Anzahl Stationen
(Amen 2000)	2	Sequenziell	SALB-1	Nein	Branch&Bound, Backtracking	Kosten
(Bautista und Pereira 2007)	3	Sequenziell	SALB	Nein	Ameisenalgorithmen	verschiedene Zielfunktionen
(Boysen und Fliedner 2008)	4	Sequenziell	ALB	Nein	Ameisenalgorithmen	verschiedene Zielfunktionen
(Boysen 2005)	5	Sequenziell	ALB	Nein	Ameisenalgorithmen	verschiedene Zielfunktionen
(Bukchin und Rabinowitch 2006)	6	Sequenziell	SALB-1	Ja	Vorranggraph Manipulation	Anzahl Stationen
(Dolgui und Gafarov 2017)	7	Sequenziell	SALB-1	Nein	Vorranggraph Manipulation	Anzahl Stationen
(Fleszar und Hindi 2003)	8	Sequenziell	SALB-1	Nein	Hoffmann Heuristik	Anzahl Stationen
(Fonseca et al. 2005)	9	Sequenziell	Stochastic SALB-1	Nein	Fuzzy Heuristiken	Anzahl Stationen
(Ghosh und Gagnon 1989)	10	Sequenziell	SALB-1	Nein	Vorranggraph Manipulation	Anzahl Stationen
(Karabatı und Sayın 2003)	11	Sequenziell	SALB-2	Ja	MILP, Heuristiken	Taktzeit
(Lapierre et al. 2006)	12	Sequenziell	SALBP-1	Nein	Tabu-search	Anzahl Stationen
(Pastor et al. 2002)	13	Sequenziell	SALB	Nein	Branch & Bound	Anzahl Stationen || Kosten
(Simaria und Vilarinho 2004)	14	Sequenziell	SALB-2	Ja	Generische Algorithmen	Taktzeit
Literature Reviews						
(Boysen et al. 2007)	15	-	Literature Review		-	-
(Naveen Kumar & Dalgobind Mahto 2013)	16	-	Literature Review		-	-
(Sivasankaran und Shahabudeen 2014)	17	-	Literature review		-	-

3.3.1.2 Robotic Assembly Line Balancing – RALB

Das Robotic Assembly Line Balancing (RALB) wurde von (Rubinovitz und Bukchin 1991; Levitin et al. 2006) eingeführt und fokussiert sich auf Montagelinien, deren ausführenden Instanzen ausschließlich aus Robotern bestehen und stellt somit eine Spezialform des ALB dar. Die Planung roboterbasierter Montagesysteme unterscheidet sich elementar von manuellen Montagesystemen. Menschen benötigen für das Lernen einer Montageaufgabe Zeit, dieser Lernvorgang wird in den existierenden Arbeiten zum Beispiel durch Lernkurven berücksichtigt. Roboter hingegen führen Aufgaben nach der definierten Vorgehensweise (Roboterprogramm) stark determiniert aus. Jedoch sind die ausführbaren Montageaufgaben der Roboter auf die der Roboterprogramme beschränkt und damit deutlich unflexibler als die des Menschen. Zusätzlich sind Roboter durch die Fähigkeiten der zur Verfügung stehenden Werkzeuge sehr limitiert. Der Mensch wiederum kann mit seinen Händen und seiner Lernfähigkeit zahlreiche Arbeitsgänge durchführen. Dadurch können Roboter wesentlich unflexibler als Menschen im Montageprozess eingesetzt werden und die Montageprozesse müssen wesentlich granularer geplant werden. Wie das ALB ist auch das RALB ein prominentes Forschungsgebiet. Zahlreiche Autoren haben Beiträge veröffentlicht, die Verfahren aufzeigen, um Teile des RALB Problem zu lösen. Dabei kann äquivalent zum ALB auch beim RALB unter Typ I, II, E und F nach BOYSEN unterschieden werden (Boysen 2005). Die folgende Tabelle 3 zeigt die Auswahl von Forschungsergebnissen, die in die Kategorien nach BOYSEN klassifiziert werden und durch diverse Algorithmen versuchen, unterschiedliche Zielfunktionen zu verfolgen.

Tabelle 3: Existierende Ansätze Robotic Assembly Line Balancing

Quelle - RALB	ID	Struktur Montagesystem	Kategorie	Varianten	Angewandte Algorithmen	Kriterien in Zielfunktion
(Borba et al. 2018)	1	Sequenziell	RALB-I	Nein	Branch & Bound Algorithmen	Kosten
(Daoud et al. 2012)	2	Sequenziell	RALB-E	Nein	Partikel-Schwarm Algorithmen	Nutzungsgrad
(Daoud et al. 2014)	3	Sequenziell	RALB	Ja	Ameisen- & generischen Algorithmen	Nutzungsgrad
(Gao et al. 2009)	4	Sequenziell	RALB-II	Nein	Generische Algorithmen, Lokale Suche	Taktzeit
(Kim und Park 1995)	5	Sequenziell	RALB-I	Nein	Schnittgeraden Algorithmen	Anzahl Stationen
(Levitin et al. 2006)	6	Sequenziell	RALB	Nein	Generische Algorithmen, lokale Suche	Ausbringung
(Li et al. 2016)	7	Sequenziell	RALB-F	Nein	MIP	Taktzeit, Energieverbrauch
(Nilakantan und Ponnambalam 2012)	8	Sequenziell	RALB-II	Nein	Partikel-Schwarm Algorithmen	Taktzeit, Ausbringung
(Nilakantan et al. 2015)	9	Sequenziell	RALB-II	Nein	Bio-inspirierte Suchalgorithmen	Taktzeit
(Yoosefelahi et al. 2012)	10	Sequenziell	RALB-II	Nein	MILP	Versch. Zielfunktionen

3.3.1.3 Zwischenfazit ALB

Das ALB entspricht einer sehr akademischen Betrachtung der Montagelinienplanung. Einzelne Fügeaufgaben der gegebenen, aber akademischen Vorranggraphen werden hierbei einzelnen Montagestationen zugewiesen. Die zu produzierenden Produkte werden dabei nicht im Detail betrachtet und auch die Auswahl der Betriebsmittel sowie die Gestaltung der einzelnen Prozesse werden in den genannten Veröffentlichungen nicht im Detail thematisiert. Auf die detaillierte Vorstellung einzelner Veröffentlichungen in diesem Abschnitt wurde aus diesem Grund verzichtet. Die Quellen der Tabelle 2 und Tabelle 3 werden jedoch Abbildung 22 in den Forschungskontext eingeordnet.

Für die Lösung des ALB-Problems kommen jedoch verschiedene exakte und heuristische Optimierungsalgorithmen zum Einsatz, die für den in dieser Arbeit betrachteten Forschungsgegenstand in Betracht gezogen werden, vgl. dazu Kapitel 4.

3.3.2 Ansätze zur Gestaltung von Fließmontagelinien

Die Gestaltung von Fließmontagelinien wird durch das ALD und RALD vertreten. Beide Disziplinen befassen sich mit der Gestaltung von sequenziellen Montagelinien. Zu der Gestaltung gehört die Equipment Selektion, die Dimensionierung von Arbeitsstationen und Montageprozessen, der Abtaktung sowie dem Positionieren der Ressourcen (letzteres nicht im Betrachtungsrahmen dieser Arbeit). Die Gestaltung von Montagelinien unterliegt damit einem deutlich höheren Freiheitsgrad.

3.3.2.1 Assembly Line Design – ALD

Ähnlich wie das ALB fokussiert sich das ALD hauptsächlich auf manuelle Montagetätigkeiten sequenzieller Montagelinien. Die folgende Tabelle 4 zeigt äquivalent zu den zuvor eingeführten Disziplinen eine Auswahl wichtiger Arbeiten, die sich dem ALD widmen. Bei dem ALD werden insbesondere auch gestaltende Aspekte berücksichtigt, die über die Abstimmung von Montagelinien hinausgehen. Trotz der höheren Komplexität des Problems und aufgrund der größeren Anzahl an Freiheitsgraden, werden zumeist die gleichen Algorithmen wie für das (R)ALB angewendet. Gleichmaßen ist auffällig, dass auch für das ALD nur einer der existierenden Ansätze verschiedene Produktvarianten berücksichtigt. Die Kategorisierung nach Boysen ist für die gestaltenden Anwendungsfälle nicht passend, da sich diese lediglich auf die Abstimmungsprobleme bezieht, nicht jedoch auf Gestaltungsprobleme.

Tabelle 4: Existierende Ansätze Assembly Line Design

Quelle - ALD	ID	Struktur Montagesys- tem	Varianten	Angewandte Algorithmen	Kriterien in Ziel- funktion
(Boysen 2005)	1	Sequenziell	Nein	Ameisenalgorithmen	Verschiedene Ziel- funktionen
(Bukchin und Tzur 2000)	2	Sequenziell	Nein	Branch & Bound	Kosten
(Bukchin und Rubinovitz 2003)	3	Sequenziell	Nein	Branch & Bound	Stationen || Kosten
(Mas et al. 2015)	4	Sequenziell	Nein	Regelbasierte Algorithmen	Kosten
(Rekiek et al. 2002)	5	Sequenziell	Nein	Generische Algorithmen, Branch & Cut	Kosten
(Rekiek und Delchambre 2006)	6	Sequenziell	Ja	Mult. Algorithmen	Mult. Faktoren
(Rubinovitz und Bukchin 1991)	7	Sequenziell	Nein	Branch & Bound, Heuristiken	Durchlaufzeit

3.3.2.2 Robotic Assembly Line Design – RALD

Basierend auf das beschriebene Forschungsdefizit für die Entwicklung hochautomatisierter Montageanlagen führen MICHELS ET AL. den Begriff und die Problemstellung des Robotic Assembly Line Design (RALD) ein (Michels et al. 2018). Beim RALD müssen für eine gegebene Taktzeit die Anzahl der Stationen und die zugehörigen Roboter so konfiguriert werden, dass sie Optimierungskriterien optimieren. MICHELS ET AL. präsentieren eine Methode, die auf einer mathematischen mixed-integer linear programming (MILP) Formulierung basiert, die das Generieren von parallelen Stationen berücksichtigt. Der Algorithmus wurde gegen zahlreiche industrielle Anwendungsfälle getestet und für die meisten dieser Anwendungsfälle konnte er gültige Ergebnisse generieren. Zusätzlich wurde bewiesen, dass die generierten Anlagenlösungen manuelle Lösungen in Ihrer Qualität und Optimalität übertreffen. (Michels et al. 2018) Auch MICHALOS ET AL. fokussieren sich auf das RALD Problem und wenden dieses auf industrielle Szenarien des automobilen Karosserierohbaus an. Die Autoren beschreiben eine Methode, welche automatisiert einen Lösungsvorschlag für eine vollautomatisierte Produktionsanlage generiert, welcher gegen diverse Kriterien optimiert wird. Die Methode basiert auf einem regel- und formelbasierenden Algorithmus und wurde anhand eines industriellen Anwendungsfall validiert. Die Forschungsergebnisse bestätigen das große Potential für die Automatisierung der Planungsprozesse für hochautomatisierte Anlagen, jedoch ist der Lösungsansatz nicht generisch anwendbar und zeigt Defizite in der Berücksichtigung wichtiger industrieller Einflussgrößen. Insbesondere die Beschränkung auf rein sequenzielle Anlagen schränkt die Anwendbarkeit auf Hauptlinien des automobilen Karosseriebaus ein. (Michalos et al. 2015)

Auch für das RALD zeigt die folgende Tabelle 5 eine Auswahl und Klassifikation an Forschungsarbeiten. Diese werden in Abbildung 22 in den Forschungskontext eingeordnet.

Tabelle 5: Existierende Ansätze Robotic Assembly Line Design

Quelle - RALD	ID	Struktur Montagesystem	Varianten	Angewandte Methoden/Algorithmen	Faktoren in Zielfunktion
(Akturk und Tula 2011)	1	Sequenziell	Nein	MIP - Heuristik	Kosten
(Colledani et al. 2016)	2	Sequenziell	Ja	MILP	Kosten
(Colledani et al. 2015)	3	Sequenziell	Ja	MILP	Durchlaufzeit, Kosten, Fläche, Energieverbrauch
(Michalos et al. 2015)	4	Sequenziell	Nein	Heuristischer Suchalgorithmus	Auslastung
(Michalos et al. 2012)	5	Sequenziell	Nein	Heuristischer Suchalgorithmus	Kosten
(Michels et al. 2018)	6	Sequenziell & parallele Stationen	Nein	MILP	Kosten
(Mukund Nilakantan und Ponnambalam 2016)	7	Sequenziell	Nein	Evolutionäre Algorithmen	Line Efficiency, Energieverbrauch
(Rubinovitz et al. 1993)	8	Sequenziell	Nein	Branch & Bound, Heuristiken	Durchlaufzeit

3.3.2.3 Zwischenfazit ALD

Die untersuchten Referenzen des ALD stellen wichtige Forschungsarbeiten im Kontext der in dieser Arbeit untersuchten Problemstellung dar. Dabei stechen insbesondere die Lösungen der Autoren MICHALOS ET AL. und MICHELS ET AL. hervor. Die Methoden der Autoren ermöglichen das automatisierte Planen von Montagelinien für ausgewählte Industrieszenarien. Leider sind die Ansätze nur sehr limitiert einsetzbar, da wichtige Aspekte und Randbedingungen nicht betrachtet wurden. Dazu gehören der Umgang mit mehreren Varianten, die Gestaltung nicht linienförmiger Montagesysteme sowie die Berücksichtigung verschiedener Fügeverfahren. Zusätzlich wird in den Veröffentlichungen nicht ersichtlich, inwieweit für die einzelnen Stationen ein Prozessmodell kreiert wurde.

3.3.3 Ansätze für die Gestaltung von Montagesystemen

Die Gestaltung von Montagesystemen, also das ASD sowie das RASD, grenzt sich vom ALD durch die Struktur des Montagesystems ab. Während das ALD (inkl. aller Teildisziplinen) rein sequenzielle Montagelinien betrachtet, werden im ASD jegliche Montagesystemstrukturen betrachtet.

3.3.3.1 Assembly System Design – ASD

Das ASD ist ein wenig erforschtes Feld. HU ET AL. kritisieren genau dieses Defizit. Die zahlreichen Forschungsarbeiten, die das ALB und ALD thematisieren, stellen für die Industrie praktikable Teillösungen dar, jedoch sind diese nur in solchen Bereichen anwendbar, in welchen die Montage rein sequenziell durchgeführt wird (Hu et al. 2011, S. 730). Hintergrund des stark auf sequenzielle Montagestrukturen fokussierten Forschens liegt in der manuellen Montage. Die traditionelle und manuelle Montage wird seit der Erfindung der Montagelinien durch Ford hauptsächlich rein sequenziell geplant (Müller 2018, S. 39). Für das ASD können nur wenige Forschungsansätze gefunden werden wie durch die folgende Tabelle 6 ersichtlich wird. Lediglich zwei der aufgeführten Ansätze beschäftigen sich mit der Entwicklung neuer konkreter algorithmischer Lösungsansätze für die Probleme. Weitere Konzeptions- und Positionspapiere wurden aufgenommen und in der Tabelle grau hinterlegt.

Tabelle 6: Existierende Ansätze Assembly System Design

Quelle - ASD	ID	Struktur Montagesystem	Varianten	Angewandte Algorithmen	Faktoren in Zielfunktion
(Hu et al. 2011)	1			Positionspapier	
(Michniewicz et al. 2017)	2			Konzept für die Planungsautomatisierung	
(Kiefer et al. 2018)	3			Konzept für die Planungsautomatisierung	
(Koren und Shpitalni 2010)	4	beliebig	Nein	Implizite Enumeration (limitiert)	Kosten, Quality, Produktivität
(Li et al. 2011)	5	beliebig	Nein	Implizite Enumeration (limitiert)	-
(Webbing und Hu 2005)	6	beliebig	Nein	Implizite Enumeration (limitiert)	-
(Weidner 2014)	7			Konzept für die Planungsautomatisierung	

Die Konzeptionspapiere zeigen grundlegende Konzepte auf, inwieweit eine automatisierte Konzeption von Montageanlagen auch für nicht sequenzielle Anordnung von Stationen ermöglicht werden kann. Die Betrachtungstiefe dieser Konzepte zeigt jedoch abermals das große Defizit im Bereich des ASD auf. Die Arbeiten von KOREN und WEBBING zeigen konkretere Lösungskonzepte auf und beschäftigen sich mit dem umfangreichen und exponentiell ansteigenden Kombinationsraum der Montagestrukturen. Die Autoren versuchen mit Hilfe kombinatorischer mathematischer Formulierungen die beste Montagesystemkonfiguration zu bestimmen. Die Lösungsansätze betrachten dabei jedoch lediglich die Anordnung von

Stationen. Eine vollumfängliche Planung inkl. Produktanalyse, Ressourcenauswahl etc. findet nicht statt.

3.3.3.2 Robotic Assembly System Design – RASD

Das Robotic Assembly System Design (RASD) hat das automatisierte Planen von roboterbasierten Montagesystemen unterschiedlichster Strukturen zum Ziel und ist ein Begriff, der im Rahmen der Forschungsaktivitäten für die vorliegende Arbeit eingeführt wurde (Hagemann und Stark 2020, S. 1). Von dem ASD unterscheidet sich das RASD alleinig durch den Einsatz von Industrierobotern für das Durchführen der Montageprozesse. In dem Bereich des RASD wie in Kapitel 2 aufgezeigt, fällt auch die in dieser wissenschaftlichen Arbeit behandelte Forschungsthematik. Aus diesem Grund liegt diesem Abschnitt eine besondere Bedeutung zu Grunde. Definitiv gibt es Forschungsarbeiten, die Teildisziplinen des RASD betrachten wie die Ansätze des vorhergehenden Abschnittes. Jedoch gibt es nach bestem Wissen des Autors keine Arbeit, die einen vollumfänglichen Lösungsvorschlag für das RASD beschreibt. Dennoch soll eine weitere Arbeit vorgestellt werden, die durchaus einen Mehrwert für das RASD darstellt, jedoch in keine der vorherigen Disziplinen eingeordnet werden konnte. PELLEGRINELLI ET AL. fokussieren sich auf die automatisierte Erstellung einzelner roboterbasierter Montagezellen unter Berücksichtigung der Einhaltung der Taktzeit sowie der Minimierung benötigter Investitionskosten. Die entwickelten Algorithmen lösen dabei die automatisierte Auswahl von Ressourcen, das Allokationsproblem innerhalb der Zelle sowie die Zuordnung einzelner Schweißpunkte zu den ausgewählten Ressourcen (Pellegrinelli et al. 2014). Die Planung ganzer Produktionssysteme wird jedoch nicht abgedeckt.

3.3.3.3 Zwischenfazit ASD

Im Bereich des ASD konnten nur wenige Veröffentlichungen identifiziert werden, die eine Lösung für die algorithmische Planung von Montagesystemen vorsehen. Insbesondere im Bereich des RASD, also Montagesysteme in denen Fügeaufgaben durch Roboter übernommen werden, konnten in der Literatur keine Lösungen gefunden werden. Einzelne Veröffentlichungen zeigen die Problemstellung auf und liefern erste Konzeptideen, zeigen allerdings keine Lösungsverfahren für das Problem auf.

3.4 Einordnung bestehender Ansätze und Ableitung der Forschungslücke

Die in diesem Kapitel vorgestellten Planungsverfahren werden im Folgenden durch Abbildung 22 in den Kontext des Forschungsgegenstands eingeordnet. Dabei stellt jeder Kreis eine Veröffentlichung aus den Tabellen 1-6 dar. Die Zahlen in den Kreisen referenzieren jeweils auf die ID der Veröffentlichung in der entsprechenden Tabelle³³. Beispiel: der Kreis mit der Ziffer 1 im Bereich DiFa bezieht sich auf die Veröffentlichung mit der ID = 1 in Tabelle 1.

³³ Veröffentlichungen DiFa → Tabelle 1; Veröffentlichungen ALB → Tabelle 2; Veröffentlichungen RALB → Tabelle 3; Veröffentlichungen ALD → Tabelle 4; Veröffentlichungen RALD → Tabelle 5

Die Einordnung erfolgt auf der in Kapitel 2 eingeführten Einordnungssystematik. Dieser Systematik folgend werden die einzelnen Verfahren durch die zwei Achsen in der Abbildung in den produktionstechnischen Kontext und den planungstechnischen Kontext eingeordnet. Der Quadrant links oben gruppiert innovative Verfahren, die hochautomatisierte Anlagen planen, jedoch auf einem manuellen Vorgehen basieren wie in der heutigen Produktionsentwicklung für Rohbauanlagen in der Automobilindustrie. Der Quadrant rechts oben umfasst manuelle Planungsverfahren für manuelle Produktionssysteme wie sie größtenteils in der automobilen Endmontage aufzufinden sind. Der Quadrant rechts unten umfasst automatisierte Planungsverfahren für manuelle Produktionssysteme. Zuletzt lässt sich der hier behandelte Forschungsgegenstand eindeutig in dem Quadranten links unten verorten – der automatisierten Planung von hochautomatisierten Montagesystemen.

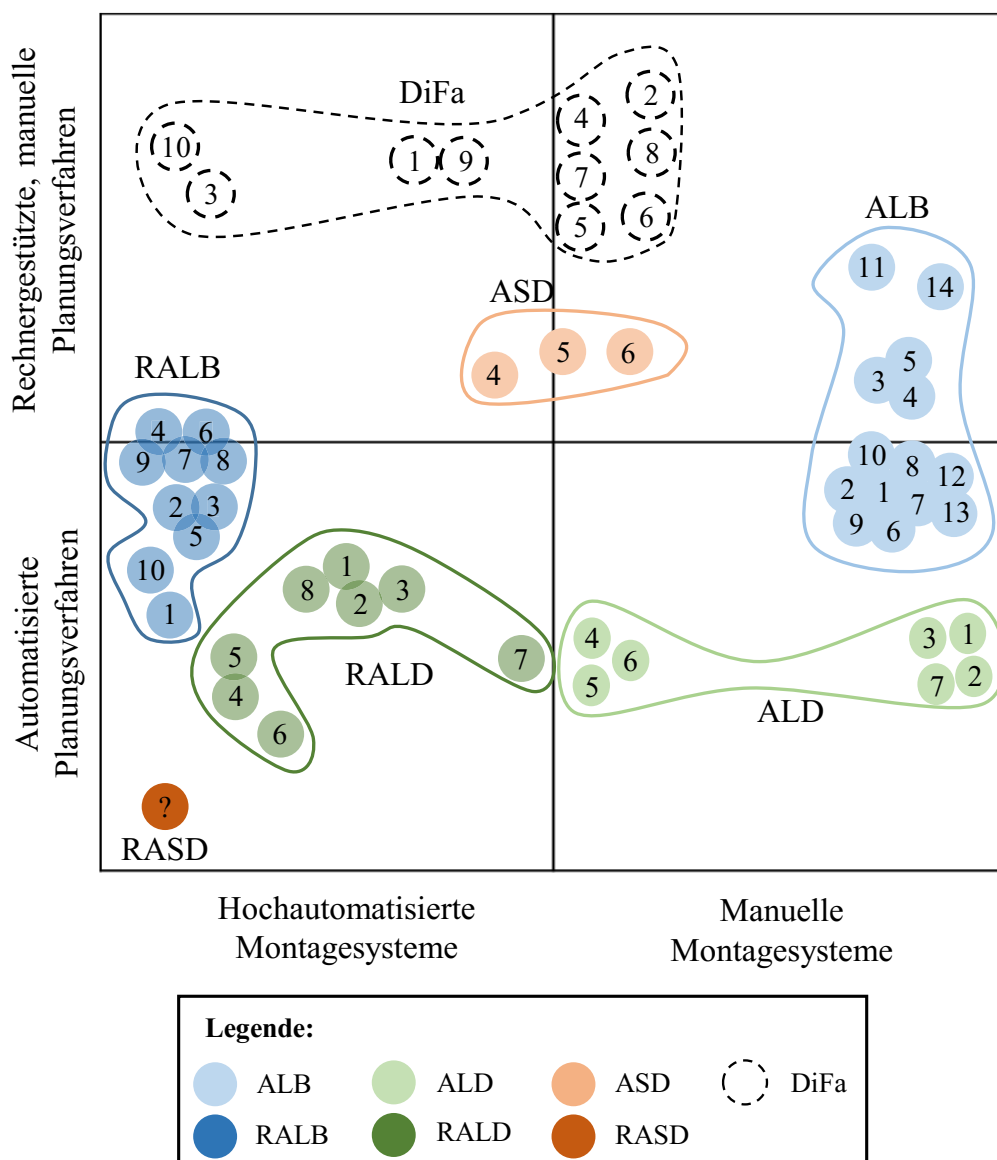


Abbildung 22: Visualisierung der Forschungslücke³⁴

³⁴ Eigene Abbildung

Dabei soll erwähnt werden, dass die Arbeiten, die sich nicht in dem Quadranten des RASD befinden, nicht einer geringeren Qualität entsprechen und definitiv einen Mehrwert für die Entwicklung des RASD-Verfahrens darstellen, jedoch abweichende Themenstellungen fokussieren. Auch innerhalb der Quadranten findet eine Anordnung der einzelnen Forschungsarbeiten statt, da beispielsweise hybride Anlagen eine Mischung aus hochautomatisierten und manuellen Vorgängen darstellen. Gleichermäßen stellen Assistenzsysteme Teilautomatismen für die Produktionsplanung dar und müssen aus diesem Grund detaillierter in der Abbildung positioniert werden.

Die Einordnung der vorgestellten Ansätze in Abbildung 22 zeigen eindeutig auf, dass keines der untersuchten Verfahren eine vollumfängliche Automatisierung der Planung im Rahmen des PPR-Modells von hochautomatisierten Montagesystemen für die Idealplanung ermöglicht. Die Ansätze, die sich mit der Konzeption von roboterbasierten Montageanlagen beschäftigen (RALD & RASD), wurden untersucht und die Defizite aufgezeigt. Viele der Ansätze verfolgen eine rein akademische Problemstellung, damit lassen sich diese Ansätze nur schwer oder nur teilweise auf industrielle Problemstellungen anwenden. Damit kann die Forschungslücke für diese wissenschaftliche Arbeit anhand der folgenden Alleinstellungsmerkmale beschrieben werden:

- (A.1) Keiner der existierenden Ansätze verfolgt eine automatisierte, konsistente und produktgetriebene Modellierung von Ressourcen und Prozessen nach dem PPR-Modell.
- (A.2) Keiner der beschriebenen Ansätze beschreibt eine automatisierte Modellierung von roboterbasierten Montagesystemen mit nicht-sequenziellen Strukturen wie sie im automobilen Karosseriebau vorzufinden sind.
- (A.3) Keiner der existierenden Ansätze beschreibt eine Modellierung von umfassenden Handhabungsprozessen wie sie insbesondere für das Einsammeln von Bauteilen und Zusammenbauten benötigt wird.
- (A.4) Keiner der existierenden Ansätze zeigt eine Lösung für die automatisierte Planung roboterbasierter Montagesysteme für variantenbehaftete Produkte auf.

Basierend auf der dargelegten Forschungslücke wird die folgende Forschungsfrage gebildet:

Wie kann auf Basis gegebener Produktdaten, Fügefolgestrukturen und Projektprämissen die Konzipierung von hochautomatisierten Montagesystemen algorithmisch gelöst werden?

Die folgenden Leitfragen stellen wichtige Aspekte der Forschungslücke in den Vordergrund und dienen der Strukturierung der folgenden Forschung. Die Forschungsfragen werden in der vorliegenden Arbeit vollumfänglich beantwortet. Die diesbezügliche Überprüfung erfolgt in Abschnitt 0.

Leitfragen:

- (L.1) Welche Informationen und Einflussfaktoren müssen für einen Planungsalgorithmus berücksichtigt werden?
- (L.2) Welchen Nutzen haben bestehende Methoden der Informationstechnik und inwieweit eignen sie sich für die Anwendung in einem Planungsalgorithmus?

- (L.3) Wie kann das umfangreiche explizite und implizite Wissen der Produktionsplaner formalisiert werden und an welchen Stellen können Algorithmen die Planungsqualität des manuellen Vorgehens übertreffen?
- (L.4) Inwieweit kann eine Lösung erreicht werden, die mit verschiedenen Arten von Zusammenbauten und den dazugehörigen, sich unterscheidenden Bauteilen und Fügeverfahren umgehen kann?
- (L.5) Wo liegen die Grenzen eines Algorithmus und ab welchem Zeitpunkt bzw. Detaillierungsgrad wird weiterhin ein Planer benötigt?

4 INFORMATIONSTECHNISCHE VERFAHREN DER PRODUKTIONS-PLANUNG

In dem vorherigen Kapitel 3 wurde die Forschungslücke dieser wissenschaftlichen Arbeit dargelegt. Es hat sich gezeigt, dass existierende Lösungsverfahren das RASD Problem nicht lösen können. Dieser Erkenntnis folgend, befasst sich dieses Kapitel mit der intensiven Analyse bestehender Verfahren der Informationstechnik, die für das Lösen der Problemstellung in Betracht gezogen werden können. Für die Lösung, der in der Produktionsplanung vorliegenden Optimierungsprobleme, bietet traditioneller Weise das Feld der wissensbasierten Systeme Verfahren, die in der Forschung, aber auch in der Industrie Anwendung finden. Die Lösungsfindung erfolgt dabei auf einer Verbindung der angewandten Mathematik, der Informatik und der Wirtschaftswissenschaften.

4.1 Klassifizierung bestehender Verfahren

Für die Automatisierung von Lösungen industrieller Problemstellungen finden häufig Konzepte der Wissensrepräsentation Anwendung, die durch sogenannte wissensbasierte Systeme realisiert werden. Wissensbasierte Systeme werden nach KURBEL wie folgt definiert (Kurbel 1992, S. 18):

„Ein wissensbasiertes System ist ein Softwaresystem, bei dem das Fachwissen über ein Anwendungsgebiet [...] explizit und unabhängig vom allgemeinen Problemlösungswissen dargestellt wird.“ (Kurbel 1992, S. 18)

Konventionelle Softwaresysteme basieren wie auch wissensbasierte Systeme auf Wissen eines Fachexperten oder Programmierers, jedoch findet keine klare Trennung zwischen Expertenwissen und Problemlösungswissen statt. Wissensbasierte Systeme hingegen greifen auf eine sogenannte Wissensbasis zurück, die insbesondere das explizite Expertenwissen repräsentieren. Der eigentliche Problemlösungsalgorithmus des Systems greift dabei auf diese Wissensbasis zu. Bei notwendigen Änderungen muss also in erster Linie nicht der Problemlösungsalgorithmus selbst angepasst werden, sondern die Wissensbasis (Beierle und Kern-Isberner 2008, S. 11). Wissensbasierte Systeme können auf unterschiedlichen Verfahren, sogenannten wissensbasierten Verfahren basieren (Schmidt 2002, S. 151–153). Dabei bedienen sich diese aus einer großen Auswahl aus Verfahren der Informatik und Mathematik sowie aus dem Themenkomplex der Künstlichen Intelligenz. In der Produktionstechnik finden diesbezüglich auch häufig Verfahren des Operations Research Anwendung.

Expertensysteme werden in Abgrenzung dazu als eine besondere Art wissensbasierter Systeme bezeichnet, die sich durch einen besonders hohen Komplexitätsgrad definieren und versuchen eine Nachbildung der menschlicher Problemlösungsfähigkeiten zu erzielen (Styczynski et al. 2017, S. 117; Beierle und Kern-Isberner 2008, S. 11). KURBEL weist aber auch auf die Unvollkommenheit von Expertensystemen hin. Denn diese basieren auf der reinen Repräsentation von menschlichem Wissen und können somit, wie auch ein Mensch, Fehler begehen oder nicht optimale Ergebnisse liefern. Diesbezüglich finden in Expertensystemen

Methoden der Künstlichen Intelligenz Anwendung, diese definiert STARK als die Replikation von künstlicher Intelligenz durch Software (Stark et al. 2018).

„Artificial intelligence: replication of human intelligence through software”

(Stark et al. 2018)

Im Gegensatz zu Expertensystemen, die sich stark an der menschlichen Denkweise orientieren, können wissensbasierte Systeme auch flexibler auf Methoden angrenzender Themengebiete zurückgreifen. Dabei übertreffen exakte Algorithmen z.B. aus der mathematischen Optimierung in vielen Anwendungsfällen die Fähigkeit menschlicher Experten, erfordern aber je nach Anwendungsfall eine sehr hohe Rechenleistung (Hartmann und Lehner 1990, S. 84). Diese Eigenschaften haben Methoden der Künstlichen Intelligenz und damit auch Expertensysteme im Regelfall nicht. Die zusammenfassende Einordnung der Themenbereiche wissensbasierte Systeme, Expertensysteme und der Künstlichen Intelligenz visualisiert die folgende Abbildung 23.

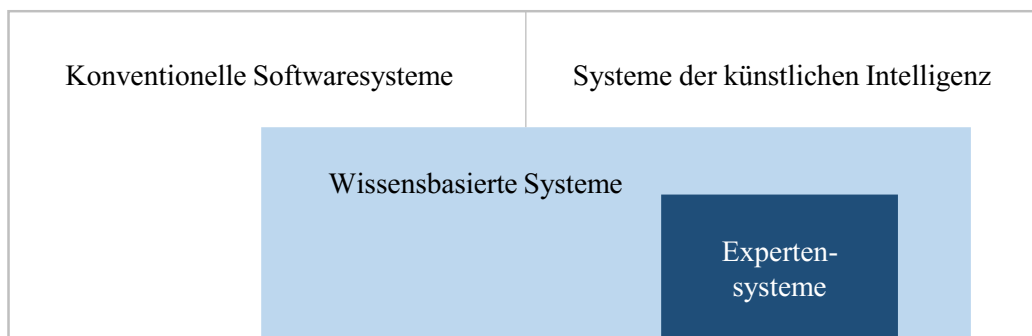


Abbildung 23: Disziplinen der Wissensrepräsentation³⁵

Die folgende Abbildung 23 zeigt das Ergebnis einer umfangreichen Literaturrecherche mit dem Ziel, etablierte Verfahren der Informationstechnik zu identifizieren, die sich für die Anwendung in der algorithmischen Planung eignen³⁶. Die elementarste Differenzierung der aufgezeigten Verfahren erfolgt durch das Optimalitätskriterium. Exakte Verfahren garantieren das Finden optimaler Lösungen für das jeweilige Problem, wohingegen heuristische Verfahren lediglich ein systematisches und effizienteres Vorgehen darstellen, das zu einem guten Ergebnis führt, das Kriterium der Optimalität wird jedoch zumeist nicht erreicht (Werners 2013, S. 9). Das Berechnen exakter Lösungen für diskrete Problemstellungen wie der algorithmischen Planung führt in diesem Zusammenhang jedoch, abhängig von dem Komplexitätsgrad der Problemstellung, zu einem exponentiell steigenden Rechenaufwand. Somit ist beim Lösen von NP-komplexen Problemen durch exakte Verfahren der Umfang der Berechnung durch die Problemkomplexität begrenzt (vgl. Abschnitt 5.2.3).

³⁵ Angelehnt an Kurbel 1992, S. 21.

³⁶ Wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben, kann die algorithmische Planung von Montagesystemen als diskretes mathematisches Optimierungsproblem beschrieben werden. Das Problem wird den NP-schweren Optimierungsproblemen zugeordnet.

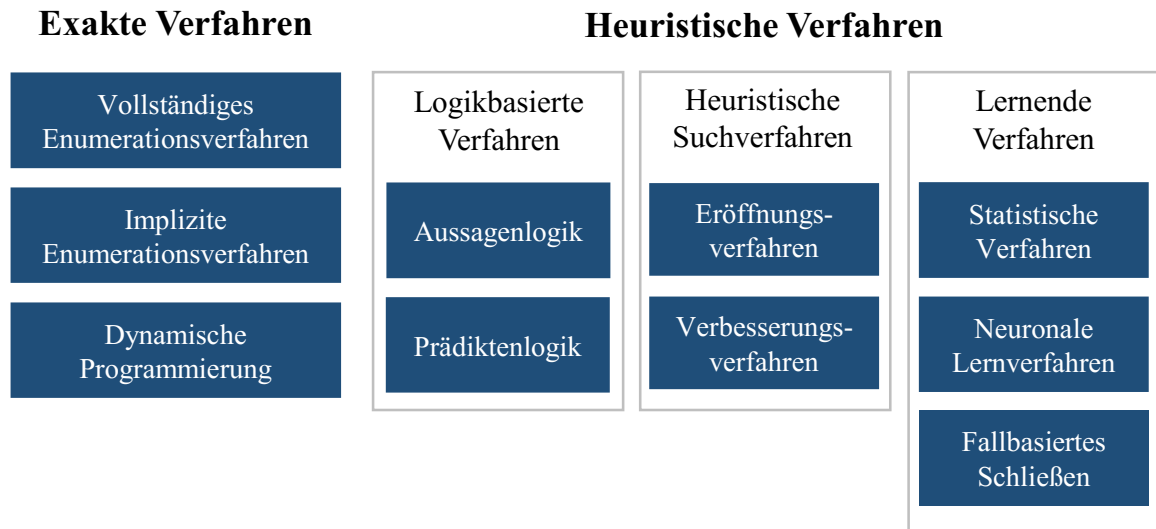


Abbildung 24: Lösungsverfahren für die algorithmische Anlagenplanung³⁷

4.2 Exakte Verfahren

Exakte Verfahren werden als der „naive“ Ansatz für die Lösungsfindung bezeichnet, da sie auf der Enumeration von Lösungsmöglichkeiten basieren. Diesbezüglich kann sichergestellt werden, dass die optimale Lösung für ein beschriebenes Problem gefunden wird, der Rechenaufwand steigt dabei jedoch exponentiell. Die Lösung durch exakte Verfahren ist deshalb durch den Komplexitätsgrad und den Berechnungsumfang begrenzt.

In Abbildung 24 werden drei prominente Vertreter der Enumerationsverfahren aufgezeigt. Das einfachste dieser Enumerationsverfahren stellt die *vollständige Enumeration* dar. Die vollständige Enumeration durchsucht den kompletten, aber endlichen Suchraum durch die Kombination aller Lösungsmöglichkeiten. Abhängig von der Problemstellung und dessen Komplexitätsgrads führen vollständige Enumerationsverfahren schon bei kleinen Problemen zu sehr langen Berechnungszeiten (Grötschel 2015, S. 2). Dadurch weisen vollständige Enumerationsverfahren eine deutlich geringere Effizienz auf als die folgenden Enumerationsverfahren.

Implizite Enumerationsverfahren unterscheiden sich von vollständigen Enumerationsverfahren dadurch, dass sie nicht alle möglichen Lösungskombinationen erzeugen und untersuchen, sondern Lösungsvarianten gezielt implizit erzeugt werden. Implizite Enumerationsverfahren greifen dabei häufig auf *Divide and Conquer* Ansätze zurück. Dabei wird das Gesamtproblem in Einzelprobleme unterteilt. Diese einzelnen Probleme werden in Suchbäumen organisiert. Das bekannteste dieser Verfahren ist das *Branch and Bound* Verfahren (Boysen 2005, S. 33; Domschke et al. 2015, S. 127–135).

³⁷ Angelehnt an Kurbel 1992, S. 18; Ertel 2009, S. 112–116; Kwasny und Faisal 1990, S. 48–57; Boysen 2005, S. 33; Domschke et al. 2015, 121 ff.; Scholl 1999, 113–136, 179–185; Günther und Tempelmeier 2007, S. 81–110

Die Einordnung der logikbasierten Verfahren ist im Kontext der algorithmischen Anlagenplanung nicht trivial, da logikbasierte Verfahren an sich exakt sein können. Im Kontext der algorithmischen Anlagenplanung jedoch, als NP-schweres Optimierungsproblem, sind keine logikbasierten Verfahren bekannt, die gleichermaßen exakt sind.

Im Gegensatz zu der vollständigen Enumeration werden die Suchbäume während der Berechnung erzeugt, allerdings ist die Reihenfolge von der Suchstrategie abhängig und einzelne Knoten werden nur dann erzeugt, wenn es die definierten Schranken des Verfahrens zulassen (Schultz 1999, S. 13–14). Schranken limitieren somit den Suchraum unter der Beibehaltung des Optimalitätskriteriums. Die Beschreibung von Schranken ist jedoch abhängig von der Problembeschreibung sehr komplex.

Die *dynamische Programmierung* stellt einen weiteren Vertreter der exakten Verfahren dar, der auf Enumeration basiert. Auch die dynamische Programmierung basiert auf dem Divide and Conquer Ansatz. Bereits berechnete Teilprobleme werden diesbezüglich gespeichert und für die folgende Berechnung wiederverwendet, falls diese wieder auftreten (Ertel 2009, S. 319–320). Dadurch wird die wiederholte Berechnung von Teillösungen vermieden.

Die folgende Tabelle 7 stellt die Eigenschaften exakter Verfahren dar. Diese werden später für die Auswahl der Verfahren herangezogen. Zunächst ist diesbezüglich auf die Ergebnisse exakter Verfahren einzugehen. Die Ergebnisse exakter Verfahren sind vollständig und optimal. Des Weiteren sind die Algorithmen und ihre Ergebnisse determiniert³⁸ und nachvollziehbar. Zuletzt sind die Ergebnisse sinnvoll, wenn auch das Verfahren auf den Anwendungsfall richtig angewendet wird. Die Bedeutung dieser Eigenschaft wird insbesondere im Vergleich zu den heuristischen Verfahren verständlich. Der Rechenaufwand exakter Algorithmen ist abhängig von der Anzahl und der Länge der Eingangswerte und steigt im Regelfall exponentiell (vgl. Abschnitt 5.3.3). Der Entwicklungsaufwand und die Komplexität exakter Algorithmen ist aufgrund der manuell festzulegenden Enumerationslogik und der Schranken relativ hoch.

Tabelle 7: Eigenschaften exakter Verfahren

Ergebnisse	Optimal, vollständig, determiniert, nachvollziehbar, sinnvoll
Vorgehensweise	Deduktiv
Berechnungsaufwand	Hoch: exponentieller Anstieg in Abhängigkeit der Eingabelänge
Entwicklungsaufwand und -Komplexität	Mittel: manuelle Beschreibung (imperativ) von Enumerationslogik und Schranken

4.3 Heuristiken

Heuristische Verfahren haben das Ziel, durch eine systematische Vorgehensweise gute, aber nicht zwangsweise optimale Lösungen durch einen deutlich geringeren Rechenaufwand zu erzeugen. Dabei gruppiert das Feld der Heuristiken ein breites Spektrum an einzelnen Verfahren, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. (Werners 2013, S. 9)

³⁸ Ein Verfahren (oder ein Algorithmus) ist genau dann determiniert, wenn er bei gleichen Eingangs- und Randbedingungen das gleiche Ergebnis liefert. Wird ein Algorithmus mehrfach wiederholt mit der gleichen Aufgabe, so liefert der Algorithmus die gleiche Ausgabe. (Claus und Schwill 2003, S. 157.)

Logikbasierte Verfahren

Die mathematische Logik wird auch als die Schlussfolgerungslehre bezeichnet. Optimierungsprobleme, die nach der Komplexitätstheorie als NP-schwere Optimierungsprobleme bezeichnet werden, lassen sich durch logikbasierte Verfahren nur auf Basis von Heuristiken lösen. Die Logik wird insbesondere dazu verwendet, Regeln zu definieren, die es ermöglichen, für eine bestimmte Problemstellung Schlussfolgerungen zu ziehen. Regeln stellen diesbezüglich eine elementare und nachvollziehbare Art der Wissensformalisierung dar. Regeln sind formalisierte Konditionalsätze, die verallgemeinert in der Form „wenn X, dann Y“-Befehle beschrieben werden können. Die Aussagen- und Prädikatenlogik stellt diesbezüglich die theoretische Grundlage dar (Beierle und Kern-Isberner 2008, S. 72). Die folgende Tabelle 8 zeigt die Eigenschaften logikbasierter Verfahren auf. Zunächst soll diesbezüglich auf die Ergebnisse logikbasierter Verfahren eingegangen werden. Für das Lösen von Optimierungsproblemen führen logikbasierte Verfahren zwar zu determinierten nachvollziehbaren und sinnvollen Ergebnissen, jedoch sind diese nicht zwangsweise vollständig und optimal. Der dafür notwendige Rechenaufwand ist im Normalfall niedrig. Für die Entwicklung müssen in den meisten Anwendungsfällen zahlreiche Regeln miteinander in Verbindung gesetzt werden. Die Verbindung mehrerer Regeln wird als Regelnetzwerk bezeichnet (Beierle und Kern-Isberner 2008, S. 79). Regelnetzwerke bieten insbesondere in klar strukturierten, determinierten und spezifischen Problembereichen einen sehr guten Lösungsansatz, können aber je nach Größe sehr komplex werden. Auch die Formalisierung von Regeln kann abhängig vom Anwendungsfall sehr komplex werden (Kwasny und Faisal 1990, S. 48–57; Beierle und Kern-Isberner 2008, S. 72–80).

Tabelle 8: Eigenschaften logikbasierter Verfahren

Ergebnisse	Nicht optimal/ vollständig, determiniert, nachvollziehbar, sinnvoll
Vorgehensweise	Deduktiv
Rechenaufwand	Niedrig
Entwicklungsaufwand und -Komplexität	Aufwändige Regelerstellung (imperativ), Komplexität steigt in Abhängigkeit von der Größe des Regelnetzwerks

Heuristische Suchverfahren

Gegenüber exakten Verfahren, die gleichermaßen auf Such- und Enumerationsverfahren basieren, nutzen heuristische Suchverfahren Wissen, um den aufgespannten Lösungsraum zu durchsuchen. Hierbei kommen sogenannte heuristische Suchstrategien zum Einsatz, nach denen der Lösungsraum durchsucht wird (Ertel 2009, S. 99–110). Heuristische Verfahren sind nicht zwangsweise nachvollziehbar und determiniert, wie zum Beispiel Heuristiken, die auf Wahrscheinlichkeit basieren. Die Suche verliert jedoch zumeist ihre Optimalität und Vollständigkeit. Auch ist sichergestellt, dass die Ergebnisse sinnvoll sind, da der Suchraum manuell beschrieben werden muss. Der Rechenaufwand ist aufgrund der angewandten Heuristiken deutlich geringer gegenüber den exakten Verfahren. Der Entwicklungsaufwand und die diesbezügliche Komplexität sind vergleichbar zu den exakten Verfahren. Jedoch kann die Entwicklung der Heuristiken sehr anspruchsvoll sein.

Tabelle 9: Charakteristiken heuristischer Suchverfahren

Ergebnisse	Nicht optimal, nicht vollständig, nicht zwangsweise determiniert und nachvollziehbar, nur sinnvolle Ergebnisse
Vorgehensweise	Deduktiv
Rechenaufwand	Mittel: starke Abhängigkeit von der Suchstrategie und der Heuristik
Entwicklungsaufwand und -Komplexität	Mittel: Ähnlich wie exakte Verfahren, jedoch müssen die Heuristiken entworfen werden, die Formalisierung von heuristischen Suchstrategien kann sehr komplex sein.

Lernende Verfahren

Nach ERTEL ist ein Verfahren genau dann lernfähig, „[...] wenn sich seine Leistungsfähigkeit auf neuen, unbekannten Daten im Laufe der Zeit verbessert“ (Ertel 2009, S. 195). Lernverfahren können zahlreichen Ansätzen folgen. Diese können in erster Linie durch die angewandte Lernstrategie unterschieden werden:

- Lernen aus Beobachtungen
- Lernen aus Analogie
- Lernen durch Deduktion
- Lernen durch Anweisung, direkte Eingabe

Die verschiedenen Lernstrategien sind insbesondere auf verschiedene Aufgaben und Datengrundlagen in wissensbasierten Systemen zurückzuführen. So können sie der Optimierung einer bestehenden Wissensbasis oder der initialen Ableitung einer Wissensbasis dienen (Ertel 2009, S. 191–193; Beierle und Kern-Isberner 2008, S. 101–105).

Das fallbasierte Schließen beschreibt ein Verfahren, das Lösungen durch Analogien in einer Falldatenbank generiert. Die Falldatenbank besteht aus gelösten Problemen, sogenannten Fällen. Das heißt, ein Fall wird in die Problembeschreibung und der Lösung des Problems unterteilt. Im Gegensatz zu den konventionellen lernenden Verfahren führt nicht das Muster zwischen den Input- und Output-Daten des Trainingskorpus zu einer Lösung, vielmehr wird die Lösung des ähnlichsten Problems aus der Falldatenbank als Lösung des neuen Problems vorgeschlagen (Herrmann 1997, S. 90–93).

Die Ergebnisgüte von lernenden Verfahren ist stark von den Algorithmen, deren Hyperparameter und der Datenquantität und -qualität des Lernkorpus abhängig (Hagemann et al. 2019, S. 162–163). Die Optimalität und Vollständigkeit von lernenden Verfahren kann nicht sichergestellt werden. Auch sind lernende Verfahren und Algorithmen nicht determiniert und die Ergebnisse nur schwer nachvollziehbar. Darüber hinaus ist nicht zwangsläufig sichergestellt, dass nur sinnvolle Ergebnisse durch den Algorithmus generiert werden. Im Gegensatz zu den zuvor diskutierten Verfahren ist die Vorgehensweise lernender Verfahren induktiv und der Entwicklungsaufwand und die diesbezügliche Komplexität sehr gering, da das Planungswissen aus den Lerndaten extrahiert wird.

Tabelle 10: Charakteristiken lernender Verfahren

Ergebnisse	Nicht optimal, nicht vollständig, nicht determiniert, nicht nachvollziehbar, nicht nur sinnvolle Ergebnisse
Vorgehensweise	Induktiv
Rechenaufwand	• Anlernprozess: Sehr hoch, teilweise exponentiell ansteigender Rechenaufwand • Lösungsgenerierung: Gering
Entwicklungsaufwand und -Komplexität	Gering

4.4 Formulierung der Lösungshypothese

Die soeben analysierten Verfahren weisen ein breites Anwendungsspektrum auf und führen in Abhängigkeit der zu bearbeitenden Problemstellung Vor- und Nachteile auf. Prinzipiell können für das Lösen des Problems sowohl exakte als auch heuristische Verfahren eingesetzt werden. Für die Einhaltung der Anforderung C.2, die die Vollständigkeit und Optimalität der Ergebnisse fordert, ist der Einsatz exakter Verfahren notwendig. Auch die Anforderung hinsichtlich der nachvollziehbaren und determinierten Ergebnisse erfüllen exakte Verfahren. Ein ernstzunehmender negativer Aspekt hinsichtlich des Einsatzes exakter Verfahren ist jedoch der nur exponentiell beschränkte Rechenaufwand bei der Anwendung für diskrete Optimierungsprobleme (vgl. Anforderung C.1). In diesem Bezug konkurrieren die Anforderungen C.1 und C.2 miteinander. Denn auch der Einsatz heuristischer Verfahren löst zwar das Problem der Berechnungszeiten, führt jedoch nicht zwangsweise zu optimalen und vollständigen Ergebnissen. Die Untergruppen der Heuristiken unterscheiden sich weiter in ihrer Vorgehensweise. Logikbasierte Verfahren sind durch ihr sehr stark deduktives Vorgehen insbesondere für determinierte, statische und gut formalisierbare Probleme geeignet und können unter diesen Bedingungen zu optimalen und vollständigen Ergebnissen führen. Dadurch eignen sie sich ideal für die Teilproblemstellungen I und III³⁹. Für die Problemstellung II würden diese allerdings zu einem sehr komplexen Regelnetzwerk führen und dennoch nicht zu optimalen Ergebnissen. Der Einsatz logikbasierter Verfahren wird aus diesem Grund im Folgenden nicht weiter für die Teilproblemstellung II⁴⁰ in Betracht gezogen. Die lernenden Verfahren haben den großen Vorteil ihrer Induktivität. Die Abbildung des Planungswissens erfolgt hierbei ausschließlich durch Extraktion aus dem Lernkorpus. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden Konzepte und Prototypen basierend auf lernenden Verfahren entwickelt und die Teilergebnisse entsprechend veröffentlicht (Hagemann et al. 2019; Hagemann et al.). Es hat sich gezeigt, dass der Entwicklungsaufwand und die Komplexität stark sinkt und lernende

³⁹ Teilproblemstellung I: vgl. Abschnitt 2.4.2, Seite - 34 -, „Algorithmische Produkt- und Fügefolgeanalyse“

Teilproblemstellung III: vgl. Abschnitt 2.4.4, Seite - 36 -, „Algorithmische Systembildung“

⁴⁰ Teilproblemstellung II: vgl. Abschnitt 2.4.3, Seite - 35 -, „Algorithmische Stations- und Prozessgestaltung“

Verfahren sich bei prozess- und produktionstechnischen Änderungen im Planungsprozess selbstständig anpassen würden. Durch ihre nicht nachvollziehbaren, nicht optimalen, nicht vollständigen und vor allem nicht determinierten Ergebnisse widersprechen sie jedoch gleich mehreren Anforderungen (vgl. Anforderung C.1, C.2). Die größte Herausforderung lernender Verfahren im industriellen Umfeld bleibt die Bereitstellung einer Lerndatenbasis, die sowohl die erforderlichen Anforderungen an Qualität als auch Quantität erfüllt.

Unter Berücksichtigung der vorliegenden Problemstellung wird die folgende Schlussfolgerung gezogen: Exakte Verfahren bieten insbesondere hinsichtlich ihrer Ergebnislösungsgüte elementare Vorteile. Ob die Berechnungszeiten den in dieser Arbeit beschriebenen Anforderungen entsprechen, lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt nur schwer abschätzen und bedarf weiterer Untersuchungen. Wird sich jedoch herausstellen, dass die exakten Verfahren bei bekannten industriellen Szenarien in adäquater Zeit berechenbar sind, stellen diese eine ideale Auswahl dar. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass auch im Bereich optimaler Verfahren zahlreiche Ansätze bestehen, den Lösungsraum z.B. durch implizite Enumerationsverfahren deutlich einzuschränken. Auch weitere Optimierungsmöglichkeiten der Informationstechnik wie der Parallelisierung von Berechnungsschritten können dabei in Betracht gezogen werden. Sollte sich herausstellen, dass trotz der getätigten Aufwände die Berechnungszeiten für industrielle Anwendungsfälle zu hoch sind, können Heuristiken auf die bereits entwickelten Verfahren angewandt werden, was jedoch dazu führen würde, dass der Algorithmus nicht mehr zwangsweise optimal ist.

Basierend auf der Analyse der bisherigen Erkenntnisse, insbesondere nach der intensiven Analyse der bestehenden Methoden der Informationstechnik, wird für die vorliegende wissenschaftliche Arbeit die folgende Lösungshypothese formuliert:

Die algorithmische Konzeption von Montageanlagen kann durch den Einsatz und der Kombination bestehender regelbasierter sowie exakter Enumerationsverfahren als wissensbasiertes System realisiert werden.

Die Lösungshypothese stellt die Grundlage für die folgende Methodenentwicklung dar und wird basierend auf dieser, am Ende von Kapitel 5, bestätigt oder falsifiziert.

5 METHODE FÜR DIE KONZEPTION VON MONTAGESYSTEMEN

Auf Basis der Lösungshypothese wird in diesem Kapitel eine Methode für die algorithmische Konzipierung von Montagesystemen entwickelt. Dabei unterteilt sich das Kapitel zunächst in den Methodenentwurf, in dem die einzelnen Elemente der Methode eingeführt und die Zusammenhänge dieser erläutert werden. In den darauffolgenden Abschnitten werden diese Elemente der Methode detailliert beschrieben, dazu gehören die Wissens Elemente, Informationselemente und die Problemlösungselemente. Das Kapitel schließt mit der Beantwortung der Lösungshypothese und der Forschungsfragen ab.

5.1 Methodenentwurf

Eine Methode ist definiert durch das

„[...] planmäßige[s] Vorgehen zum Erreichen eines bestimmten Ziels.“
(VDI-Richtlinie VDI 2223, S. 88)

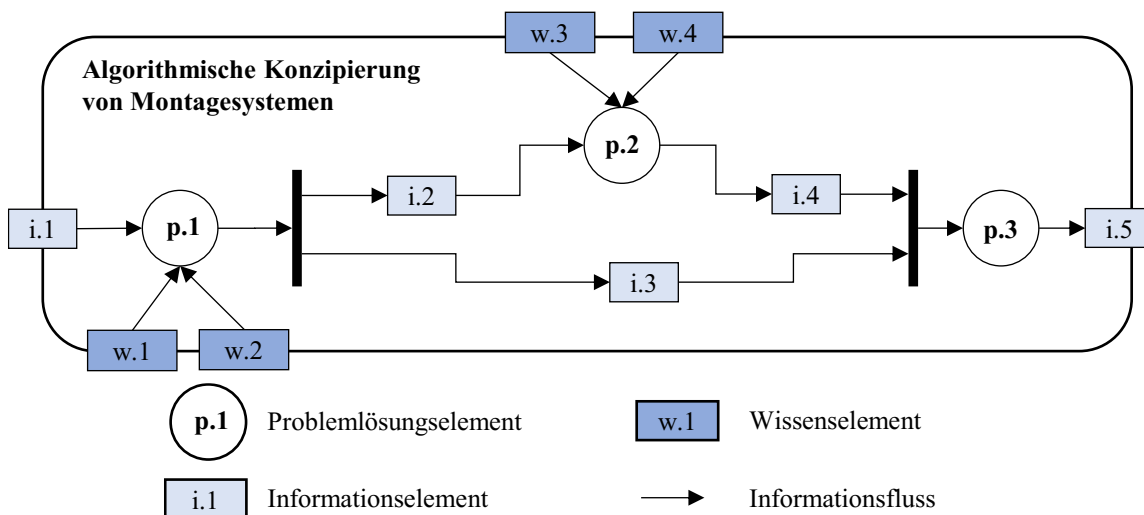
Ziel der in diesem Kapitel vorgestellten Methode ist das Erreichen der gestellten Anforderungen (vgl. Abschnitt 2.4.5), die die allumfassenden Ziele dieser Forschungsarbeit (vgl. Abschnitt 1.2) sicherstellen. Auf die Berücksichtigung der einzelnen Anforderungen wird während der Methodenentwicklung fortlaufend eingegangen und in Kapitel 7 gemeinsam mit dem entwickelten System aus Kapitel 6 auf die Einhaltung der Anforderungen überprüft.

In diesem Zusammenhang soll zusätzlich der Begriff „Algorithmus“ eingeführt werden, welcher im Laufe der Methodenentwicklung eine bedeutende Rolle spielt. Unter einem Algorithmus wird die eindeutige und endliche Beschreibung einer Methode verstanden, die einen gegebenen Input in einen Output transferiert (Eigner 2012, S. 187; Boysen 2005, S. 32; Claus und Schwill 2003, S. 405).

Nach BLESSING beginnt die Lösungsfindung zunächst mit der Beschreibung der notwendigen Funktionen einer Methode (Blessing und Chakrabarti 2009, S. 153). Die Methode für die algorithmische Planung hat die Funktion, aus einer gegebenen und projektspezifischen Informationsbasis ein Montagesystemkonzept abzuleiten. Dabei stellt die Repräsentation des Planungswissens einen elementaren Teil der zu entwickelnden Methode dar. Diesbezüglich trennen gängige Klassifizierungen Wissen nach ihrer Wissensart in deklaratives und prozedurales Wissen (Amelingmeyer 2004, S. 45). Deklaratives Wissen, auch als kenntnisgebundenes Wissen bezeichnet, stellt Kenntnisse über Sachverhalte, Fakten und Beziehungen dar (Schnupp und Leibrandt 1986, S. 13). Prozedurales Wissen hingegen, welches auch als handlungsgebundenes Wissen bezeichnet wird, beschreibt das Wissen, welches für die Ausführung von spezifischen Handlungen erforderlich ist und kann somit auch mit den Begriffen Fähigkeit und Fertigkeit in Verbindung gebracht werden (Amelingmeyer 2004, S. 45). Prozedurales Wissen basiert zumeist auf impliziten Wissens Elementen, welche in diesem Kontext Wissen darstellen, das auf der Individualität einer Person beruht und ihr die Fähigkeit überträgt, Problemstellungen mit Hilfe von Kreativität und Intuition zu lösen (Jänig 2004, S. 241). Weniger komplexe oder repetitive Problemstellungen hingegen können auch mit explizitem prozeduralem Wissen gelöst werden wie z.B. durch Regeln oder Handlungsanweisungen. Die Formalisierung und Repräsentation von Wissen hängt stark von der Wissensart ab. Rein deklaratives

Wissen kann aufgrund der Explizität sehr leicht formalisiert werden (Beierle und Kern-Isberner 2008, S. 282). Prozedurales und deklaratives Wissen können nur schwer formalisiert werden. Regeln und Bedingungen, semantische Netze, Heuristiken etc. stellen Verfahren der Informationstechnik für das Beschreiben von prozeduralem Wissen dar, können dieses aber im Regelfall nicht vollständig und optimal repräsentieren. Wissensbasierte Methoden und Systeme basieren genau aus diesem Grund auf einer Wissensbasis, welche rein explizites und deskriptives Wissen repräsentiert (Styczynski et al. 2017, S. 10). Die hier behandelte Problemstellung, welche der Mensch mit seinem prozeduralen und impliziten Wissen löst, wird hingegen entweder durch die Formalisierung des Wissens gelöst (z.B. durch semantische Verfahren) oder auf Basis von informationstechnischen Verfahren, die sich nicht zwangsweise an dem menschlichen Vorgehen orientieren (z.B. Enumerationsverfahren). Das Lösen der Problemstellungen findet in sogenannten Problemlösungskomponenten statt und greift dabei auf die Wissensbasis zu.

Abbildung 25 zeigt das Funktionsmodell der hier entwickelten Methode. Die einzelnen Elemente dieses Funktionsmodells sind durch IDs gekennzeichnet. Diesbezüglich wird unter den folgenden Elementtypen unterschieden: Wissenselemente, Problemlösungselemente, Informationselemente und zuletzt Informationsflüsse, die die einzelnen Elemente verbinden.



i.1	Projektspezifische Eingangsinformation	w.1	Prozessbibliothek
i.2	Prozessvorranggraph	w.2	Prozessprioritätsmatrix
i.3	Reihenfolgerelationen Fügeschritte	w.3	Betriebsmittelbibliothek
i.4	Stationsverbünde	w.4	Montagetemplates
i.5	Konzipiertes Montagesystem	p.1	Produkt- und Fügefolgeanalyse
		p.2	Prozess- und Stationsgestaltung
		p.3	Systembildung

Abbildung 25: Methode für die Konzipierung von Montagesystemen⁴¹

⁴¹ Eigene Abbildung

Die Informationselemente, welche in der Abbildung 25 durch Rechtecke visualisiert werden, können in Ein- und Ausgangsinformationen (i.1 und i.5) sowie Informationszuständen (i.2-i.4) unterschieden werden. Die Eingangsinformationen sind projektspezifisch. Die Wissens Elemente (w.1-w.4) hingegen beinhalten generisches, also projektunabhängiges und explizites Planungswissen. In der Abbildung ist darüber hinaus ersichtlich, dass die Methode aus drei Problemlösungselementen (p.1-p.3) besteht, welche als Kreise visualisiert sind. Die Problemlösungselemente leiten sich aus den drei Teilproblemstellungen dieser Forschungsarbeit ab (vgl. Abschnitt 2.4) und bilden das prozedurale Problemlösungswissen der Produktionsplaner ab. Die Informationszustände (i.2, i.3 und i.4) sind im Kontrast zu den Ein- und Ausgangsinformationen Zwischenstände der Methode, also Informationszustände, die in den folgenden Problemlösungselementen weiterverarbeitet werden. Zuletzt visualisieren die Pfeile Informationsflüsse zwischen den einzelnen Methodenelementen. Der Informationsfluss und die Funktionsaufrufe sind, wie in der Abbildung zu sehen, deterministisch. Jedes Problemlösungselement wird für eine gegebene Eingangsinformation nur einmal, nach vollständiger Beendigung der vorhergehenden Problemlösungsfunktion, aufgerufen.

Im Folgenden soll ein Einblick in die einzelnen Methodenelemente gegeben werden, für jedes Methodenelement folgt im Laufe dieses Kapitels eine detaillierte Einführung in einem eigenen Abschnitt. Die Eingangsinformationen der Methode (vgl. Informationszustand i.1; Abbildung 25) bestehen aus den aus Kapitel 2 eingeführten Eingangsinformationen der Produktionsplanung: Projektprämissen, Fügefolgestruktur sowie Produktinformationen. Diese bilden gleichermaßen den Input für diese Methode. Das darauffolgende Problemlösungselement p.1 (ausführliche Erklärung erfolgt in Abschnitt 5.4.1) umfasst die algorithmische Analyse dieser Eingangsinformationen (i.1) und leitet daraus einen Prozessvorranggraphen⁴² ab, der als Informationszustand (vgl. Methodenelement i.2; Abbildung 25) abgelegt wird. Der Prozessvorranggraphen beschreibt in welchen Reihenfolgen, aus der Fügefolge abgeleitete Fügeaufgaben ausgeführt werden dürfen. Die einzelnen Elemente des Vorranggraphens, die Fügeaufgaben, werden im Folgenden als Jobs bezeichnet. Jobs gruppieren einzelne Prozesselemente, wie zum Beispiel das Schweißen eines Schweißpunktes, gleicher oder ähnlicher Art. Exemplarisch soll diesbezüglich das in Abbildung 26 aufgezeigte Beispiel dienen. Links in der Abbildung zu sehen ist Fügeschritt 2. Im Rahmen des Fügeschritts 2 sollen die drei dargestellten Eingänge miteinander verbunden werden: ein Zusammenbau und zwei Einzelbauteile. Dafür sind sowohl Geoschweißpunkte als auch Ausfügepunkte notwendig. Aus diesem Fügeschritt wurde der rechts dargestellte Vorranggraph abgeleitet. Dieser besteht aus Job 1 für das Handhaben der Eingangsbauteile, Job 2 für das Geoschweißen der 20 Geo-Schweißpunkte, Job 3 für das Ausschweißen der 40 Ausschweißpunkte und zuletzt dem Job 4 für die Entnahme des fertigen Zusammenbaus sowie dem Weitertransport. Die Pfeile zwischen den einzelnen Jobs zeigen die Vorrangbeziehungen zwischen den Jobs an. In diesem Fall können die Jobs nur

⁴² Ein Vorranggraph ist ein gerichteter Graph, der die Vorgänger-/Nachfolgerrelation zwischen den Elementen des Graphens beschreibt. Ein Prozessvorranggraph beschreibt also in welchen Reihenfolgen Prozesse ausgeführt werden können (mehr als eine Reihenfolge ist möglich!). Eine Fügefolge ist hingegen nur *eine* Reihenfolge und betrachtet die Reihenfolge in der die Bauteile gefügt werden, nicht jedoch die Reihenfolge der einzelnen Fügeprozesse, die dafür notwendig sind, wie z.B. das Setzen eines Schweißpunkts.

rein sequenziell ausgeführt werden, das bedeutet zum Beispiel, dass Job 2 erst ausgeführt werden kann, sobald Job 1 abgeschlossen wurde.

Der Vorgang der Erstellung des Prozessvorranggraphen basiert auf den in der Prozessbibliothek (w.1) hinterlegten Prozessen und Prozesseigenschaften. Das Wissenselement w.1 wird ausführlich in Abschnitt 5.2.1 beschrieben. Weiter basiert das erste Problemlösungselement p.1 auf einer Prozessprioritätsmatrix, dem Wissenselement (w.2). Dieses Wissenselement wird in Abschnitt 5.2.2 ausführlich beschrieben. In der Matrix werden die Vorrangrelationen der einzelnen Verfahren abgebildet. So beschreibt die Verfahrensmatrix beispielsweise, dass ein Einsammel-/Handhabungsprozess vor einem Fügeprozess stattfinden muss, oder ein Geoschweißprozess vor einem Ausfügeschweißprozess ausgeführt werden muss.

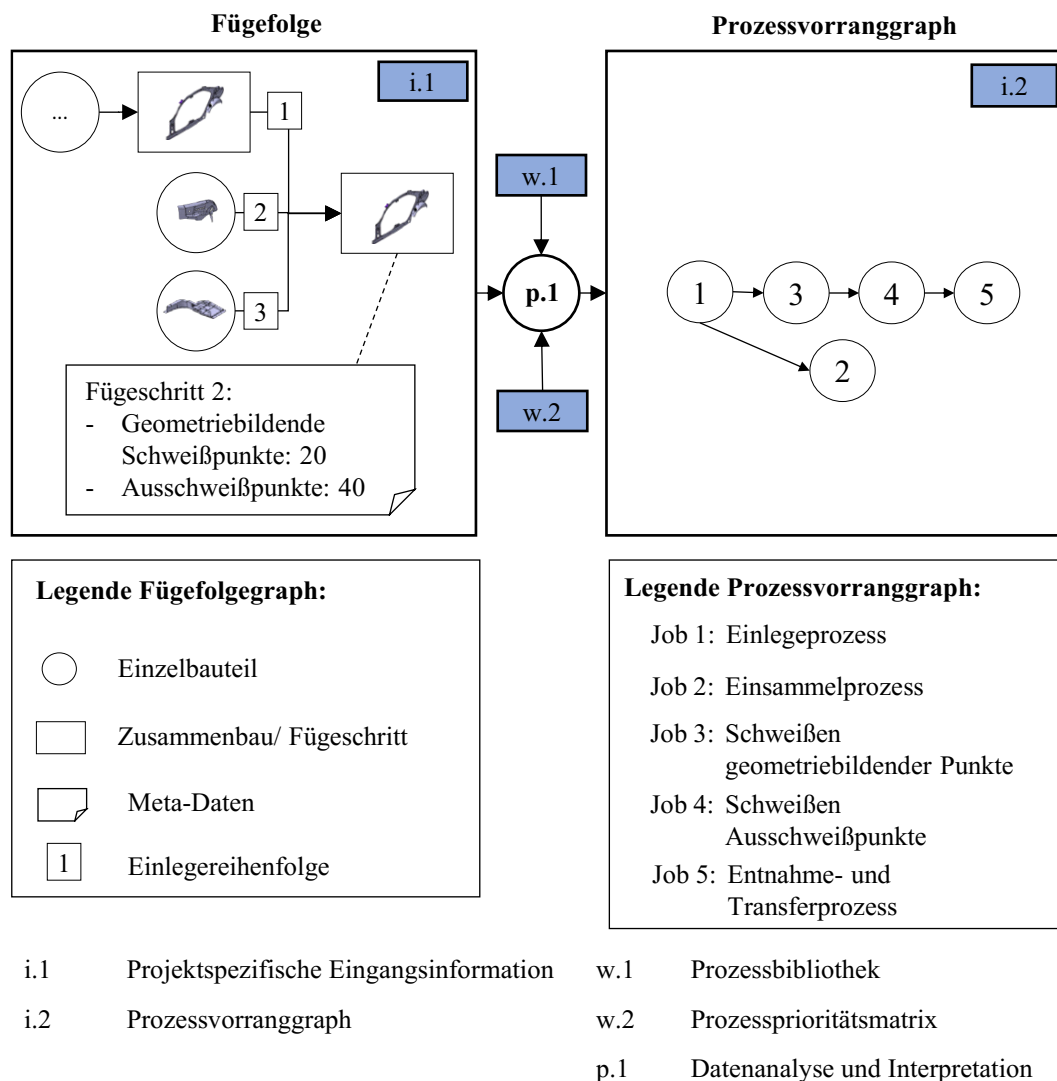


Abbildung 26: Fügefolge- und Produktanalyse⁴³

Das zweite Ergebnis des Problemlösungselements p.1 stellt die Analyse der Eingangsinformationen hinsichtlich der Gesamtsystembildung dar und führt als Ergebnis zu Informationsstand i.3, vgl. Abbildung 25. Für die Bildung des Gesamtsystems ist insbesondere die prozessuale und ressourcenseitige Bildung der Übergänge zwischen den Stationsverbünden, die

⁴³ Eigene Abbildung

den einzelnen Fügeschritten entstammen, von hoher Bedeutung. Somit wird nicht wie für Informationsstand i.2 primär der Inhalt der einzelnen Fügeschritte analysiert, sondern die Fügefolgestruktur an sich. Eine genaue Beschreibung des Problemlösungselements erfolgt in Abschnitt 5.4.1.

Das Problemlösungselement p.2 befasst sich mit der Prozess- und Stationsgestaltung für die in Problemlösungselement p.1 analysierten Fügeschritte und abgeleiteten Jobs. Damit bildet das Problemlösungselement p.2 das implizite und prozedurale Problemlösungswissen der Produktionsplaner ab und stellt den Kern der hier entwickelten Methode dar. Die Problemlösungselemente p.1 und p.3 dienen der deklarativen Informationsvorbereitung sowie der Ergebniszusammenführung des Problemlösungselements p.2. Der Gestaltungskontext wird dabei jeweils auf einzelne Fügeschritte gesetzt und erfolgt unter Berücksichtigung der gegebenen Taktzeit. In der folgenden Abbildung 27 ist der Ein- (i.2) und Ausgangsinformationszustand (i.4) des Problemlösungselements aufgezeigt. Ziel ist es, den kontextunabhängigen Informationsstand i.2, also die abgeleiteten Jobs, in einen kontextabhängigen Montageprozess und die dafür benötigte Ressourcenstruktur zu überführen. Kontextabhängig bedeutet hierbei, dass die Taktzeitprämisse berücksichtigt wird. Dieser Zielzustand entspricht dann dem Informationszustand i.4. In Abbildung 27 ist links der Prozessvorranggraph i.2 ersichtlich. Rechts ist ein detaillierter Montageprozess dargestellt, der aus den Eingangsinformationen abgeleitet wurde. Dieser bringt die einzelnen Fügeaufgaben in den Prämissen- und Ressourcenkontext. Somit wurde bei der Erstellung des Montageprozesses zum einen die Taktzeit berücksichtigt, zum anderen wurden dem Prozess notwendige Ressourcen abgeleitet. In diesem Beispiel beschränkt sich der Montageprozess auf genau einen Takt. Umfangreichere Fügeschritte, oder kurze Taktzeiten können zu mehreren aufeinanderfolgenden Takten führen. Die einzelnen Jobs 1-5 der linken Seite wurden somit auf unterschiedliche Prozessschritte aufgeteilt, die wiederum den Robotern der Station zugeordnet sind. Der gesamte Montageprozess für einen Fügenschritt ist in Bezug auf die gegebene Taktzeit τ_c abgetaktet. Diese Stationsgestaltung basiert auf dem Wissensselement w.4, welches eine Sammlung an möglichen Montagetemplates beinhaltet, und als Grundlage des Problemlösungselements dient. Die Montagetemplates werden im Abschnitt 5.2.4 eingeführt. Die Ressourcen der zugeordneten Montagetemplates, sind unterhalb des Prozesses visualisiert und entstammen der Betriebsmittelbibliothek, dem Wissensselement w.3. Die Betriebsmittelbibliothek entspricht einer Sammlung attributierter Montagebetriebsmittel und wird in Abschnitt 5.2.3 detailliert beschrieben. Eine detailliertere Beschreibung der zugrundeliegenden Logik des Problemlösungselements p.2 wird in Abschnitt 5.4.2 vorgenommen.

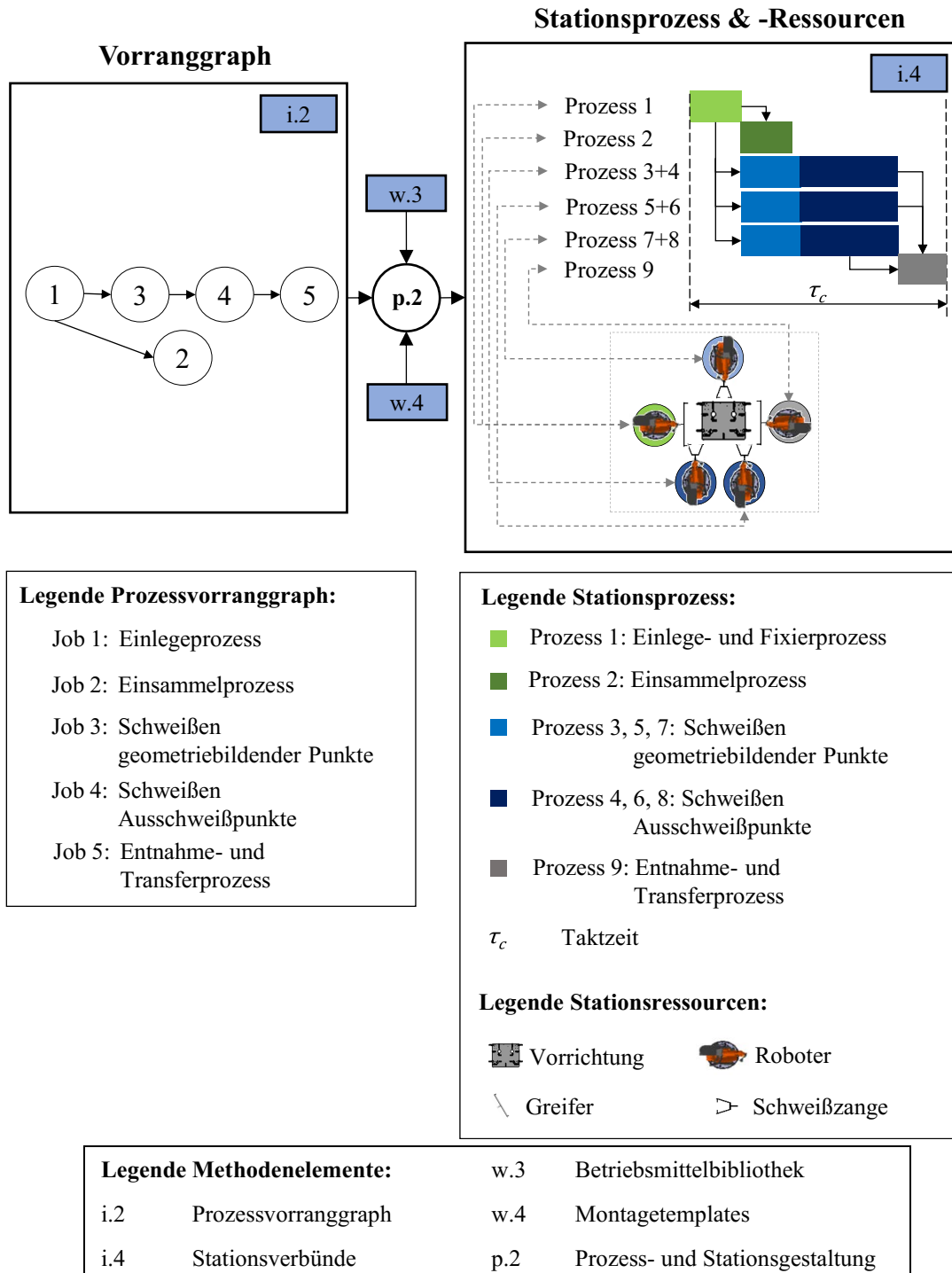
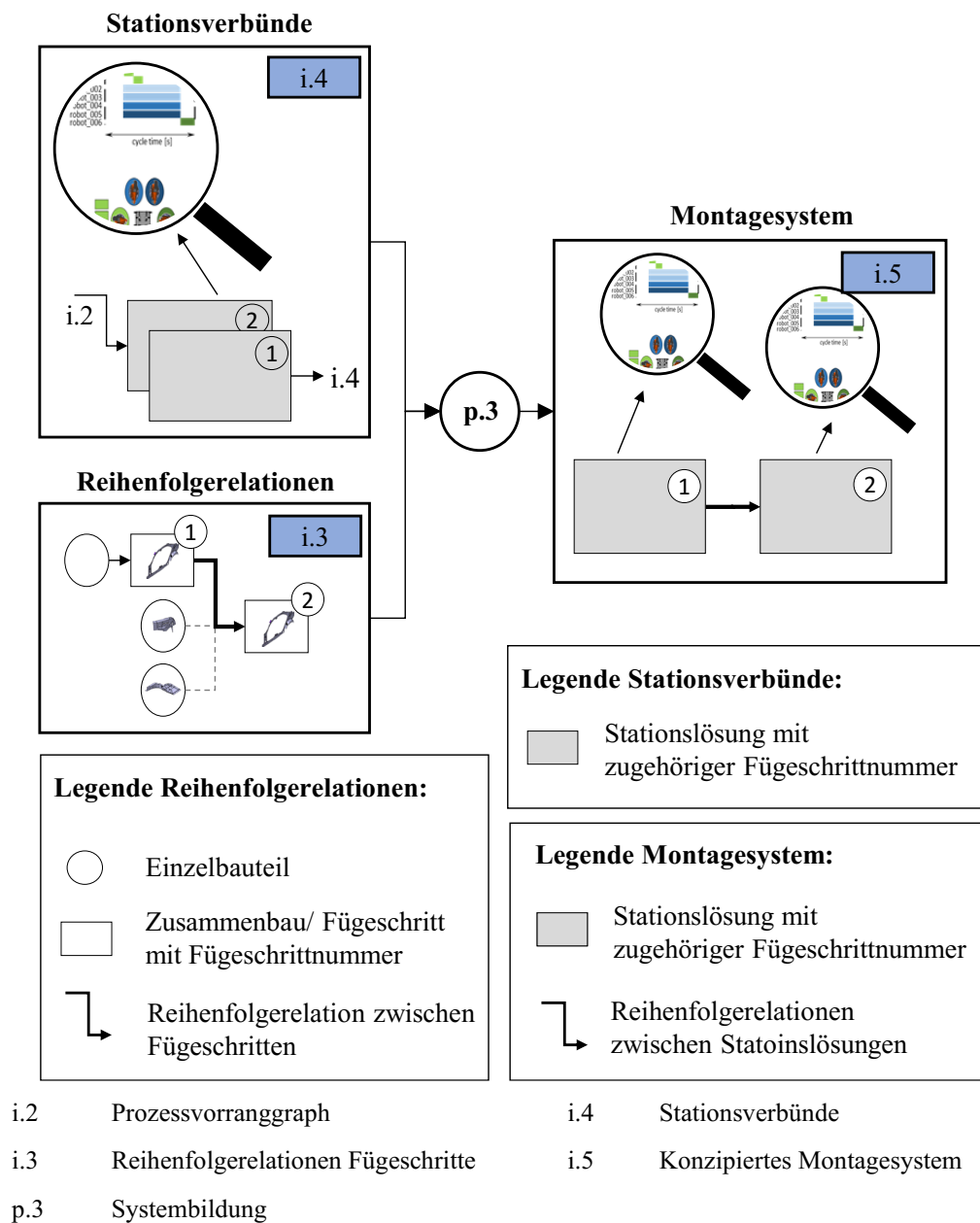


Abbildung 27: Stations- und Prozessgestaltung⁴⁴

Problemlösungselement p.3 dient der Zusammenführung der Informationsstände i.3 und i.4. Ziel ist es, die einzelnen in Problemlösungselement p.2 gestalteten Montagestationsverbünde für einen Fügeschritt (i.4) miteinander in Verbindung zu setzen. In Abbildung 28 wird dieser Vorgang visualisiert. Links zu sehen sind die einzelnen Montagestationslösungen, die als Rechteck dargestellt werden. Die Lupe soll die darin enthaltenen Ressourcen und Prozesse der Lösung andeuten. Die Nummer innerhalb der Stationslösungen zeigt den Bezug auf den

⁴⁴ Eigene Abbildung

jeweiligen Fügenschritt an. Die Fügeschritte innerhalb der Box „Reihenfolgerelationen“ sind wie in den vorherigen Abbildungen als Rechtecke visualisiert. Die Vorgänger-/Nachfolger Relationen zwischen den Fügeschritten wird durch den Informationszustand i.3 beschrieben und ist die Grundlage für das Erstellen des Gesamtmontagesystems. Auf der rechten Seite ist das Gesamtmontagesystem angedeutet, dass die einzelnen Stationslösungen zu einem Gesamtsystem zusammengeführt. Die Einzellösungen werden dabei in der gleichen Reihenfolge wie die Fügeschritte zusammengeführt. Die Lösung für Fügenschritt 2 folgt also der Lösung von Fügenschritt 1, da auch Fügenschritt 2 dem Fügenschritt 1 folgt. Zusätzlich zu den Montageprozessen und -Ressourcen innerhalb der Stationslösungen werden auch Prozesse und Ressourcen für die Übergänge zwischen den Stationsverbänden eingefügt.

Abbildung 28: Anlagengesamtstruktur⁴⁵⁴⁵ Eigene Abbildung

Darunter fällt nicht nur die Handhabung der Zusammenbauten zwischen den Stationsverbänden, sondern gleichzeitig das Vorsehen von Entkopplungselementen wie zum Beispiel Ablagen. Informationsstand i.5 stellt somit ein vollständig konzipiertes Montagesystem dar. Das Informationsmodell des Informationszustands i.5 wird ausführlich in Abschnitt 5.3.1 eingeführt.

Es wurde aufgezeigt, dass äquivalent zu wissensbasierten Verfahren der soeben eingeführte Methodenentwurf auf Wissensselementen und Problemlösungselementen basiert. Die Wissensselemente dienen der Repräsentation expliziten Wissens, die Problemlösungselemente dienen der Repräsentation des prozeduralen Planungswissens. Für die Generierung der Partialmodelle, welche als Informationszustände bezeichnet wurden, greifen die Problemlösungskomponenten auf die Wissensselemente zurück. Die hier entwickelte Methode verfolgt somit eindeutig den Grundzügen wissensbasierter Systeme.

5.2 Deklarative Wissensbasis

Die Wissensbasis stellt die Grundlage einer jeden wissensbasierten Methode dar. In der hier eingeführten Methode handelt es sich dabei um die Wissensselemente w.1 der Prozessbibliothek, w.2 der Prozessprioritätsmatrix, w.3 der Ressourcenbibliothek und w.4 den Montage-templates. Damit beschreiben die Wissensselemente das deklarative Wissen der Produktionsplanung und setzen sich von der Formalisierung des prozeduralen Wissens ab, welches in den Elementen p.1-p.3 abgebildet ist. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Bestandteile der Wissensbasis methodisch eingeführt. Eine vollumfängliche und inhaltliche Befüllung der Wissensbasis ist nicht Ziel in diesem methodischen Teil der wissenschaftlichen Arbeit.

5.2.1 Prozessbibliothek

Bei der Gestaltung von Montagestationen weist der Montageplaner Prozesse und Betriebsmittel aus Bibliotheken zu. In diesem Abschnitt wird auf die Bibliotheksprozesse eingegangen. Die Prozesse, die für das Fügen eines Fügeelements benötigt werden, hängen stark von den Prozesseigenschaften ab. Auch der Verfahrensweg zu den entsprechenden Fügeelementen nimmt diesbezüglich eine wichtige Rolle ein. Der Verfahrensweg hängt stark von der Reihenfolge ab, in welcher die einzelnen Fügeelemente eines Fügeschrittes abgehandelt werden. Die Reihenfolge erfolgt zum einen auf Basis der Geometrierelevanz, aber auch von der durch den Fügeprozess verursachten Verformung und der davon abhängigen Maßhaltigkeit des Zusammenbaus. Die optimale Reihenfolge, in welcher die einzelnen Geo- und Ausfügepunkte untereinander gesetzt werden, ist in den frühen Planungsphasen nicht bekannt, denn für die fundierte Festlegung der Reihenfolge bedarf es umfangreicher Simulationsmodelle. Das initiale Konzipieren des Montageprozesses erfolgt aus diesem Grund auf Basis von Standardprozesszeiten (Thomopoulos 2014, S. 16–20). Standardprozesszeiten basieren auf empirischen Daten. Die empirische Datenbasis ermöglicht es, Durchschnittswerte für Fügeelemente in Abhängigkeit von ihren Eigenschaften zu bilden. Exemplarisch werden in der folgenden Tabelle 11 Standardprozesse für das Verfahren Punktschweißen sowie für das Verfahren Kleben aufgezeigt. Auch die Unterscheidung nach den Eigenschaften des Fügeszenarios wird durch die Tabelle ersichtlich. So werden die einzelnen Fügeverfahren in der Tabelle mit verschiedenen

Attributen versehen wie zum Beispiel der Geometrierelevanz, der Materialpaarung und der Geometrie des Fügeelements. Dem Verfahren wird basierend auf den Attributwerten eine Standardprozesszeit zugewiesen.

Tabelle 11: Standardprozesse Verfahren Widerstandspunktschweißen

ID	Verfahren	Geometrierelevanz	Material	Geometrie	Standardprozesszeit
SG1	WPS	Geometriegebend	Stahl	punktförmig	2,5 s
SA1	WPS	Ausfügen	Stahl	punktförmig	3,5 s

Fügeverfahren wie zum Beispiel das Kleben, unterscheiden sich insbesondere aufgrund ihrer linienförmigen Geometrie der Kleberaupa von herkömmlichen punktförmigen Fügeverfahren. Die benötigte Fügezeit steht dann in direktem Zusammenhang zu der Länge der Klebestrecke wie die folgende Tabelle 12 zeigt. Aber auch Eigenschaften wie die Anzahl der Kleberkomponenten haben Einfluss auf die Fügegeschwindigkeit. Andere linienförmige Fügeverfahren wie z.B. das Laserschweißen hängen wiederum von anderen Parametern ab.

Tabelle 12: Standardprozesse Verfahren Kleben

ID	Verfahren	Geometrie	Komplexität	Anzahl Komponenten	Standardprozesszeit
KE1	Kleben	linienförmig	hoch	1	100 mm/s
KZ1	Kleben	linienförmig	hoch	2	150 mm/s

Gleichermaßen werden für die Bildung von Handhabungsprozessen Standardprozesszeiten herangezogen. Die folgende Tabelle 13 visualisiert exemplarisch Beispiele für die Standardprozesszeiten von Handhabungsprozessen. Handhabungsprozesse stellen die nicht-wertschöpfenden Prozesse der Montage dar und können in der Idealplanung in Einsammelprozesse, Einlegeprozesse, Fixierprozesse, Entnahmeprozesse und Umorientierungsprozesse unterteilt werden. Bei hochautomatisierten Anlagen werden Bauteilen aus Sonderladungsträgern oder aus Schubladen von Handhabungsrobotern entnommen. Der Einlegeprozess in eine Vorrichtung hängt von der Anzahl der Bauteile ab und umfasst das Heranfahren an eine Vorrichtung oder eine Ablage und der Positionierung zu Fixierelementen. Das Fixieren der Bauteile erfolgt mit Hilfe von Fixierstiften und Spannern, die an definierten Spannstellen am Bauteil schließen. Das Entnehmen der montierten Bauteile stellt im Normalfall den letzten Prozessschritt innerhalb einer Station dar.

Tabelle 13: Prozesse Verfahren Handhabung

ID	Verfahren	Standardprozesszeit
ES1	Einsammeln	10 s / Bauteil
EL1	Einlegen	10 s / Bauteil
EN1	Entnehmen	10 s / Zusammenbau

5.2.2 Prozessprioritätsmatrix

Die Prozessprioritätsmatrix bildet Prioritätsregeln für Prozesse innerhalb eines Fügeschrittes ab, die in der Prozessbibliothek dokumentiert sind. Die folgende Tabelle 14 stellt exemplarisch einzelne Prioritätsinformationen für Fügeprozesspaare dar. Befindet sich zum Beispiel ein Klebeprozess (KE1) und ein Widerstandpunktschweißprozess (SG1) in einem Fügeschritt, so sagt diese Matrix aus, dass der Klebeprozess vor dem Schweißprozess ausgeführt werden muss und somit Priorität hat. Die Prozessprioritätsmatrix wird wie folgt gelesen, auch wenn diese nur der Visualisierung der hier genutzten Logik dient. In Spalte 1 befindet sich an Position 6 das Verfahren Widerstandschweißen (SG1), welches der Verfahrensklasse Fügen untergeordnet ist. Um die Priorität gegenüber dem Klebeverfahren KE1 zu identifizieren, muss das entsprechende Feld in Zeile 1 mit dem Wert Kleben (KE1) betrachtet werden, siehe Position 9. Verfolgt man nun die Zeile 6 der Zelle des Schweißens (SG1) bis man auf die Spalte 9 der Klebezelle (KE1) trifft, so ergibt sich in der entsprechenden Zelle der Wert der Priorität und vice versa – in diesem Fall das Kleben. Das soeben genannte Beispiel ist in der Abbildung farblich hervorgehoben. Produktionstechnischer Hintergrund dieses Prozessvorrangs ist, dass das Auftragen des Klebers auf zwei Flansche, die bereits miteinander verschweißt sind, nicht mehr möglich ist.

Tabelle 14: Ausschnitt Prozessprioritätsmatrix

	EH	ES1	EL1	FG	SG1	CG1	FA	KE1	SA1	CA1	AH	EN1
EH												
ES1			0		0	0		ES1	0	0		0
EL1		0			EL1	EL1		EL1	EL1	EL1		EL1
FG												
SG1			EL1			0		KE1	SG1	SG1		SG1
CG1		0	EL1		0			KE1	CG1	CG1		CG1
FA												
KE1		0	EL1		KE1	KE1			KE1	KE1		KE1
SA1		0	EL1		SG1	CG1		KE1		0		SA1
CA1		0	EL1		SG1	CG1		KE1	0			CA1
AH												
EN1		0	EL1		SG1	SG1		KE1	SA1	SA1		

Somit kann unter zwei Relationen zwischen Fügeverfahren unterschieden werden: (i) es liegt ein eindeutiger Vorrang für eines der Verfahren vor, vgl. mit soeben vorgestelltem Beispiel; (ii) die Verfahren können beliebig sequenziell oder sogar parallel ausgeführt werden, in der Prioritätsmatrix mit dem Wert 0 abgebildet.

Für die Verdeutlichung von Fall (ii) kann eine Kombination aus Punktschweißverfahren und mechanischen Verfahren, also zum Beispiel das Schweißen und Clinchen innerhalb eines Taktes, oder auch eine Kombination mechanischer Verfahren herangezogen werden. Diese können je nach Anwendungsfall in beliebiger Reihenfolge oder auch parallel in einer Vorrichtung durchgeführt werden. Fall (iii) stellt einen Spezialfall für Verfahren dar, die besondere Vorrichtungen benötigen oder gesonderte Sicherheitsmaßnahmen wie z.B. das Laserschweißen, das in gesonderten Schutzkabinen erfolgen muss.

5.2.3 Betriebsmittelbibliothek

Die Betriebsmittelbibliothek entspricht einem Wissenselement, in welchem Ressourcen hinterlegt sind, die für das Gestalten des Montagesystems zur Verfügung stehen. Für die frühen Phasen der Montagesystementwicklung werden diese Betriebsmittel abstrahiert und aus diesem Grund als fiktive Ressourcen bezeichnet. Fiktive Betriebsmittel werden durch ihren Betriebsmitteltyp beschrieben. Im Karosseriebau hat der Betriebsmitteltyp Roboter als ausführende Instanz die größte Bedeutung. Die Ressourcenbibliothek besteht neben den Komponenten auch aus Ressourcentemplates. Ressourcentemplates sind eine Zusammenstellung einzelner Betriebsmittel und/ oder weiteren Templates. Die Eigenschaften der Ressourcentemplates entsprechen den aggregierten Eigenschaften der einzelnen dem Template zugehörigen Komponenten. Die Eigenschaften der Betriebsmittel hängen stark vom Betriebsmitteltyp ab. Ein Roboter trägt beispielsweise die Attribute wie die Traglast, Reichweite und Kosten, eine wertschöpfende Fähigkeit hat der Roboter ohne ein Werkzeug nicht. Für die hier beschriebene Methode, die eine initiale Konzipierung des Montagesystems vorsieht, wird in erster Linie auf Ressourcentemplates zurückgegriffen, die den in Abschnitt 2.1.3 eingeführten Betriebsmittelkategorien zugeordnet werden können. Für jede dieser Kategorien wird im Folgenden anhand eines Beispiels die Attributierungs- und Templategik eingeführt. Auch in diesem Abschnitt gilt es nicht die Betriebsmittelbibliothek inhaltlich zu befüllen, sondern den Aufbau der Bibliothek sowie die Beschreibung der Betriebsmittel einzuführen.

Zunächst wird die Bauteilbereitstellung vorgestellt. Die Bauteilbereitstellung umfasst alle Ressourcen, die Bauteile oder Zusammenbauten für das Montagesystem bereitstellen. In hochautomatisierten Montagesystemen entsprechen diese Sonderladungsträgern, aus welchen die Roboter direkt Einzelteile und/oder angelieferte Teilzusammenbauten entnehmen können. Ladungsträger zeichnen sich insbesondere durch ihr Kapazitätsattribut, welches in Tabelle 15 ersichtlich wird, aus. Neben dem Betriebsmitteltyp-spezifischen Attribut der Kapazität, tragen Betriebsmittel weitere globale Attribute wie z.B. die Fähigkeit, die Verfügbarkeit oder die Kosten. Diesbezüglich soll darauf hingewiesen werden, dass die hier angenommenen Werte nicht zwangsweise den Realwerten entsprechen, sondern der Erklärung dienen.

Tabelle 15: Attributierung Bauteilbereitstellung

ID	Bezeichnung	Strukturebene	Kapazität	Prozessfähigkeit	Verfügbarkeit [%]	Kosten [€]
C01	Sonderladungsträger	Komponente	20	Bauteilbereitstellung	99,9 %	500 €

Spann- und Fixiereinrichtungen umfassen u.a. Vorrichtungen und Ablagen. Vorrichtungen dienen der Fixierung der Bauteile während des Fügeprozesses und zeichnen sich insbesondere durch das Attribut Komplexität aus, vgl. Tabelle 16. Die Komplexität einer Vorrichtung steht in Abhängig zur Bauteilkomplexität und kategorisiert Vorrichtungen nach der Anzahl der Spanner und Fixierstiften. Eine hohe Komplexität wird durch eine hohe Anzahl dieser Fixierelementen verursacht. Ablagen sind hingegen einfache Tische, auf denen Bauteile abgelegt werden können. Sie dienen insbesondere der räumlichen und zeitlichen Entkopplung innerhalb eines Produktionssystems.

Tabelle 16: Attributierung Spann- und Fixiereinrichtungen

ID	Bezeichnung	Strukturebene	Größe	Komplexität	Prozessfähigkeit	Verfügbarkeit [%]	Kosten [€]
FX1	Vorrichtung	Einzelkomponente	groß	hoch	Fixieren	99,5%	20.000
TB1	Ablage	-	klein	-	Entkoppeln	99,9%	10.000

In hochautomatisierten Montagesystemen basieren sowohl Handhabungseinrichtungen als auch Fügeeinrichtungen auf Robotern. Die dazugehörigen Templates werden Robotermodule genannt. Abhängig von den Greifern und Werkzeugen, mit denen Robotermodule bestückt sind, ergibt sich die Fähigkeit des Robotermoduls. Die folgende Tabelle 17 zeigt exemplarisch ein Handhabungsmodul (R11), welches aus einem Roboter (R01), einem Podest (P01), einem Steuerungselement (S01) und einem Greifer (G01) besteht. Durch die Kombinationsattributwerte ist das Robotermodul befähigt, die Handhabungsprozesse der Prozessbibliothek auszuführen: ES1, EL1, EN1 (vgl. Tabelle 13).

Tabelle 17: Attributierung Handhabungseinrichtung

ID	Bezeichnung	Strukturebene	Traglast [kg]	Reichweite [m]	Prozessfähigkeit	Verfügbarkeit [%]	Kosten [€]
R11	Robotermodul Handhabung	Template	240	5	ES1, EL1, EN1	98,0	101.000
R01	Roboter	Einzelkomponente	240	5	Verfahren	99,2	80.000
P01	Podest	Einzelkomponente			-	99,9	1.000
S01	Robotersteuerung	Einzelkomponente			Steuern	99,5	10.000
G01	Greifer	Einzelkomponente			Greifen	99,1	10.000

Gleichermaßen verhalten sich Fügeerobotermodule, die der Klasse Fügeeinrichtungen zugeordnet sind. Fügemodule bestehen, wie die folgende Tabelle 18 zeigt, ebenfalls aus mehreren Komponenten. Exemplarisch wird in der Tabelle ein Fügeerobotermodul aufgezeigt. Somit

gruppiert dieses Modul einen Roboter (R01), eine Steuerungseinheit (S01), ein Podest (P01) und darüber hinaus ein Werkzeug (W01), in diesem Fall eine Schweißzange. Das Werkzeug trägt die Fähigkeit zu Fügen und ist somit elementarer Bestandteil dieses Moduls. Das Robotermodul ist somit fähig, die Standardprozesse SG1 und SA1 (vgl. Tabelle 11) durchzuführen.

Tabelle 18: Attributierung Fügeeinrichtung

ID	Bezeichnung	Traglast [kg]	Reichweite [m]	Prozessfä- higkeit	Struktur- ebene	Verfü- barkeit	Kosten [€]
R12	Robotermodul Schweißen	240	5	SG1, SA1	Template	98,0	101.000
R01	Roboter	240	5	Verfahren	Einzelkom- ponente	99,2	80.000
P02	Podest			-	Einzelkom- ponente	99,9	1.000
S03	Robotersteue- rung			Steuern	Einzelkom- ponente	99,5	10.000
W01	Schweißzange			Schwei- ßen	Einzelkom- ponente	99,1	10.000

5.2.4 Montagetemplates

Montagetemplates stellen einen elementaren Teil der Wissensbasis dar und haben das Ziel, Teile des prozeduralen Planungswissens in expliziter Form zu formalisieren. Montagetemplates dienen als Berechnungsgrundlage des Problemlösungselements Prozess- und Stationsgestaltung (p.2). Die detaillierte Beschreibung, wie die Montagetemplates als Wissensselemente in der Stations- und Prozessgestaltung angewendet werden, erfolgt in Abschnitt 5.4.2.

Montagetemplates stellen einzelne kontextunabhängige Szenarien der Montage dar und sind somit unabhängig von projektspezifischen Randbedingungen. Ein Montagetemplate beschreibt ein Montagestationskonstrukt, das aus einem Montageprozess und einer Ressourcenstruktur besteht. Die Kopplung zwischen Prozess und Ressource ist diesbezüglich ein grundlegendes Prinzip der Montagetemplates und bildet die Grundlage für eine spätere Umsetzung des PPR-Informationsmodells. In Abbildung 29 (rechts) wird ein Montageprozess sowie die dazugehörigen Ressourcen (links) visualisiert. Die Abbildung stellt eine Kombination verschiedener Montagetemplates dar, die neben weiteren Montagetemplates in diesem Abschnitt eingeführt werden. Die einzelnen Prozesse erhalten eine eindeutige ID (UID) und die entsprechende Referenz zu den Einträgen der Prozessbibliothek. Die Prozess UID ist in der Abbildung links von der Taktzeitgrenze zu sehen, die Standardprozess-ID innerhalb der Prozesse bzw. über den Bezug auf die Legende.

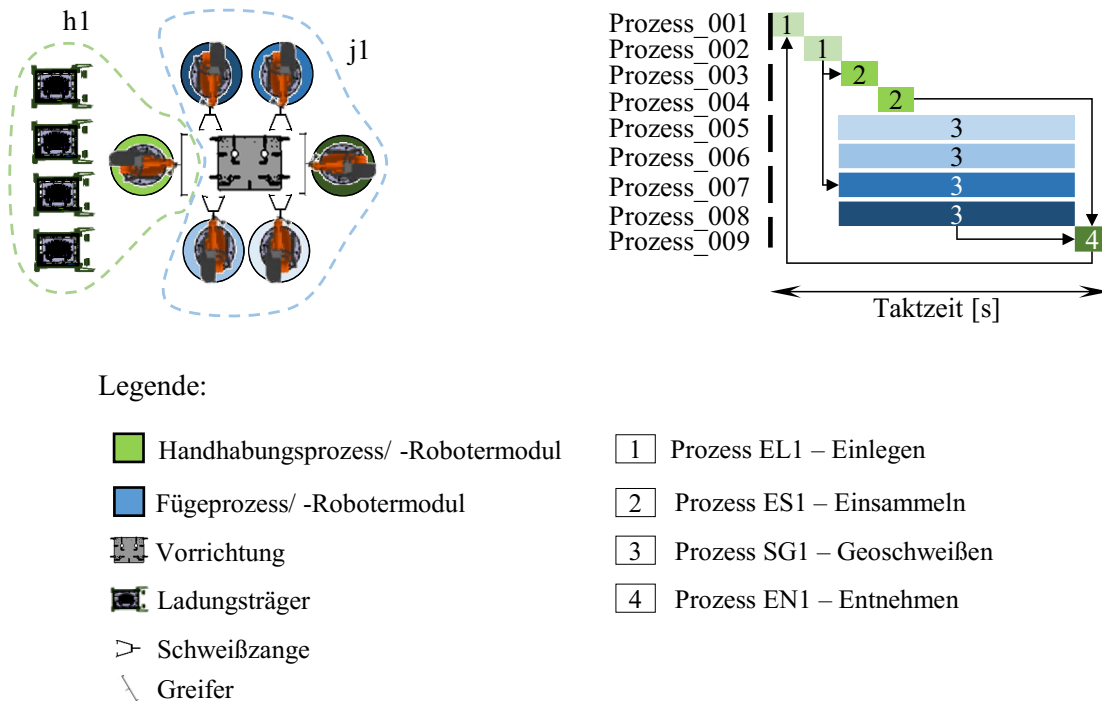


Abbildung 29: Exemplarisches Stationsszenario einer Rohbauanlage⁴⁶

Der linke hellgrüne Roboter führt die Handhabungsprozesse durch, welche die (in diesem Fall zwei) Bauteile in der Vorrichtung platziert (vgl. Prozess 1-2, grün und Standardprozess-ID EL1). Folgend sammelt dieser Handhabungsroboter die Bauteile für den Folgetakt aus Ladungsträgern während des Fügeprozesses ein (vgl. Prozessbaustein 3-4, grün und Standardprozess-ID ES1). Diese Konstellation aus Handhabungsprozessen und Ressourcen wird im Folgenden als Handhabungstemplate h1 bezeichnet. Wichtig ist dabei zu beachten, dass Montagetemplates lediglich ein Konstrukt darstellen, das die Prozess- und Ressourcenstrukturen sowie deren Zusammenhänge beschreibt. Die Gestaltung der Montagetemplates hinsichtlich der Prozesslängen, Häufigkeiten für den Einsatz in Montageanlagen erfolgt jedoch durch Problemlösungskomponente p.2.

Die blauen Roboter repräsentieren Fügeroboter (vgl. Prozess 5-8, blau und Standardprozess-ID SG1), die für die Ausführung des Fügeprozesses zuständig sind und um die Vorrichtung positioniert sind. Das vorrichtungsbasierte Fügen wird in dieser Methode als Montagetemplate j1 bezeichnet und wird in Abbildung 31 (a) für die bessere Verständlichkeit visualisiert. Abbildung 29 zeigt die Anwendung des vorrichtungsbasierten Fügens in einer Station auf.

Alle Prozesse innerhalb der Station sind durch die Taktzeit limitiert. Innerhalb der Prozessmodelle werden für die Montagetemplates Bedingungen und Relationen festgelegt. Grundsätzlich ist diesbezüglich die Limitation, dass eine Ressource zu jedem Zeitpunkt nur einen Prozess ausführen kann. So wird in diesem Montageprozess durch eine Relation sichergestellt, dass der Einlegevorgang (vgl. Prozess 1-2, grün, Prozess-ID EL1) abgeschlossen ist, bevor neue Bauteile für den Folgetakt durch einen Greifer eingesammelt werden (vgl. Prozess 3-4, grün, Prozess-ID: EL1). Diese Vorgänger- und Nachfolgerrelationen werden in den folgenden

⁴⁶ Eigene Abbildung

Abbildungen durch die Pfeile zwischen den einzelnen Prozessschritten dargestellt. Weiterhin gilt, dass der Fügeprozess (vgl. Prozess 5-8, blau) erst dann starten kann, sobald die Bauteile in die Vorrichtung eingelegt wurden. Auch hier werden diese durch einen Pfeil gekennzeichnet. Am Ende des Taktes kann der Entnahmeprozess (vgl. Prozess 9, dunkelgrün, Prozess-ID EN1) erst dann starten, sobald der Fügeprozess beendet ist. Zuletzt wird durch eine Relation sichergestellt, dass der neue Takt mit dem Einlegevorgang erst dann starten kann, wenn der Entnahmevorgang abgeschlossen ist.

Das gezeigte Template in Abbildung 29 setzt sich wie erwähnt aus den Montagetemplates h1 und j1 zusammen. Diese können verschiedene Ausprägungen annehmen. Die Ausprägungen differenzieren sich dabei durch die Anzahl der beteiligten Robotermodule als prozessausführende Instanzen und bestimmen die Kapazitäten der Montagestationen wie Abbildung 29 zeigt. Der Wertebereich der Ausprägungen u eines Montagetemplates a können Tabelle 19 entnommen werden. Für das soeben eingeführte Montagetemplate j1 ist ein Wertebereich $0 \dots 4$ festgelegt. Der Wert $u_a = 0$ bedeutet dabei, dass das Montagetemplate nicht in der betrachteten Station Verwendung finden soll. Der Wert $u_a = 4$ hingegen führt zum Einsatz von vier Füge Robotern, wie in Abbildung 30 ersichtlich ist.

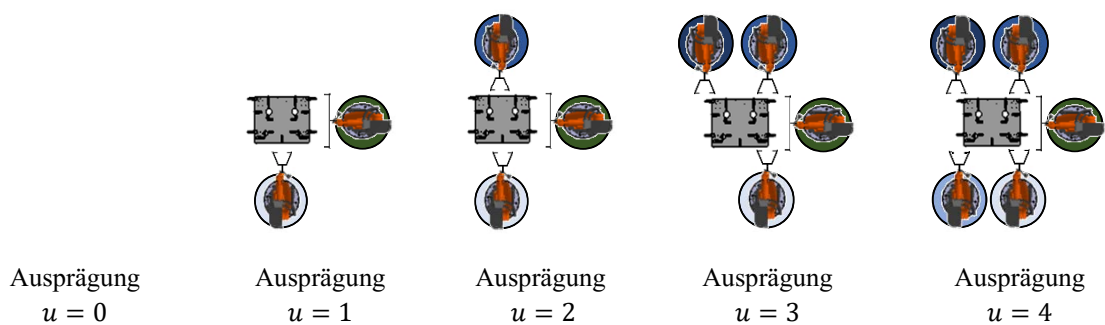


Abbildung 30: Ausprägung Montagetemplate j1⁴⁷

Neben dem Fügetemplate j1, dem vorrichtungsbasierten Fügen, stellt das Fügen an einem stationären Werkzeug eine weitere Möglichkeit dar, welche in Abbildung 31 (b) visualisiert wird. Dabei führt ein Handlingroboter das zu fügenden Bauteile im Greifer für jedes Fügeelement in die Positionen, in der diese in dem stationären Werkzeug gesetzt werden können (Michels et al. 2018). Stationäres Fügen wird in dieser wissenschaftlichen Arbeit durch drei Montagetemplate behandelt. Jedoch muss festgehalten werden, dass stationäres Fügen nicht für geometriegebende Fügeelemente verwendet werden darf, da beim Fügen von Geometriepunkten Maßhaltigkeitsaspekte im Vordergrund stehen, welche aufgrund von niedrigeren Prozesssicherheiten beim Fügen im Greifer nur schwer einzuhalten sind.

⁴⁷ Eigene Abbildung

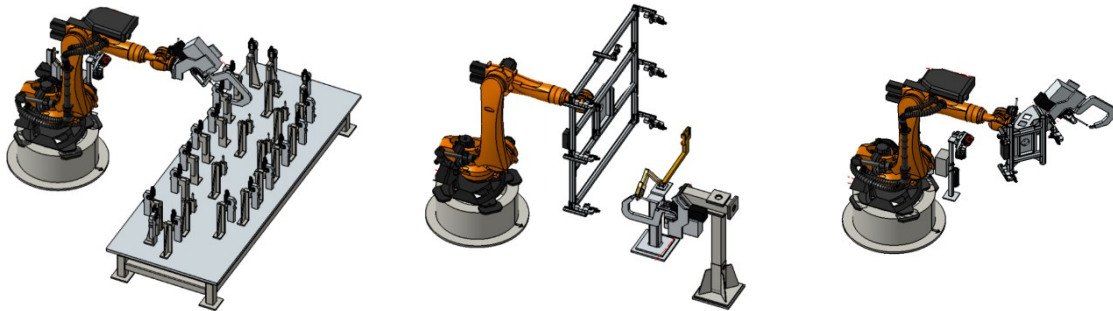


Abbildung 31: (a) Fügen in Vorrichtung, (b) stationäres Fügen, (c) Doppelequipment⁴⁸

Das erste stationäre Fügetemplate sj1 beschreibt das Konstrukt eines Taktes, in welchem rein stationär gefügt wird. Das Template ist durch die folgende Abbildung 32 beschrieben. Für das stationäre Fügen wird eine Ablage benötigt, um sicherzustellen, dass sich die Bauteile im Greifer in der richtigen Lage für den Fügevorgang befinden. Wird das Bauteil direkt vom Handhabungsroboter der Vorstation in den Greifer der hier beschriebenen Station übergeben, so ändert sich die Bauteillage um 180 Grad. Diesem Umstand kann durch die Ablage entgegengewirkt werden, indem die Bauteile in dieser abgelegt und vom Handhabungsroboter wieder entnommen werden (Prozess 1, grün, Prozess-ID ES1). Daraufhin führt Prozess 2 (grün, Prozess-ID SA1) den Zusammenbau an das stationäre Werkzeug, welches den Fügeprozess durchführt. Prozessschritt 3 (grün, Prozess-ID EN1) übergibt den Zusammenbau an die Folgestation.

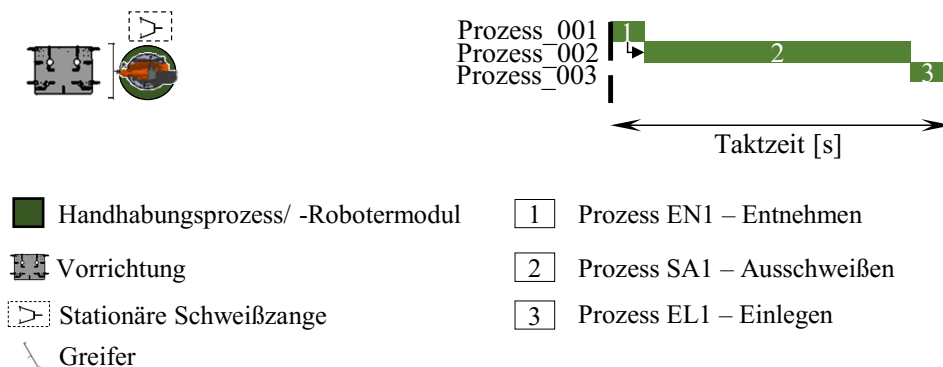


Abbildung 32: Stationäres Fügen sj1⁴⁹

Ein im Automobilbau häufig vorzufindendes stationäres Fügetemplate wird im Folgenden als sj2 bezeichnet und durch den zweiten Takt in Abbildung 35 dargestellt. Stationäres Fügen wird häufig wie in diesem Template durch den Handhabungsroboter durchgeführt, der für den Entnahmeprozess beim vorrichtungsbasierten Fügen zuständig ist. Dieser unterliegt im Normalfall einer sehr geringen Auslastung, denn er führt nur Prozessschritt neun (grün, Prozess-ID EN1) durch wie Abbildung 29 zeigt. Aus diesem Grund bietet es sich an, diesen Roboter im Folgetakt für das Fügen an einer stationären Zange weiterzuverwenden, vergleiche Abbildung 35. Dadurch kann die Auslastung von Handhabungsrobotern dieser Art deutlich erhöht werden.

⁴⁸ Eigene Abbildung

⁴⁹ Eigene Abbildung

Das letzte in diesem Abschnitt betrachtete stationäre Fügetemplate ist das Template sj3. Das Template bezieht sich auf Klebeprozesse, welche im Karosseriebau eine Sonderrolle einnehmen, denn sie können und müssen in vielen Fällen schon vor den geometrieebenenenden Elementen durchgeführt werden. Das Fügetemplate sj3 wird durch die folgende Abbildung 33 beschrieben. In dieser ist in der Ressourcensicht links oben eine stationäre Klebedüse ersichtlich, welche durch einen Handhabungsroboter angefahren wird. Prozessschritt 1 (grün, Prozess-ID ES1) beschreibt den Entnahmeprozess aus den Ladungsträgern. Der folgende Prozessschritt 2 (grün, Prozess-ID KE1) stellt den Klebeprozess an der stationären Klebedüse dar, woraufhin Prozessschritt 3 (grün, Prozess-ID EL1) das Einlegen in die folgende Vorrichtung darstellt. Somit ist der Klebeprozess als Takt und Station 1 dem Folgetakt vorgelagert. Insbesondere aufgrund geometrischer und zeitlicher Restriktionen wird in diesem Montagetemplate der reine Handhabungsprozess (Prozess 4-7, grün) von dem Handhabungs- und Klebeprozess (Prozess 1-3, grün) getrennt und von zwei verschiedenen Robotern durchgeführt.

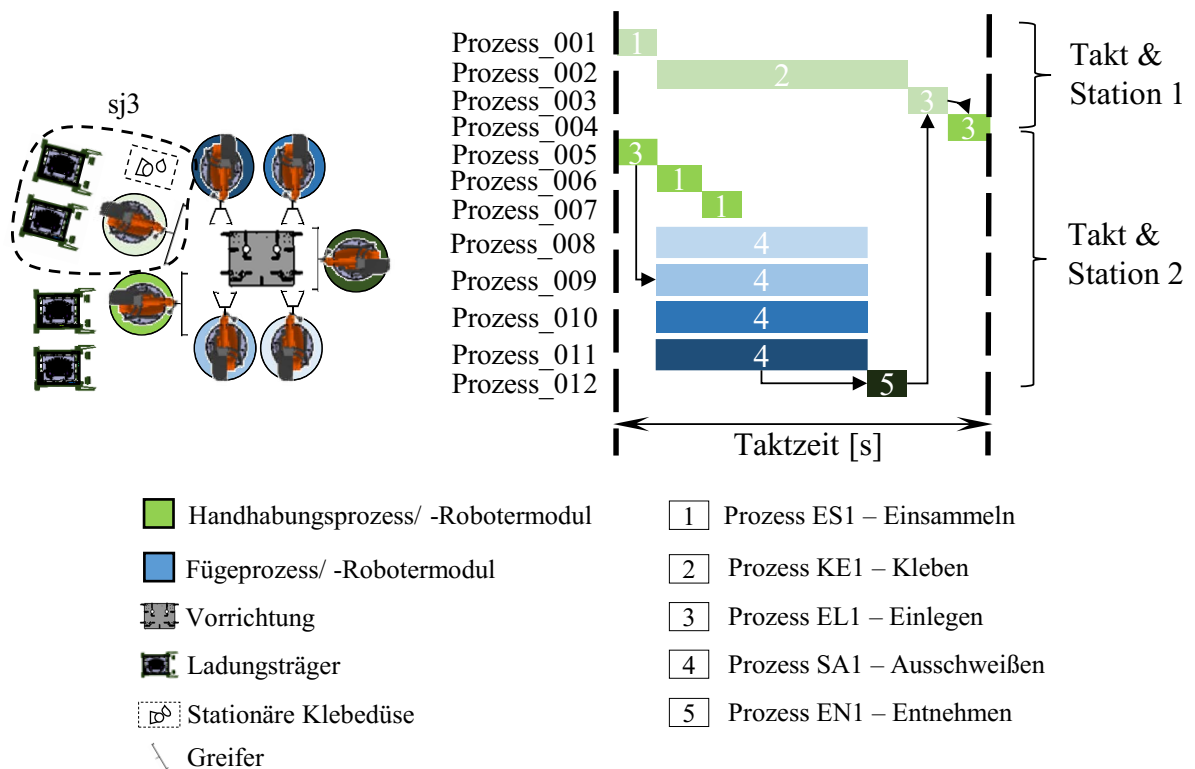


Abbildung 33: Stationärer Klebeprozess sj3⁵⁰

In gleicher Weise existieren neben Handlingtemplate h1 weitere Handlingtemplates. Aufgrund der hohen Zeitanteile, die für die Handhabung eines Taktes investiert werden, bietet Template h2 eine sinnvolle Alternative. In Template h2, welches in der folgenden Abbildung 34 aufgezeigt wird, werden zunächst alle Bauteile in einem ersten Takt eingesammelt (Prozess 1-2, grün, Prozess-ID ES1) und temporär auf einer Ablage abgelegt (Prozess 3-4, grün, Prozess-ID EL1). Bevor der Folgetakt beginnt, werden die Bauteile als ein Konglomerat gleichzeitig von der Ablage entnommen (Prozess 5, grün, Prozess-ID EN1) und in die folgende Station für den Fügeprozess transferiert, welcher in diesem Beispiel Fügetemplate j1

⁵⁰ Eigene Abbildung

entspricht. Prozess 6 legt das Bauteil-Konglomerat in die Vorrichtung der Station 2. Durch dieses Template können die Fügeprozesse in Station 2 (Prozess 7-10, blau, Standardprozess-ID SG1) im Vergleich zu Beispiel in Abbildung 29 entsprechend länger durchgeführt werden. Jedoch nimmt Handlingtemplate h2 mehr Ressourcen in Anspruch.

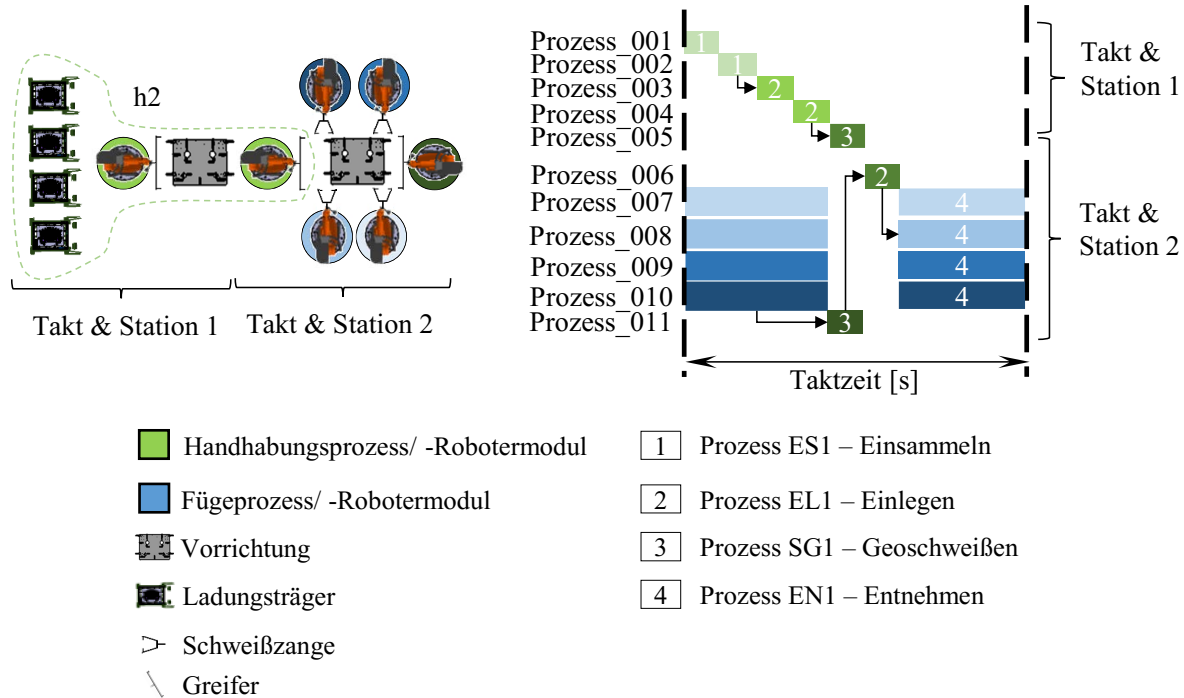


Abbildung 34: Erweitertes zweistufiges Handhabungsszenario h2⁵¹

In Abbildung 35 wird ein weiteres Template aufgezeigt, welches im Folgenden als hj1 bezeichnet wird. In diesem Template wird ein Roboter mit einem Greifer und Werkzeug gleichzeitig ausgestattet, einem sogenannten Doppelequipment. Dieses Template ermöglicht ein Handhaben und Fügen in sequenzieller Prozessreihenfolge. Diese Art von Equipment wird im Normalfall den Handhabungsrobotern zugeordnet, die für den Beladevorgang der Station zuständig sind. Durch den Einsatz von Doppelequipment wird den hohen ungenutzten Zeitan teilen der Handhabungsroboter entgegengewirkt. Diesbezüglich arbeitet das Handhabungs-Robotermodul, vgl. Abbildung 34, alle notwendigen Einlegeprozesse ab (Prozess 1-2, grün, Standardprozess-ID EL1) und unterstützt folgend die Fügeoperationen (Prozess 3, grün), danach sammelt er die Bauteile für den Folgetakt ein (Prozess 4-5, grün, Standardprozess-ID ES1).

⁵¹ Eigene Abbildung

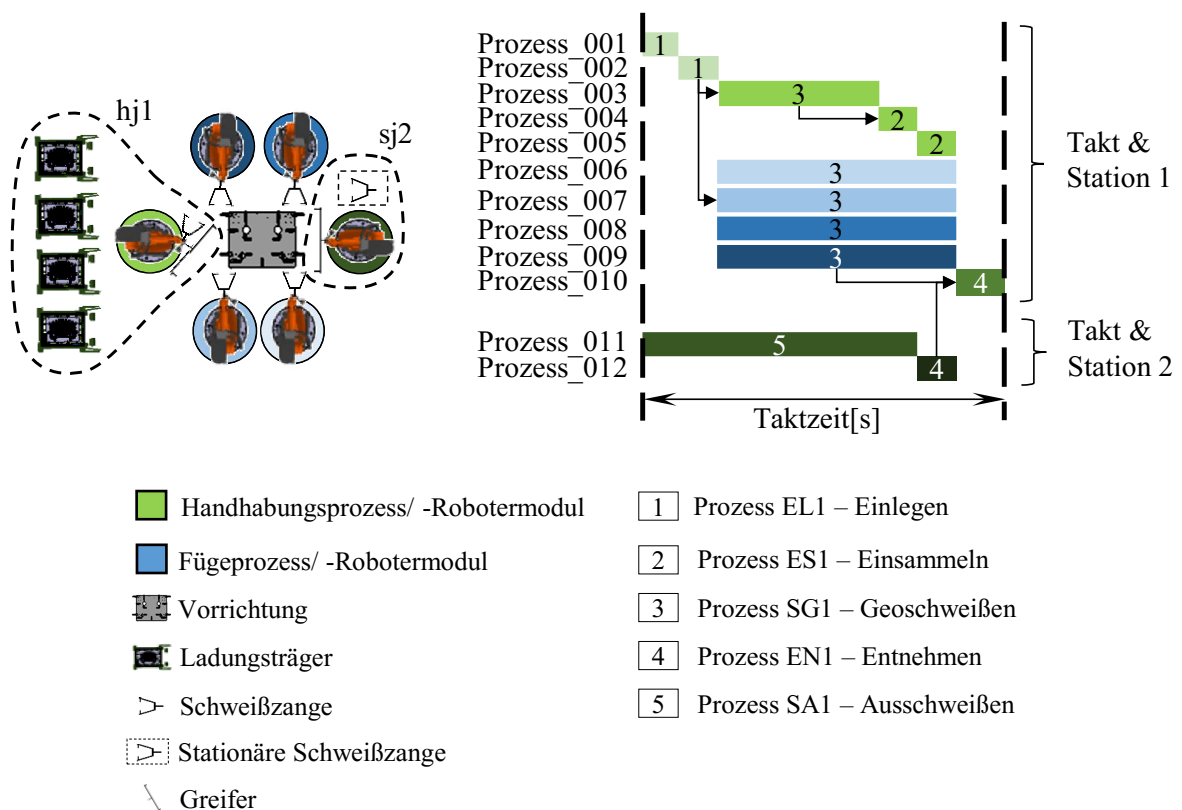


Abbildung 35: Stationäres Fügen und Doppelwerkzeuge⁵²

Die Konstellation der in Abbildung 35 aufgezeigten Templates h1, j1, sj2 findet häufig in industriellen Montageanlagen Anwendung. Durch die geschickte Kombination von Handhabungstemplate, stationären als auch vorrichtungsbasierten Fügeprozessen, können hohe Auslastungen sichergestellt werden.

Die hier präsentierten Planungstemplate werden in der folgenden Tabelle 19 zusammenfassend aufgelistet. Ziel des Konzepts der Montagetemplates ist die Möglichkeit implizites Planungswissen zu formalisieren und die Möglichkeit, die Wissensbasis fortlaufend flexibel weiterzuentwickeln, ohne dass andere Teile der Methode angepasst werden müssen. Ein Anspruch auf Vollständigkeit besteht aus diesem Grund in diesem Teil der Wissensbasis nicht. In Tabelle 19 sind die Templates mit ihren dokumentierten Eigenschaften dokumentiert. Die vier Eigenschaften „Kombinierbarkeit in Station“, „Kombinierbarkeit in Klasse“, „Ausprägung“ und „Hauptprozess“ sind eine essenzielle Grundlage für die Verwendung der Templates in den Problemlösungskomponenten. Die „Kombinierbarkeit in Station“ gibt dabei an, ob dieses Template mit anderen Templates in der gleichen Station kombiniert werden kann. Gleiches gilt für die „Kombinierbarkeit in Klasse“. Diese Eigenschaft gibt an, ob das Template mit anderen Templates der gleichen Klasse in der gleichen Station kombiniert werden kann. Die „Ausprägung“ steuert die oben beschriebene Ausprägung der Templates und damit die Anzahl verwendeter Prozesse und Ressourcen, insbesondere bei dem vorrichtungsbasierten

⁵² Eigene Abbildung

Fügen. Zuletzt steuert die Eigenschaft „Hauptprozess“ welche Prozesse und entsprechende Ressourcen in dem Template vorgesehen werden können.

Tabelle 19: Übersicht Montagetemplates

ID	Beschreibung	Kombinierbarkeit in Station	Kombinierbarkeit in Klasse	Ausprägung	Hauptprozess
Klasse Eingangshandling					
h1	Klassisches Handhabungstemplate	x		0,1	-
hj1	Handhabungstemplate mit Doppelequipment	x		0,1	SG1, CG1, ...
h2	Handhabung über Einsammelstation	x		0,1	-
Klasse Fügen					
j1	Vorrichtungsbasiertes Fügen	x	x	0 ... l_w	SG1, SA1, CG1, CA1,
sj1	Stationäres Fügen			0,1	SA1, CA1
sj2	Stationäres Fügen nach Entnahmevorgang			0,1	SA1, CA1
sj3	Stationäres Kleben			0,1	KE1
Klasse Ausgangshandling					
h3	Klassisches Ausgangshandling	x	x	0,1	-

5.3 Modellbildung

Ein Modell wird in der Realwissenschaft als ein (vereinfachtes) Abbild der Realität definiert (Schneeweiß 1989, S. 82; Boysen 2005, S. 27). Reale Planungsprobleme, wie die in Kapitel 2 dargelegte Problemstellung, weisen zumeist eine sehr hohe Komplexität auf. Um dieser zu begegnen, wird sich im Folgenden an der Vorgehensweise von SCHNEEWEIß und BLESSING orientiert (Schneeweiß 1989; Blessing und Chakrabarti 2009). Die Vorgehensweise dieses Abschnitts, welche in der folgenden Abbildung 36 abgebildet wird, stützt sich zunächst auf der Bildung eines Realmodells. Realmodelle beabsichtigen die bestmögliche Abbildung der Realität und gehören der Kategorie der beschreibenden Modelle an. Komplexe reale Probleme können meist nur in verbaler Form beschrieben werden und aus diesem Grund werden Realmodelle als qualitative Beschreibungsmodelle bezeichnet (Schneeweiß 1989, S. 83–85). Bereits in Kapitel 2 wurde durch die Darlegung der Problemstellung das Realmodell gebildet. Neben der verbalen Beschreibung des Realproblems in Kapitel 2 erfolgt in diesem Abschnitt eine mathematische Modellbildung der Ausgangs- und Zielzustände, den sogenannten Informationsmodellen⁵³, die sich auf die Informationselemente des Methodenentwurfs beziehen. Folgend wird das Realmodell durch Konkretisierung und Relaxation in ein mathematisch beschreibbares Formalmodell, also ein quantitatives Modell überführt (Schneeweiß 1989, S. 85). Das konkrete Formalmodell wird in Abschnitt 5.1.3 detailliert beschrieben und entspricht einem mathematischen Optimierungsmodell. Anspruch dieses Optimierungsmodells ist es, die definierten Anforderungen (vgl. Abschnitt 2.4.5) zu berücksichtigen und die elementaren Aspekte des Realproblems zu repräsentieren (Müller 2018, S. 69–70). Dieses Formalmodell gilt es daraufhin durch die Problemlösungselemente zu lösen. Für die Lösung des Formalmodells können diverse existierende Verfahren herangezogen oder neue Verfahren entwickelt werden. Die konkrete Anwendung der Verfahren für den Anwendungsfall des Karosseriebaus wird mit Hilfe von Algorithmen beschrieben. Die Lösungsverfahren werden in Abschnitt 5.4.1-5.4.3 eingeführt und die konkreten Lösungsalgorithmen im Rahmen der Systemgestaltung in Abschnitt 5.4.3 vorgestellt.

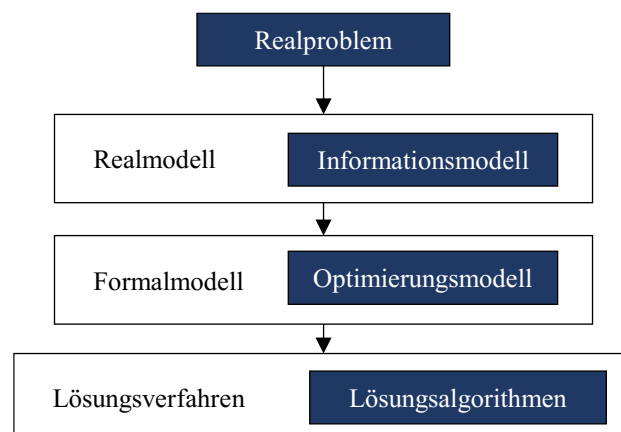


Abbildung 36: Vorgehen der Modellbildung und Verfahrensentwicklung⁵⁴

⁵³ Die Einführung der Informationsmodelle dient der später folgenden mathematischen Formulierung der Problemstellung. Alle Inhalte wurden bereits in Kapitel 2 thematisiert, hier folgt die mathematische Beschreibung

⁵⁴ Eigene Abbildung

5.3.1 Informationsmodelle

Um der Komplexität der Modellbildung zu begegnen, werden in diesem Abschnitt Informationsmodelle erstellt: das Produktmodell, das Fügefolgemodell, das Ressourcenmodell und das Prozessmodell⁵⁵. Zunächst werden diesbezüglich die Modelle eingeführt, die die Eingangsinformationen (vgl. i.1 – projektspezifische Eingangsinformationen) darstellen: das Produktmodell und das Fügefolgemodell. Darauffolgend werden die Modelle eingeführt, die den Zielzustand darstellen: das Prozess- und das Ressourcenmodell (vgl. i.5 – konzipiertes Montagesystem).

5.3.1.1 Produktmodell

Das Produkt wird im Folgenden als mathematisches Graphenmodell eingeführt. Da die hier entwickelte Methode hauptsächlich auf dem Fügefolgemodell basiert und sich die Struktur zwischen Produkt und Fügefolge sehr ähnelt, wird der Fokus auf die detaillierte Beschreibung des Fügefolgemodells gelegt, welches im folgenden Abschnitt eingeführt wird. Der Produktgraph besitzt keine Schlingen und besteht aus gerichteten Kanten. Darüber hinaus zeigen alle Kanten in Richtung eines Knotens, dem Wurzelknoten. Der Graph kann folgend als gerichteter Wurzelbaum beschrieben werden, einem sogenannten in-tree. (Brandtstädt 1994, 20 ff.; Steger 2007, S. 98) Abbildung 37 zeigt exemplarisch einen Produktgraphen auf. Das Produktmodell besteht aus drei verschiedenen Knotentypen: den Zusammenbauten, den Einzelteilen und dem Wurzelknoten. Die Knoten werden durch gerichtete Kanten verbunden. Einzelbauteile werden in der folgenden Abbildung 37 durch Kreise visualisiert. Das Rechteck mit abgerundeten Ecken stellt den Wurzelknoten des Graphens dar und beschreibt das montierte Produkt.

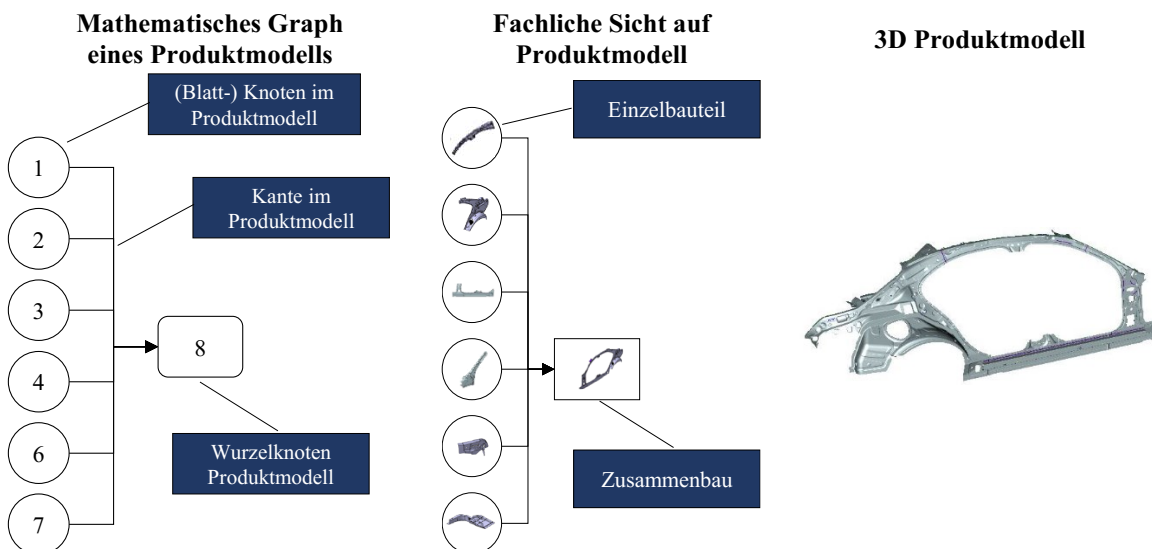


Abbildung 37: Produktgraph⁵⁶

⁵⁵ wurden bereits in Kapitel 2 thematisiert und werden nun als mathematische Graphenmodelle beschrieben

⁵⁶ Eigene Abbildung

5.3.1.2 Fügefolgemodell

Auch die Fügefolge wird im Folgenden als mathematisches Graphenmodell eingeführt. Die folgende Tabelle 23 listet die verwendeten Notationen auf.

Tabelle 20: Notationen im Fügefolgemodell

b	Kante im Fügefolgemodell	B	Menge aller Kanten im Fügefolgemodell
d	Knoten im Fügefolgemodell	D	Menge aller Knoten im Fügefolgemodell
e	Direkter Nachfolger von Knoten d	E	Menge aller Fügeelemente
f	Fügeschritt	F	Menge aller Fügeschritte
		H	Graph des Fügefolgemodells
l	Blattknoten (Einzelbauteil)	L	Menge aller Blattknoten (Einzelbauteile)
v	Wurzelknoten des Fügefolgegraph		

Auch das Fügefolgemodell stellt einen gerichteten Wurzelbaum dar. Jeder Fügegraph besteht aus drei verschiedenen Arten von Knotentypen: den Einzelbauteilen, den Fügeschritten und dem Wurzelknoten. Alle drei Knotenarten werden durch gerichtete Kanten verbunden. Jedem Fügeschritt ist eine Menge an Fügeelementen zugeordnet. In der folgenden Abbildung 38 ist die Fügefolge aus Abbildung 15 (b) als Graphenmodell abgebildet. Ein Fügefolgemodell wird durch das Tupel (H, v) beschrieben. Dabei ist $H = (D, B, E)$ der gerichtete Wurzelbaum mit v dem Wurzelknoten. (Steger 2007, S. 97–100; Scholl 1999, S. 23) Der Wurzelknoten zeichnet sich dadurch aus, dass er keine Nachfolger besitzt und das fertige Produkt darstellt. Die Knotenmenge D ist dabei die Anzahl aller Knoten und stellt die einzelnen Fügeschritte sowie die Einzelteile dar. Diesbezüglich werden die gerichteten Kanten, also die direkte Verbindung zweier Knoten, durch die Menge $B = \{(d, e) | d \in D, e \in N_d\}$ beschrieben. Somit ist e der direkte und einzige Nachfolger von d und $N_d = e$. Die Menge aller Vorgänger von d hingegen werden als V_d bezeichnet. Für den Wurzelknoten v bedeutet das, dass $N_v = \emptyset$. Für die bessere Nachvollziehbarkeit wird davon ausgegangen, dass alle Informationsmodelle dieses Kapitels topologisch sortiert sind. Somit gilt $d < e$. Alle Knoten d für die $V_d = \emptyset$ gilt, werden folgend als Blattknoten $L = \{d | d \in D, d \neq v, d \notin F\}$ bezeichnet und entsprechen Einzelbauteilen in der Fügefolge. Die Menge aller Knoten d , die hingegen Vorgänger besitzen, werden als Fügeschritte $f = \{f | V_f \neq \emptyset\}$ bezeichnet. In der folgenden Abbildung 38 wird exemplarisch die Fügefolge aus Abbildung 15 als Graph dargestellt, für die gilt: Die Menge $D = \{1, 2, \dots, 9\}$; der Wurzelknoten $v = 9$ und somit $N(9) = \emptyset$; Fügeschritte $F = \{5, 9\}$ und Einzelbauteile $L = \{1, 2, 3, 4, 6, 7, 8\}$. Jedem Fügeschritt f sind über das Produktmodell eine Anzahl an Fügeelementen E_f zugewiesen. Fügeelemente unterscheiden sich nach Ihrer Art und werden nach Jobs j unterteilt. Daraus folgt die Anzahl an Fügeelementen für einen Jobs E_{fj} .

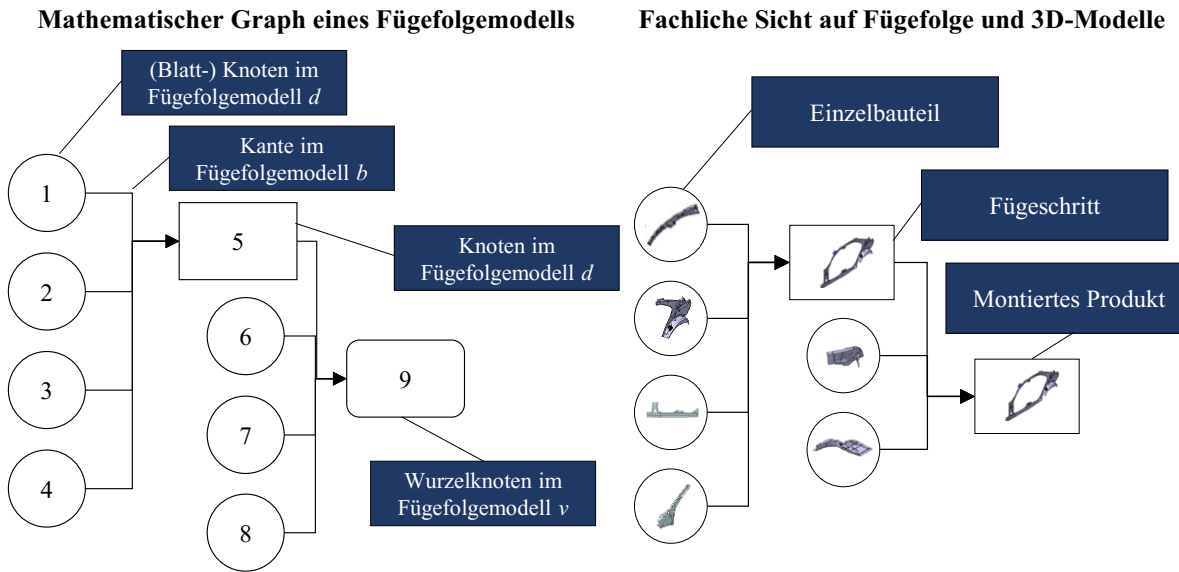


Abbildung 38: Fügefolgegraph⁵⁷

5.3.1.3 Ressourcenmodell

Die Anlagestruktur, wie sie in Kapitel 2 eingeführt wurde, wird im Folgenden ebenfalls als Graphenmodell beschrieben, dem sogenannten Ressourcenmodell. Die folgende Tabelle 21 führt die dafür verwendeten Notationen auf.

Tabelle 21: Notationen im Ressourcenmodell

g	Wurzelknoten des Ressourcengraphen	K	Graph des Ressourcenmodells
m	Kante im Ressourcenmodell	M	Menge aller Kanten im Ressourcenmodell
n	Anzahl an Stationen	R	Vektor über die Anzahl der zugeordneten Ressourcen zu Stationen
r_{hs}	Anzahl zugewiesener Ressourcen	S	Menge aller Stationen
s	Station	S_a	Menge aller Ausfügestationen
		S_g	Menge aller Geometriestationen
t	Direkter Nachfolger von Knoten s		

Auch das Ressourcenmodell wird als Wurzelbaum beschrieben. Aus Produktionssicht bedeutet das, dass keine Parallelstationen berücksichtigt werden, was der Theorie der Idealplanung entspricht. Die gerichteten Kanten des Baumes definieren den Produktionsfluss. Der Wurzelbaum, der das Montagesystem beschreibt, wird durch das Tupel (K, g) beschrieben. Dabei stellt $K = (S, M, R)$ den Baumgraphen mit g dem Wurzelknoten dar. Die Knotenmenge $S = 1, \dots, n$ und $|S| = n$ stellt dabei die Menge aller Knoten des Graphens dar. Jeder Knoten s des Graphens stellt dabei eine Station dar. Der Knoten t ist der direkte Nachfolger des Knotens s und die Menge aller Kanten $M = \{(s, t) | s \in S, t \in N_s\}$. N_s ist die Menge aller

⁵⁷ Eigene Abbildung

Nachfolger von s . Für den Wurzelknoten bedeutet das, dass $N_s = \emptyset$. Knoten $s \in S_g$ mit $S_g = \{s | s \in S, s \notin S_a\}$ sind aus produktionstechnischer Sicht sogenannte Geostationen. Hingegen beschreibt die Menge S_a Ausfügestationen, welche sich aus allen Elementen $S_a = \{s | s \in S, s \notin S_g\}$ zusammensetzen. Sie stellen aus produktionstechnischer Sicht Nachfolgestationen von Geostationen dar. Die Knotengewichte werden durch die beinhalteten Ressourcen einer Station R_s beschrieben. In der folgenden Abbildung 39 wird das Montagesystem aus Abbildung 5 als Ressourcengraph dargestellt. In diesem Beispiel ist die Menge aller Stationen $S = \{1, 2, 3, 4\}$, der Wurzelknoten $w = 4$ und somit $N(4) = \emptyset$. Die Menge aller Geostationen $S_g = \{1, 2, 3\}$ und die Menge aller Ausfügestationen $S_a = \{4\}$.

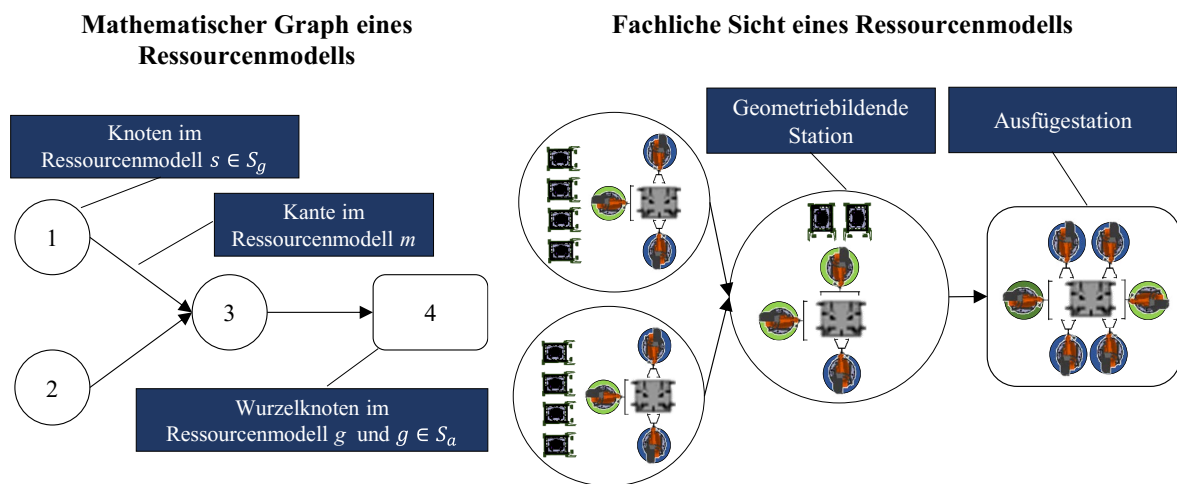


Abbildung 39: Montagesystemgraph⁵⁸

5.3.1.4 Prozessmodell

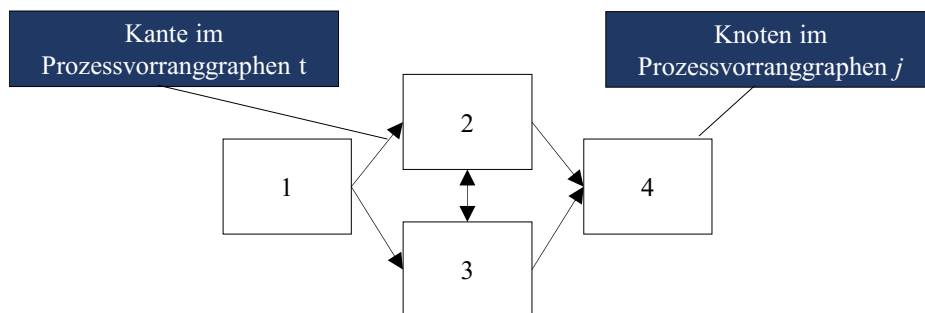
Auch für den Prozess werden Graphenmodelle eingeführt. Die folgende Tabelle 21 führt die dafür verwendeten Notationen ein. Bereits in Abbildung 6 wurde exemplarisch für eine Montagestation eine erste Prozessbeschreibung gezeigt. Im Gegensatz zu den bisher eingeführten Modellen kann das Prozessmodell nicht als Wurzelbaum beschrieben werden. Die Knoten des Prozessgraphen können aufgrund von parallelisierten Prozessen mehrere Nachfolger aufweisen. Im Folgenden werden zwei verschiedene Prozessmodelle eingeführt. Das erste Prozessmodell, das sogenannte Prozessvorranggraph (vgl. i.2) beschreibt eine kontextunabhängige Vorrangbeziehung für auszuübende Arbeitsvorgänge (im Folgenden als „Jobs“ bezeichnet) innerhalb eines Fügeschritts. Kontextunabhängig bedeutet in diesem Fall, ohne auf existierende projektspezifische Randbedingungen Rücksicht zu nehmen wie zum Beispiel die Taktzeit oder das Ressourcenmodell. Das zweite Prozessmodell beschreibt einen klassischen abgetakteten Prozess eines Fließmontagesystems.

⁵⁸ Eigene Abbildung

Tabelle 22: Notationen im Prozessmodell

		E	Anzahl an Fügeelementen
j	Knoten im Prozessvorranggraphen (Job)	J	Menge aller Jobs
g	Kante im Prozessgraph	G	Menge aller Kanten im Prozessgraph
o	Knoten im Prozessmodell (Prozess)	O	Menge aller Prozesse
t	Kante im Prozessvorranggraph	T	Menge aller Kanten im Prozessvorranggraph
		W	Prozessvorranggraph
		Y	Prozessgraph
ρ	Endknoten im Prozessgraph		
σ	Startknoten im Prozessgraph		
d_g	Kantengewicht, Zeit zw. Prozessen		
d_o	Knotengewicht, Prozesslänge		
$\tau_{s,start}$	Taktbeginn		
$\tau_{s,end}$	Taktende		

In der folgenden Abbildung 40 wird exemplarisch ein Vorranggraph abgebildet. Ein Prozessvorranggraph wird durch den Graphen $W(J, T, E)$ beschrieben. Die Knoten des Prozessvorranggraphen stellen diesbezüglich sogenannte Jobs j dar und sind Fügeaufgabengruppierungen für die Anzahl mehrerer ähnlicher Montageaufgaben. Der direkte Nachfolger von j ist der Knoten κ mit $\kappa \in N_j$. N_j stellt die Menge aller Nachfolger von j dar. Die Kanten T unterteilen sich in gerichtete und ungerichtete Kanten. Die gerichteten Kanten $T = \{(j, \kappa) \mid j \in J, \kappa \in N_j\}$ legen die Vorrangbeziehung zwischen den einzelnen Jobs j fest.

**Abbildung 40: Jobvorranggraph⁵⁹**

Im Folgenden soll auf den zweiten Prozessgraphen eingegangen werden, der den abgetakteten Montageprozess beschreibt. Im Gegensatz zum Prozessvorranggraphen beschreibt der Prozessgraph die konkrete Prozessplanung. Der Prozessgraph ist aus diesem Grund kontextgebunden und wird durch die Taktgrenzen, also den Knoten 1 und 7 limitiert wie in Abbildung 41 zu sehen ist. Abbildung 41 stellt exemplarisch einen Prozess für den Vorranggraph aus Abbildung 40 dar. Die Taktgrenzen werden durch den Taktbeginn $\tau_{s,start}$ und durch das Taktende $\tau_{s,end}$ festgelegt, die Taktdauer hingegen durch die Taktzeitprämisse c , bzw. durch die reale Taktdauer d_s . Dabei werden die Takte, die einem Fügeschritt zugeordnet sind, in

⁵⁹ Eigene Abbildung

sequenzieller Reihenfolge abgehandelt. Der Prozessgraph wird durch das Tupel (Y, ρ, σ) beschrieben. Dabei ist Y der Prozessgraph mit einem künstlichen Startknoten σ eines Takts und dem künstlichen Endpunkt des Takts ρ . Der erste Prozessschritt o in der Prozessbeschreibung mit $V_o = \sigma$ startet somit bei $\tau = \tau_{s,start} = 0$, der letzte Prozessschritt o der Prozessbeschreibung mit $N_o = \rho$ endet somit bei $\tau = \tau_{s,end}$. Der Prozessgraph Y wird wie folgt beschrieben $Y = (O, G, d)$. Dabei stellt O die Menge aller Knoten der Prozesse o dar, mit p dem Nachfolger von o . Die Kanten werden durch die Menge $G = \{(o, p) | o \in O, p \in N_o\}$ beschrieben. Sowohl die Kanten im Prozessgraphen sowie die einzelnen Knoten werden mit Gewicht d versehen. Die Knotengewichte d_o beschreiben die Dauer der einzelnen Prozesse, die zeitlichen Abständen zwischen den Prozessen werden durch die Kantengewichte d_g beschrieben. Die Dauer eines Montageprozesses ist davon abhängig, wie viele Montageaufgaben (zum Beispiel das Setzen von einzelnen Schweißpunkten) innerhalb des Prozesses durchgeführt werden. In Abbildung 41 wird ein kontextabhängiger Prozessgraph dargestellt mit Start- und Endknoten des dazugehörigen Taktes. Im Gegensatz zum Vorranggraph gibt es im Prozessgraph nur gerichtete Kanten. Der Job 1 aus Abbildung 40 wurde in diesem Prozessgraphen durch Prozess 2 abgebildet; Job 2 durch den Prozess 3 und 4; Job 3 durch den Prozess 5 und Job 4 durch den Prozess 6. Somit gilt für diesen Prozessgraph $O = \{2, \dots, 6\}$, der Startknoten $\sigma = 1$ und der Endknoten $\rho = 7$.

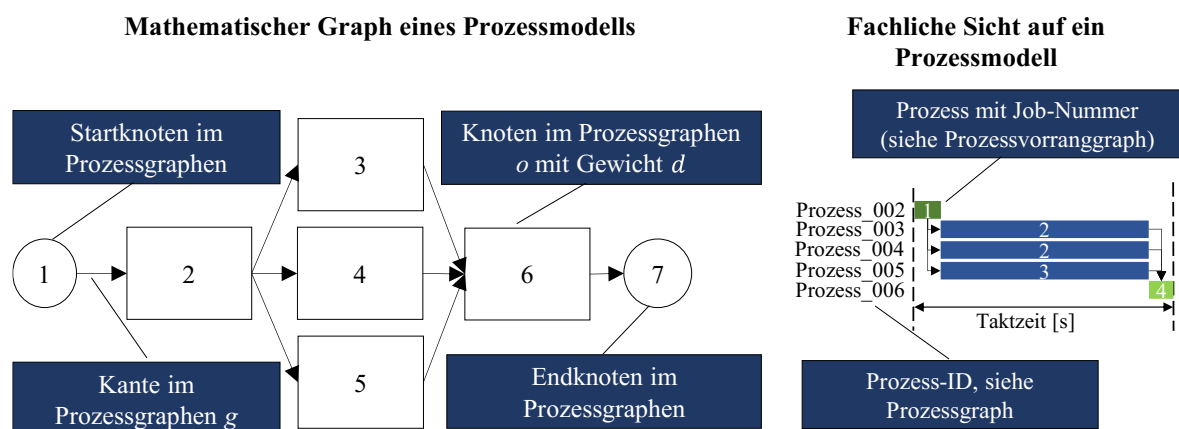


Abbildung 41: Abgetakteter Montageprozess⁶⁰

5.3.1.5 Produkt-Prozess-Ressourcen-Informationsmodell

Hinsichtlich der Vervollständigung des Realmodells werden durch das PPR-Informationsmodell die einzelnen soeben eingeführten Informationsmodelle in Relation gesetzt. Das PPR-Modell wurde bereits in Abschnitt 3.2 eingeführt und zielt auf die durchgängige Beschreibung der Zusammenhänge bestehender Informationsinstanzen des Produkts, des Prozesses und der Ressource. Zunächst soll diesbezüglich ein weiterer Blick auf die Fügefolge und den Prozessvorranggraphen geworfen werden, welche eine Sonderrolle einnehmen, da sie Zwischenschritte der Anlagenplanung darstellen. Beide Modelle sind im klassischen PPR-Modell nicht vertreten. Dennoch nehmen sie nach Meinung des Autors eine elementare Rolle in der

⁶⁰ Eigene Abbildung

Anlagenplanung ein und sind im Informationsmodell für die hier entwickelte Methode aufgeführt. Die folgende Abbildung 42 zeigt die Verknüpfung zwischen den einzelnen Modellen im Informationsmodell auf, welche durch die Kanten des Graphen dargestellt sind. Der Begriff Zuordnung indiziert diesbezüglich eine modellbasierte Verknüpfung zwischen den entsprechenden Objekten des Modells. Zunächst soll auf den Zusammenhang zwischen Produkt- und Fügefolgemodell eingegangen werden. Das Produktmodell besteht unter anderem aus Einzelteilen, welche später im Fügefolgemodell Fügeschritten zugeordnet werden. Somit verweist jedes Bauteil auf einen Fügeschritt. Gleichmaßen können auf Basis dieser Logik die entsprechenden Fügeelemente den Fügeschritten zugeordnet werden. Das Fügefolgemodell wiederum steht in direkter Verbindung mit Prozessvorrang- und Prozessmodell. Denn für jeden Fügeschritt werden Jobs abgeleitet und später im Prozessmodell in kontextabhängige Prozesse unterteilt, die für das Handhaben und Fügen notwendig sind. Gleichzeitig werden die einzelnen Fügeelemente zu Ressourcen des Ressourcenmodells zugeordnet. Zuletzt erfolgt die Verknüpfung zwischen den Ressourcenmodulen und der Prozesse.

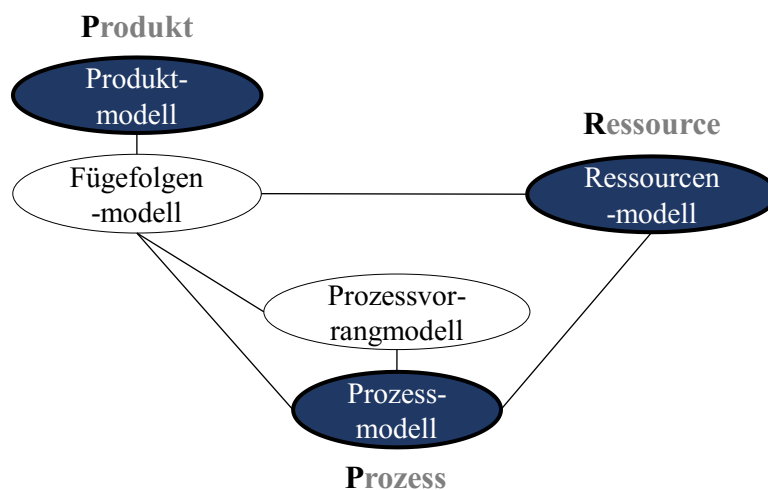


Abbildung 42: PPR-Informationsmodell⁶¹

5.3.2 Optimierungsmodell

In diesem Abschnitt 5.3.2 wird auf Basis des Realmodells das Formalmodell gebildet. Das Formalmodell entspricht einem Optimierungsmodell, das in der folgenden Abbildung 29 skizziert ist. Das Optimierungsmodell hat zum Ziel den Informationszustand i.2 (Jobvorranggraph und Projektprämissen) in den Informationszustand i.4 (Stationsverbünde) zu transformieren. Die Stationsverbünde stellen jeweils eine Lösung für einen Fügeschritt dar, die später durch Problemlösungskomponente p.3 zu einem Gesamtsystem zusammengeführt werden. Durch das Modell wird die Zuordnung von Montagetemplates zu Stationen unter gegebenen Randbedingungen optimiert und beschreibt die Problemstellung des Problemlösungselements p.2. Der Einsatz von Montagetemplates ermöglicht es das implizite Planungsvorgehen im Rahmen eines Optimierungsmodells zu formalisieren. Die Zuordnung von Fügeelementen zu Prozessen nimmt in diesem Bezug eine hervorzuhebende Rolle ein. Denn erst wenn alle Fügeelemente einem Prozess zugeordnet sind, stellt das konzipierte Montagesystem eine valide

⁶¹ Angelehnt an Hagemann et al. 2019, S. 164.

Lösung dar. Die folgende Abbildung 43 zeigt auf der linken Seite die Eingangsinformationen auf sowie auf der rechten Seite die Ausgangsinformationen. Im mittleren Teil der Abbildung ist die Grundlogik des Optimierungsmodells aufgezeigt.

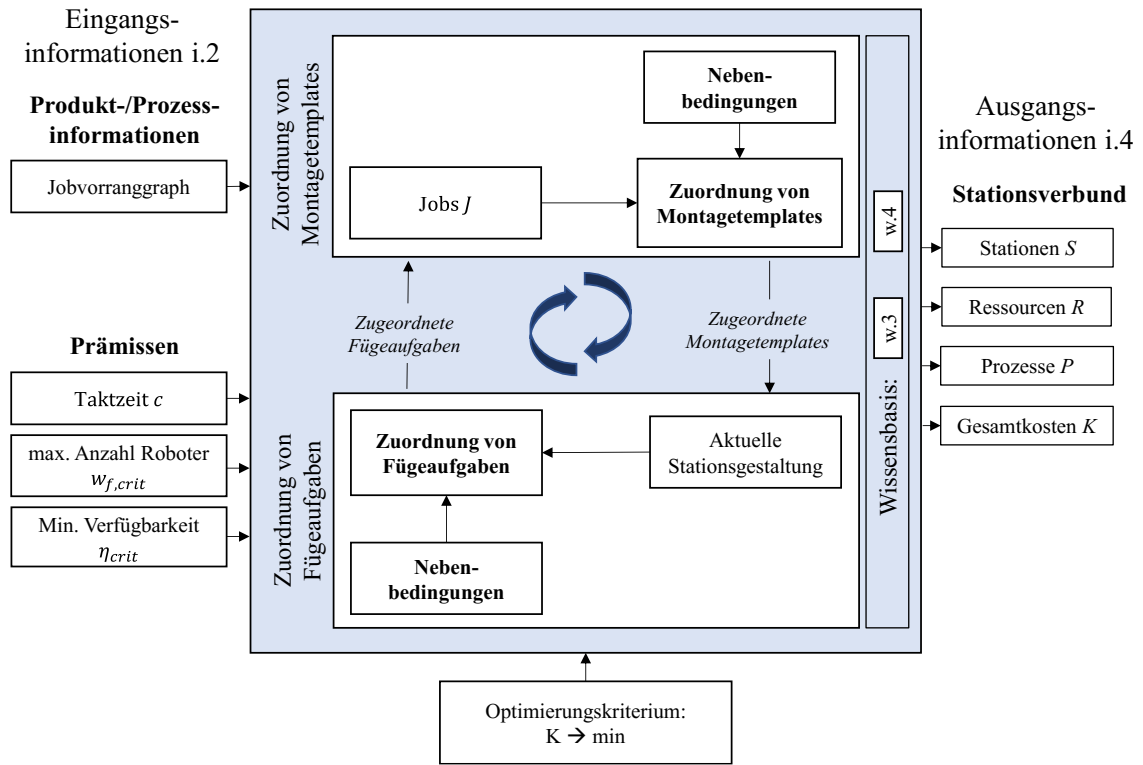


Abbildung 43: Optimierungsmodell Prozess- und Stationsgestaltung⁶²

Montagetemplates wurden in Abschnitt 5.2.4 eingeführt und sind in Wissenselement w.4 hinterlegt. Durch die Zuordnung von Montagetemplates zu Stationen erhöht sich die Kapazität der Stationen in Bezug auf die Abarbeitung von Montageaufgaben. Jedoch können Montagetemplates nicht in beliebiger Art und Weise Stationen zugeordnet werden und unterliegen aus diesem Grund Randbedingungen, die im Optimierungsmodell berücksichtigt sind. In Abhängigkeit von den zugeordneten Montagetemplates können den Stationen Montageaufgaben zugeordnet werden. Auch die Zuordnung von Montageaufgaben zu Stationsprozessen und -ressourcen unterliegt mehreren Randbedingungen. Ziel des Modells ist es die beste Stationskonfiguration auf Basis der Montagetemplates zu finden, die die Kapazität aufweist, um alle Fügeaufgaben der gegebenen Jobs J fertigzustellen. Das Modell wird im Folgenden detailliert eingeführt. Die Gleichung (5.1) ist die Zielfunktion des Optimierungsmodells. Die Zielfunktion verfolgt die Minimierung der Gesamtkosten K eines Stationsverbunds. Ein Stationsverbund beschreibt eine Anlagenlösung für einen Fügeschritt f , der aus mehreren sequenziell angeordneten Stationen besteht.

$$\min_{\varepsilon_s} K = \sum_{s \in S} K_s = \sum_{s \in S} R_s * k = \sum_{s \in S} \varepsilon_s * T * k \quad (5.1)$$

Unter Berücksichtigung der folgenden Nebenbedingungen

⁶² Eigene Abbildung

Die Gesamtkosten bildet sich aus der Summe der Kosten aller Stationen s . Eine Station ist Teil der Menge aller Stationen S mit $S = \{1 \dots n\}$ und somit n der Anzahl aller Stationen. Die Auswahl ε_s weist Montagetemplates zu Stationen zu. Templates, wie Sie in Abschnitt 5.2 eingeführt wurden, entsprechen einer bestimmten Kombination aus Ressourcen und Prozessen. Jedes ε_s trifft diesbezüglich eine Auswahl eines oder mehrerer Templates a , welche dann einer Station s zugeordnet werden.

Die Zuordnung von Templates zu einer Station ε_s stellt eine Auswahl verschiedener Templates dar und ist in Gleichung (5.2) beschrieben. Hierbei umfasst die Templatezuweisung ε_s die binären Ausprägungen $m_{a,s} \in \{0,1\}$, welche angeben, ob Template a der Station s zugewiesen wird. Jedes Template kann somit nur einmal einer Station zugewiesen werden. Für jede Station gilt:

$$\varepsilon_s = (m_{1s} \quad \dots \quad m_{ls}) \quad (5.2)$$

Die Ressourcen, die ein Template beinhaltet sind durch eine Matrix T in Gleichung (5.3) beschrieben (abgeleitet aus Tabelle 19 und Teil von Wissensselement w.4). Die Matrix T weist dem Template a aus der Menge aller Templates $A = \{1 \dots l\}$ jeweils eine Anzahl t_{ah} der Bibliotheksressource h zu. Die Anzahl aller Templates ist l . Dabei ist die Menge aller Bibliotheksressourcen $H = \{1 \dots b\}$ mit der Anzahl an Bibliotheksressourcen b (vgl. Tabelle 15 – Tabelle 18 und Teil des Wissensselement w.3).

$$T = \begin{pmatrix} t_{11} & \dots & t_{1b} \\ \dots & \dots & \dots \\ t_{l1} & \dots & t_{lb} \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

Über die Stationskonfiguration ε_s für eine Station s ergibt sich dann die zugewiesene Anzahl r_{hs} der Bibliotheksressource h zu Station s . Dieser Zusammenhang ist in Gleichung (5.4) ersichtlich. Daraus folgt die Menge aller zugewiesener Anzahlen an Bibliothekselementen R_s .

$$\varepsilon_s * T = (m_{1s} \quad \dots \quad m_{ls}) * \begin{pmatrix} t_{11} & \dots & t_{1b} \\ \dots & \dots & \dots \\ t_{l1} & \dots & t_{lb} \end{pmatrix} = (r_{1s} \quad \dots \quad r_{hs}) = R_s \quad (5.4)$$

Für jede Bibliotheksressource h ist in Gleichung (5.5) zudem ein Kostenwert k_h hinterlegt (abgeleitet aus Tabelle 15 bis Tabelle 18). Die Einzelkosten können als Vektor k geschrieben werden und ergeben multipliziert mit den geplanten Ressourcen R_s der Station s die Gesamtkosten K_s für Station s .

$$R_s * k = K_s \quad (5.5)$$

Nebenbedingungen für die Zuordnung von Ressourcen einer Station

Verfügbarkeit einer Station

Für jede Station s aus der Menge aller Stationen S muss erfüllt sein, dass eine gegebene Mindestverfügbarkeit η_{crit} eingehalten wird, siehe dazu Nebenbedingung (5.6). Die Verfügbarkeit einer Station η_s wird durch das Produkt der Einzelverfügbarkeiten jeder einzelnen zugeordneten Bibliotheksressource h gebildet. Es gilt somit, dass das Produkt der zugeordneten

Ressourcen r hoch der Verfügbarkeit η_h je Bibliotheksressource h größer sein muss als der kritische Verfügbarkeitswert η_{crit} .

$$\prod_{h \in H} r_{hs}^{\eta_h} = \eta_s \geq \eta_{crit} \quad \forall s \in S \quad \text{Nebenbedingung} \quad (5.6)$$

Anzahl an Fügerobotern in einer Station

Als weitere Nebenbedingungen (5.8) muss die Menge an Fügerobotern w_s in jeder Station s aus der Menge aller Stationen S kleiner gleich sein als ein maximaler Wert an Robotern w_{crit} je Station. Der Limitierungswert w_{crit} beschreibt, wie viele Roboter maximal kollisionsfrei an einem Fügenschritt f arbeiten können. Das Limit kann von Fügenschritt zu Fügenschritt variieren und ist abhängig von der Größe des Zusammenbaus, der Geometrie und der Verteilung der Fügeelementpositionen. Die Menge der Fügeroboter einer Station ergibt sich aus der Summe der Ressourcen, welche Roboter sind. Diese können über einen Zuordnungsvektor w identifiziert werden wie Gleichung (5.7) zeigt. Der Zuordnungsvektor w ist 1, wenn es sich bei der Bibliotheksressource h um einen Roboter handelt, anderenfalls 0. Es gilt $w_h \in \{0,1\}$.

$$w = (w_1 \quad \dots \quad w_b) \quad (5.7)$$

$$R_s * w = w_s \leq w_{crit} \quad \forall s \in S \quad \text{Nebenbedingung} \quad (5.8)$$

Kombinierbarkeit von Templates

Nicht alle Templates sind in einer Station s frei kombinierbar, wie Gleichung (5.9) zeigt. Hierbei müssen die Kombinationsbeschränkungen ς_κ betrachtet werden (abgeleitet aus Tabelle 19).

$$\varsigma_\kappa = (\varsigma_{1\kappa} \quad \dots \quad \varsigma_{a\kappa} \quad \dots \quad \varsigma_{la}) \quad (5.9)$$

Die binären Ausprägungen des Vektors $c_{a\kappa} \in \{0,1\}$ geben an, ob ein Template a mit einem anderen Template a' kombiniert werden kann. Ist $c_{a\kappa} = 1$ und $c_{a'\kappa} = 1$, dann darf das Template a und das Template a' nicht miteinander kombiniert werden und entspricht Nebenbedingung (5.10).

$$\varsigma_\kappa * \varepsilon_s \leq 1 \quad \forall s \in S; \forall \kappa \in K \quad \text{Nebenbedingung} \quad (5.10)$$

Nebenbedingungen für Prozesse

Neben einer Zuordnung von Bibliotheksressourcen zu Templates gibt es eine gegebene Zuordnung von Bibliotheksprozessen i zu Templates a (vgl. Tabelle 19). Einem Template a aus einer Anzahl l an Templates wird jeweils eine Anzahl $ti_{ai} \geq 0$ an Bibliotheksprozessen i zugewiesen. Jeder Bibliotheksprozess stammt aus der Menge an Bibliotheksprozessen $I \in \{1 \dots q\}$ mit der Anzahl q an Bibliotheksprozessen. Die Zuordnung von Templates a zu Bibliotheksprozessen i ergibt sich aus der Matrix TI in Gleichung (5.11).

$$TI = \begin{pmatrix} ti_{11} & \dots & ti_{1q} \\ \dots & \dots & \dots \\ ti_{l1} & \dots & ti_{lq} \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

Die Multiplikation der Templatezuordnung ε_s mit der Matrix TI führt zu den zugeordneten Anzahlen an Prozessen P_s einer Station s . Die zugeordneten Prozesse P_s bestehen aus der Anzahl zugeordneter Prozesse p_{is} zu Station s , wie die folgende Gleichung (5.12) zeigt.

$$P_s = \varepsilon_s * TI = (p_{1s} \dots p_{qs}) \quad (5.12)$$

Daraus folgen die insgesamt zugeordneten Prozesse P in Gleichung (5.13) zu einem ganzen Stationsverbund, also allen Stationen für einen Fügeschritt, durch die Summe von P_s über alle Stationen s .

$$\sum_{s \in S} \varepsilon_s * TI = P = (p_1 \dots p_q) \quad (5.13)$$

Notwendige Prozesse

Für den Stationsverbund, bestehend aus n Stationen, müssen gewisse Prozesse über $p_{i,crit} \in \{0,1\}$ zugewiesen sein und wird durch Nebenbedingung (5.14) abgeprüft. Dadurch wird sichergestellt, dass für jeden gegebenen Job j mindestens ein Prozess zu einer der Stationen s zugeordnet wird. Es sei e_i der Einheitsvektor mit dem Wert 1 an der i -ten Stelle und Null an allen anderen Stellen.

$$\sum_{s \in S} \varepsilon_s * TI * e_i = P * e_i \geq p_{i,crit} \quad \forall i \in I \quad \text{Nebenbedingung} \quad (5.14)$$

Notwendige Geometrieprozesse in Geometriestation (entspricht Station 1)

Für die Geometriestation $s = 1$ gilt eine besondere Nebenbedingung

(5.15). Für Station $s = 1$ gibt es zwingend benötigte Geometrieprozesse g_i , welche dieser Station zugeordnet sein müssen. Diese Geometrieprozesse sind notwendig, um in der Geometriestation alle geometriebildenden Fügeelemente zu setzen. Es sei e_i der Einheitsvektor dem Wert 1 an der i -ten Stelle und Null an allen anderen Stellen.

$$\varepsilon_1 * TP * e_i = P_s * e_i \geq g_i \quad \forall i \in I \quad \text{Nebenbedingung} \quad (5.15)$$

Zuordnung von Fügeelementen/Handhabungsaufgaben zu Prozessen

Die gegebene Matrix W in Gleichung (5.16) bildet eine gültige Zuordnung von Jobs j zu Bibliotheksprozessen i über die Variable $\mu_{ji} \in \{0,1\}$. Damit wird folgend sichergestellt, dass nur Montageaufgaben e (Fügeelemente und Handhabungsschritte) eines Jobs j den Prozessen i zugeordnet werden, die diese Montageaufgabe auch durchführen können. Dabei ist die Anzahl aller Jobs J und die Anzahl aller Prozesse q .

$$W = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \dots & \mu_{j1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \mu_{1q} & \dots & \mu_{jq} \end{pmatrix} \quad (5.16)$$

Basierend auf den möglichen Zuordnungen W muss als Teil der Optimierung festgelegt werden, welchen Prozessen i einer Station s ein Fügeelement e zugeordnet wird. Dabei ist jedes Fügeelement e Teil eines Jobs j . Die Variable $y_{eis} \in \{0,1\}$ in Gleichung (5.17) gibt bei dem Wert 1 an, dass ein Fügeelement e den Prozessen i in Station s zugeordnet ist. Bei dem Wert $y_{eis} = 0$ ist das Fügeelement e nicht dem Prozess i zugeordnet. Bei der Zuordnung muss berücksichtigt werden, dass jedes Fügeelement genau einem Stationsprozess zugeordnet werden muss, damit gilt die folgende Nebenbedingung:

$$\sum_{s \in S} \sum_{i \in I} y_{eis} = 1 \quad \forall e \in j \quad \text{Nebenbedingung} \quad (5.17)$$

Zusätzlich muss durch die folgende Nebenbedingung sichergestellt werden, dass die Zuordnung eines Fügelements nach Matrix W nach Nebenbedingung (5.18) erlaubt ist:

$$\mu_{ji} \geq y_{eis} \quad \forall e \in j \quad \text{Nebenbedingung} \quad (5.18)$$

Die Variable o_{is} in Gleichung (5.19) gibt folgend an, wie viele Fügeelemente e dem Prozess i in Station s zugeordnet wurden:

$$o_{is} = \sum_{e \in E} y_{eis} \quad (5.19)$$

Für die gesamte Station s gilt dann nach Gleichung (5.20):

$$O_s = (o_{1s} \quad \dots \quad o_{qs}) \quad (5.20)$$

Prozessdauer und Zykluszeit

Auf Grund der Taktzeitprämisse c muss auch die Dauer der Prozesse d berücksichtigt werden, denn alle Prozesse müssen innerhalb der gegebenen Taktzeit beendet sein. Diesbezüglich existiert eine gegebene Standardprozesszeit τ_i je Prozess i für das Durchführen einer Montageaufgabe, also dem Fügen eines Fügeelements oder dem Durchführen eines Handhabungsschritts. Gleichung (5.21) zeigt den Vektor τ mit den einzelnen Ausprägungen den Standardprozesszeiten τ_i .

$$\tau = (\tau_1 \dots \tau_q) \quad (5.21)$$

Die Prozessdauer bildet sich somit aus der Anzahl zugeordneter Montageaufgaben y_{is} zu den Prozessen i dieser Station s . Die Anzahl an Montageaufgaben muss folgend durch die Anzahl der Prozesse i dividiert werden. Da nur ganze Montageaufgaben zugeordnet werden dürfen, muss der Quotient folgend aufgerundet werden und mit der Standardprozesszeit τ_i multipliziert werden. Daraus ergibt sich wie in Gleichung (5.22) beschrieben, die benötigte Prozessdauer d_{is} der Prozesse i in Station s :

$$\left\lceil \frac{y_{is}}{p_{is}} \right\rceil * \tau_i = d_{is} \quad (5.22)$$

Falls y_{is} und p_{is} gleich Null sind, gilt $d_{ms} = 0$ und die Zuordnung muss stets so erfolgen, dass $y_{ms} > 0$ ist genau dann erlaubt ist, falls $p_{is} > 0$ ist.

Alle Prozesse einer Station erfolgen entweder sequenziell oder parallel. Ob ein Prozess sequenziell oder parallel verlaufen kann, ist eindeutig durch eine symmetrische qxq Matrix in Gleichung (5.23) gegeben, deren Diagonale stets den Wert 1 trägt. Die Matrix entspricht inhaltlich Tabelle 14. In der Matrix werden die einzelnen Prozesse i paarweise gegenübergestellt. Für jedes binäre Element der Matrix gilt $v_{i'i} \in \{0,1\}$, wobei bei Wert 1 ein paralleles Ablaufen der Prozesse möglich ist und der Wert 0 für ein zwingend sequenzielles Ablaufen der Prozesse. Auf der Diagonalen steht Prozess i Prozess i gegenüber, was bedeutet, dass gleiche Prozesse immer parallel ausgeführt werden dürfen.

$$V = \begin{pmatrix} 1 & \dots & v_{1q} \\ \dots & \dots & \dots \\ v_{1q} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (5.23)$$

Die gesamte Durchlaufzeit einer Station d_s ist gegeben durch die größte Endzeit z_{is} aller Prozesse i in einer Station s :

$$d_s = \max(z_{1s}, \dots, z_{is}, \dots, z_{qs}) \quad (5.24)$$

Dabei ist die Endzeit der Prozesse z_{is} die Startzeit x_{is} addiert um die Prozessdauer d_{is} der Prozesse i .

$$z_{is} = x_{is} + d_{is} \quad (5.25)$$

Sofern $v_{i,i-1} = 1$ gilt, dass der Prozess i sowie sein Vorgängerprozess $i - 1$ parallel verlaufen können. Es ergibt sich für die Endzeiten der Prozesse eins und zwei der folgende Aufbau:

$$x_{1s} = 0 \quad (5.26)$$

$$z_{1s} = 0 + d_{1s} = d_{1s} \quad (5.27)$$

$$x_{2s} = v_{12} * d_{1s} \quad (5.28)$$

$$z_{2s} = v_{12} * d_{1s} + d_{2s} \quad (5.29)$$

Der ersten Prozesse mit $i = 1$ starten bei $x_{1s} = 0$ wie Gleichung (5.26) zeigt. Die Endzeit z_{1s} (siehe Gleichung (5.27)) für den Prozess ergibt sich somit aus der Startzeit addiert um die entsprechende Länge d_{1s} . Gleichungen (5.26) – (5.29) zeigen die gleiche Logik für den zweiten Prozess. Falls ein Prozess und sein Vorgängerprozess sequenziell verlaufen, stellt die Endzeit des Vorgängerprozesses die Startzeit des Folgeprozesses dar. Falls die Prozesse jedoch parallel verlaufen, ist die Startzeit des Vorgängerprozesses die Startzeit des Prozesses. Für den dritten Prozess muss geprüft werden, ob dieser parallel zu Prozess 1 oder Prozess 2 starten kann. Die Startzeit eines Prozesses ist die größte Endzeit aller sequenziell verlaufenden

Prozesse, welche zuvor durchlaufen wurden. Für die Endzeit eines Prozesses z_{is} folgt somit allgemein:

$$z_{is} = \max(v_{1,i} * z_{1s}; \dots; v_{i-1,i} * z_{i-1,s}) + d_{is} \quad (5.30)$$

Bei gewählten ε_s kann iterativ jede Endzeit aller Prozesse hergeleitet werden. Es ergibt sich eine Nebenbedingung für die maximale Durchlaufzeit d_{max} je Station:

$$d_s = \max(z_{1s}, \dots, z_{qs}) \leq c \quad \forall s \in S \quad \text{Nebenbedingung} \quad (5.31)$$

5.3.3 Klassifizierung des Formalmodells

Das zuvor beschriebene Formalmodell soll folgend klassifiziert werden. Die Klassifizierung bildet die Grundlage für eine fundierte Gestaltung des Lösungsverfahrens. Sie erfolgt unter Zuhilfenahme der folgenden Kriterien: dem Informationsgrad und -art, der Anzahl der Zielsetzungen, dem Wertebereich der Entscheidungsvariablen und der Komplexität (Müller 2018, S. 86; Domschke et al. 2015, S. 6; Boysen 2005, S. 32).

Die folgende Tabelle 23 zeigt die herangezogenen Klassifizierungskriterien auf sowie die Eigenschaften des vorliegenden Formalmodells. Der Informationsgrad des Modells ist determiniert, da für jede Problemistanz zu jedem Zeitpunkt die Eingangsvariablen bekannt sind und in den Informationsmodellen für die Berechnung zur Verfügung gestellt werden. Die Zahl der Zielsetzungen ist eins und ist in Gleichung (5.1) festgehalten und führt somit zu der Klassifizierung eines einkriteriellen Modells. Der Wertebereich der Entscheidungsvariablen für die Lösungsfindung variiert. Die Entscheidungsvariable ε_s ist dabei ganzzahlig. Die Gestaltung der Prozesse hingegen basiert auf kontinuierlichen Variablen, wie z.B. der Zeitvariable τ . Modelle, in denen nur ein Teil aus ganzzahligen Variablen besteht, werden gemischt-ganzzahlig genannt (engl. Mixed-integer Program, MIP). Auch das hier vorliegende Modell ist dieser Kategorie zuzuordnen.

Zuletzt soll auf die Komplexität des Modells eingegangen werden. Für die Komplexitätsbewertung von Optimierungsproblemen werden Modelle nach dem erforderlichen Rechenaufwand bewertet (Domschke et al. 2015, S. 7). Für die Bewertung wird sich der Komplexitätstheorie für Optimierungsprobleme bedient, welche auf den zwei (Teil-) Komplexitätsklassen P und NP-schwer basiert. Die Komplexitätsklasse P-komplexer Probleme umfasst alle Optimierungsprobleme, die durch einen determinierten Algorithmus innerhalb polynomialer Zeit gelöst werden können (Zelewski 1989, S. 51). Die Klasse NP-schwerer Probleme befasst sich mit weitaus komplexeren Problemen, nämlich solchen, welche sich als Gesamtheit in polynomialer Zeit nur noch nicht-determiniert durch Algorithmen lösen lassen (Boysen 2005, S. 34; Zelewski 1989, S. 63–65). Drückt man die Komplexität eines Verfahrens durch die Anzahl an Berechnungsschritten n in Abhängigkeit der Länge der Eingangsinformationen l aus, so ergibt sich für P-komplexe Probleme ein Rechenaufwand von $n = l^c$ mit $c \in \mathbb{N}^+$. Dabei ist c eine problemspezifische Konstante. Für NP-schwere Probleme hingegen folgt ein Rechenaufwand von $n = k^{cl}$. In diesem Fall sind sowohl k , als auch c problemspezifische Konstanten aus $\mathbb{N}^+$. (Boysen 2005, S. 34) In Bezug auf das vorliegende Optimierungsmodell kann festgehalten werden, dass das hier behandelte Problem eine Erweiterung des SALBP ist. Neben der

Zuordnung einzelner Fügeaufgaben auf Stationen erfordert das hier vorliegende Problem die Betrachtung weiterer Freiheitsgrade wie der Prozess- und Stationsgestaltung. Da das SALBP Problem als Komplexitätsstufe NP-schwer klassifiziert ist (Boysen 2005, S. 63), kann auch das Problem der algorithmischen Planung als NP-schwer klassifiziert werden. Ein Beweis hinsichtlich der Komplexitätsklassifizierung wird nicht weitergehend durchgeführt.

Tabelle 23: Klassifizierung des Formalmodells

Klassifizierungskriterien	Eigenschaften des Optimierungsmodells
Informationsgrad	statisch, determiniert
Anzahl der Zielsetzungen	einkriteriell
Wertebereich der Entscheidungsvariablen	Binär, ganzzahlig, reell
Komplexität	NP-schwer

5.4 Prozedurale Problemlösungsverfahren

Nach der Formulierung des Real- und Formalmodells sowie der Formalisierung des deklarativen Wissens gilt es nun, ein Lösungsverfahren zu entwickeln. Das Problemlösungsverfahren bezieht sich auf die drei Problemlösungselemente: der Produkt- und Fügefolgeanalyse p.1, der Prozess- und Stationsgestaltung p.2 und zuletzt der Systembildung p.3. Das dafür notwendige prozedurale Wissen umfasst in diesem Kontext das Wissen über die zielführende Manipulation der in Abschnitt 5.3.1 eingeführten Informationsmodelle unter Anwendung der in Abschnitt 5.2 eingeführten deklarativen Wissensbasis. Dabei kann das prozedurale Wissen aus expliziten und impliziten Wissens-elementen bestehen. Insbesondere die Prozess- und Stationsgestaltung erfordert überwiegend implizites Wissen und weist aus diesem Grund einen deutlich zu differenzierende n Problemlösungscharakter und eine deutlich höhere Komplexität auf. Für die Entwicklung dieser Problemlösungsfunktionen wird auf bestehende und in Kapitel 4 analysierte Verfahren der Informationstechnik zurückgegriffen.

5.4.1 Produkt- und Fügefolgeanalyse

Die Analyse der Produkt- und Fügefolgemodelle umfasst verschiedene Teilfunktionen: Die Abschätzung hinsichtlich synchroner Arbeitsvorgänge, die Variantenanalyse, die Prozessüberführung und zuletzt die Festlegung von Vorrangbeziehungen. Die Lösungsfindung ist diesbezüglich deterministisch und das benötigte prozedurale Wissen ist explizit. Aus diesem Grund wird die Produkt- und Fügefolgeanalyse durch ein regelbasiertes Vorgehen gestaltet.

Zunächst sollen zwei Teilfunktionen genannt werden, die nicht primär Teil der hier behandelten Methode sind, jedoch eine Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Methode darstellen. Die Zugänglichkeitsüberprüfung umfasst in der Industrie bereits ein weit verbreitetes Simulationsverfahren, das überprüft, ob Standardwerkzeuge in der durch die Fügefolge festgelegten Aufbauzustände alle Fügeelemente erreichen (VDI 2008, S. 18). Die Bauteillagen und die Geometrie auskonstruierter Vorrichtungen und Werkzeuge werden dabei in der

Idealplanungsphase noch nicht berücksichtigt. Die zweite notwendige Untersuchung bezieht sich auf die Ausführung synchroner roboterbasierter Fügeprozesse. Unter der Berücksichtigung produktionstechnischer Randbedingungen können in hochautomatisierten Montageanlagen Fügeprozesse durch den Einsatz mehrerer Roboter parallelisiert werden. Die Festlegung der maximal an einem Aufbauzustand synchron arbeitender Roboter ist aufgrund vieler unbestimmter prozessualer und geometrischer Variablen in den frühen Planungsphasen nicht möglich. Zu den limitierenden Variablen zählen unter anderem die Fügereihenfolge einzelner Fügeelemente innerhalb der Fügeschritte, die Roboterposen und -bahnen zum Erreichen der Fügestelle, wie auch die Roboter-, Werkzeug- und Vorrichtungsgeometrien. Aufgrund dieser Hindernisse bedarf es für die Anzahl paralleler Fügeprozesse in den frühen Planungsphasen einer Abschätzung durch den Planer. Auch rechnergestützte Lösungen für die Abschätzung sind in Zukunft denkbar. Diesbezüglich existieren bereits heuristische Algorithmen, wie z.B. in (Lopes et al. 2017, 1038 ff.).⁶³

Die erste dieser Methode zugehörige Teilfunktion stellt die Analyse verschiedener Produktvarianten dar. Innerhalb jedes Fügeschritts können sich die Varianten untereinander durch die Zusammensetzung aus Einzelbauteilen bzw. (Teil-) Zusammenbauten durch die verwendeten Füge Technologien und durch die zugehörige Anzahl an Fügeelementen unterscheiden. Die folgende Abbildung 44 visualisiert exemplarisch eine Fügefolge, die aus zwei Varianten besteht.

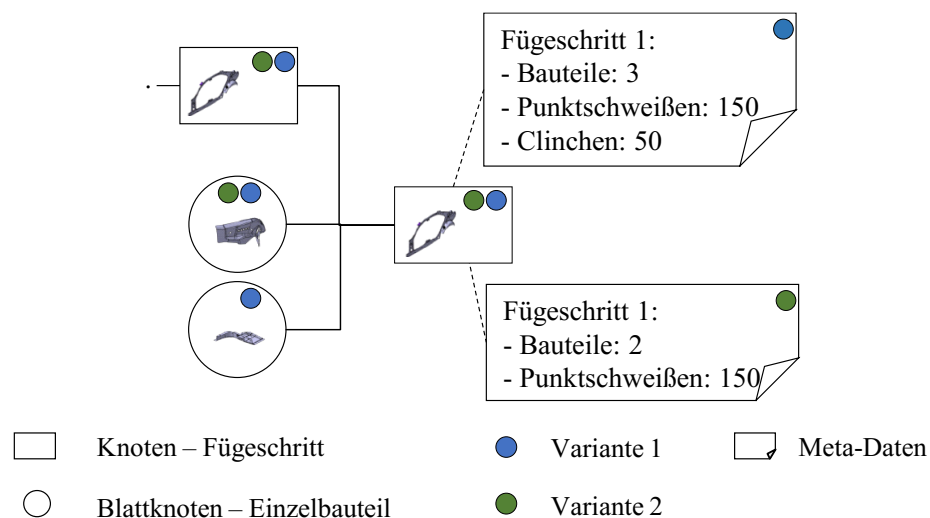


Abbildung 44: Analyse variantenbehaftete Fügefolge⁶⁴

Der dargestellte Füge Schritt 1 beinhaltet für beide Varianten das Fügeverfahren Punktschweißen und für die blaue Variante zusätzlich das Verfahren Clinchen. Für jede Variante sind die zugewiesenen Fügeelemente jedes Verfahrens aufgezeigt. Das Montagesystem, das für diesen

⁶³ Zuletzt soll betont werden, dass die Fügefolge eine Eingangsinformation für die hier entwickelte Methode darstellt. Das Modellieren der Fügefolge stellt also keine Funktion dieser Methode dar. Fügefolgen werden zumindest für Greenfield-Projekte und für die Idealplanungsphase ohne eine Stationsannahme erstellt. Dadurch kann jedoch nicht sichergestellt werden, dass aus jeder Fügefolge eine valide Stationsstruktur abgeleitet werden kann. Genau an dieser Stelle erschafft die hier entwickelte Methode jedoch einen großen Benefit, denn durch die automatisierte Stationsbildung, kann die Validität einer Fügefolgestruktur automatisiert überprüft werden. Zuvor musste die Validität einer Fügefolge über aufwendige manuelle Prozesse überprüft werden.

⁶⁴ Eigene Abbildung

Fügeschritt geplant wird, muss sowohl die Fähigkeiten sowie die Kapazität aufzeigen, diesen Fügeschritt in all seinen Variantenausprägungen auszuführen. Für die Variantenuntersuchung bedeutet dies, die Überschneidungen, bzw. Differenzen zwischen Varianten innerhalb eines jeden Fügeschritts automatisiert zu identifizieren. In frühen Planungsphasen existiert zumeist nur eine Variante mit vollständigen Fügeinformationen. Grund dafür ist die Parallelisierung der Entwicklungs- und Planungsprozesse nach dem Konzept des Simultaneous Engineering. Diese Parallelisierung führt zur zeitversetzten Integration weiterer Produktvarianten. In den frühen Planungsphasen unterliegen genau diese Produktvarianten noch großen Änderungen. In Abhängigkeit zu dem Reifegrad der einzelnen Varianten können weitere Vorbehalte angenommen werden. Innerhalb eines Taktes konkurrieren Handhabungsprozesse und Fügeprozesse, wodurch diese nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können. Jedes einzelne Bauteil führt zu Handhabungsprozessen und die Fügeelemente eines Fügeschrittes zu Fügeprozessen.

In der Funktion *Prozessüberführung & Standardprozesszuweisung* werden für die einzelnen Fügeschritte Handhabungs- und Fügejobs abgeleitet. Der Begriff „Job“ wurde in Abschnitt 5.1 sowie 5.3.1.4 eingeführt und beschreibt Fügeaufgaben, die aus dem Produkt- bzw. Fügefolgemodell abgeleitet wurden. Fügeaufgaben definieren sich durch den Abgleich der Produktanforderungen mit existierenden Prozessen in der Prozessbibliothek. In jedem Fügeschritt gibt es Fügeelemente, die sich auf Grund Ihrer Eigenschaften voneinander unterscheiden. Die Eigenschaften von Fügeelementen ergeben sich insbesondere aus den durch das Fügeelement zu verbindenden Flanschen. Wie sich die Eigenschaften eines Fügeelements aus den Flanschlagen ableiten, wurde in Kapitel 2.2.3 anhand von Abbildung 16 aufgezeigt. Jedem Fügeelement kann anhand seiner Eigenschaften genau ein Prozess aus der Prozessbibliothek zugeordnet werden. Einzelne Fügeaufgaben, die sich aus einem Fügeelement ableiten, die durch den gleichen Prozess ausgeführt werden können, werden in Jobs zusammengefasst.

Für jeden Fügeschritt können nach der Standardprozessbibliothek drei Arten von Handhabungsjobs festgelegt werden: das Einsammeln von Bauteilen aus Ladungsträgern (ES1) bzw. aus vorgelagerten Stationen, das Einlegen in die Vorrichtung (EL1) und das Entnehmen (EN1) des Zusammenbaus aus der Vorrichtung nach Fertigstellung des Fügevorgangs. Ein exemplarisches Beispiel für das Ableiten von Jobs ist in der folgenden Abbildung 45 abgebildet und bezieht sich auf den bereits durch Abbildung 44 eingeführten Fügeschritt. In dem Beispiel sind links die Jobs für das Einsammeln und Einlegen der Varianten zu sehen und rechts für den Entnahmevorgang. Der Entnahmevorgang ist für beide Varianten identisch und wird aus diesem Grund zu einem Job zusammengefasst. Das Eingangshandling wiederum unterscheidet sich aufgrund der abweichenden Anzahl an Bauteilen und führt zu variantenspezifischen Handhabungsjobs. In der Mitte sind die Fügejobs visualisiert. Auch Fügejobs ergeben sich durch Zuordnung der einzelnen Fügeelemente zu den Prozessen der Prozessbibliothek. Die entscheidenden Charakteristiken für die Zuordnung zu den Standardprozessen wurden in Abschnitt 5.2.1 in Tabellen dokumentiert. Jede Variante kann dabei verschiedene Jobs beinhalten oder Jobs unterschiedlicher Größe. Identische Jobs werden zusammengefasst, während Jobs, die sich in Ihren Eigenschaften unterscheiden, getrennt voneinander zu betrachten sind. So werden beispielsweise einzelne Clinchpunkte, für welche der gleiche Clinch eingesetzt wird, welche Stahlbauteile verbinden und zusätzlich geometriegebend sind, zu einem Job gruppiert, der sich an dem Standardprozess CG1 orientiert, siehe Abbildung 45. Gleichmaßen ist das

Verhalten für die diesbezüglich notwendigen Ausfügeelemente mit der Zuweisung des Standardprozesses CA1. Da nur die blaue Variante in diesem Fügeschritt Clinchpunkte beinhaltet, wird auch nur für diese Variante ein Clinch-Job abgeleitet. Anders ist das Verhalten für die Schweißpunkte, die für beide Varianten identisch sind und aus diesem Grund beiden Varianten durch die entsprechende Farbgebung zugeordnet sind.

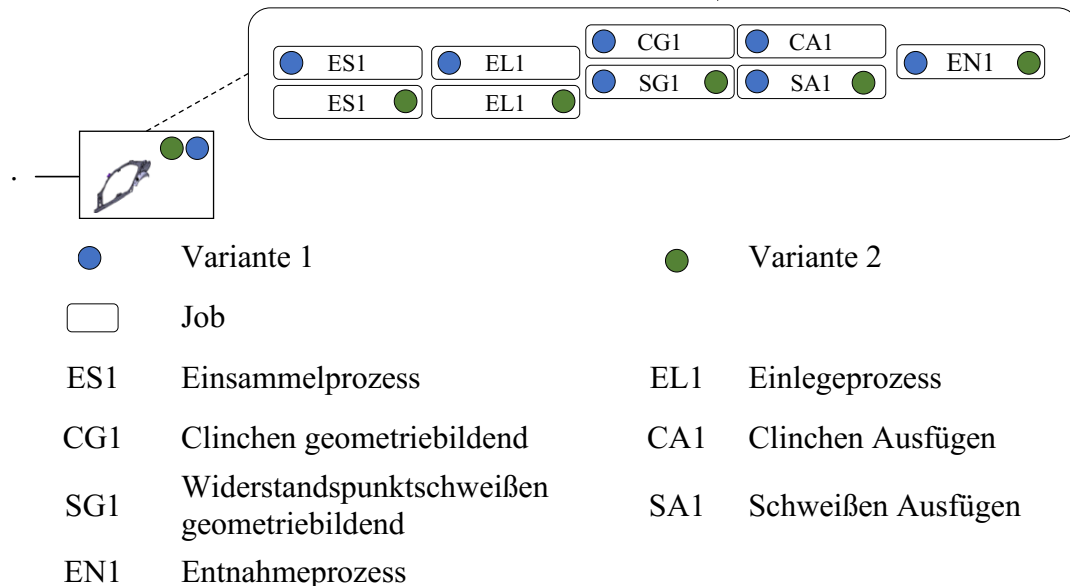


Abbildung 45: Prozessüberführung und Vorrangrelation⁶⁵

Die Produkt- und Fügefolgeanalyse umfasst zusätzlich die Festlegung von *Vorrangrelationen* zwischen den abgeleiteten Jobs. In Abbildung 45 sind entsprechende Vorrangrelationen dargestellt. Zunächst ist festzuhalten, dass Jobs unterschiedlicher Varianten untereinander keine Vorrangrelationen aufweisen, da Varianten in unterschiedlichen Takten unabhängig voneinander montiert werden. Die Festlegung der Vorrangrelationen⁶⁶ erfolgt auf Basis der in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Prozessprioritätsmatrix (w.2). In dieser werden generische Vorrangbeziehungen für die Prozesse festgelegt. Dadurch ist beispielsweise definiert, dass ein Fügeprozess erst starten kann, sobald alle für den Fügeprozess notwendigen Bauteile eingesammelt und in der Vorrichtung fixiert wurden. Folgend werden die definierten Jobs für das Eingangshandling der Bauteile prozessual vor dem Fügeprozess platziert. Gleichmaßen können Bauteile erst in Stationen des Folgeschrittes übergeben werden, sobald der Fügeprozess abgeschlossen ist. Zwischen den Clinch- und Schweißjobs besteht keine Vorrangbeziehung, allerdings stellt der Vorranggraph sicher, dass zunächst die geometrieebenenenden Elemente gesetzt werden, bevor der Ausfügeprozess startet. Nach Beendigung des Fügeprozess kann das Ausgangshandling starten. Die drei Prozessschritte, die Variantenanalyse, die

⁶⁵ Eigene Abbildung

⁶⁶ Die Festlegung der Vorrangrelation bedeutet nicht, dass eine Reihenfolge der Prozesse festgelegt wird. Die finale Festlegung der Prozessreihenfolge findet erst im Rahmen der Stationsbildung möglich. Jedoch können durch einen Vorranggraphen gültige Relationen vorgegeben werden, bzw. ungültige Relation ausgeschlossen. So kann über den Vorranggraphen definiert werden, dass Bauteile zunächst in eine Vorrichtung eingelegt werden müssen bevor geometriebildende Fügeelemente gesetzt werden können. Jedoch wird nicht festgelegt in welcher Reihenfolge verschiedene Elemente verschiedener Ausfügeverfahren gesetzt werden, denn diese Festlegung ist nur unter der Betrachtung der Stationsbildung möglich.

Ableitung der Jobs und die Festlegung der Vorrangrelationen stellen somit die Vorbereitung für die Stationsgestaltung dar, welche im Folgenden beschrieben wird.

5.4.2 Stationsgestaltung

Aus den zuvor kreierten Fügeaufgaben muss nun für jeden Fügeschritt ein kontextbezogener Produktionsprozess und eine dazugehörige Ressourcenstruktur entwickelt werden. Dieser Vorgang entspricht dem kreativen Gestaltungsprozess der Produktionsplanung. Die Struktur einer Anlage wird primär über die Anzahl von Stationen und deren Vorgänger-/ Nachfolgerbeziehung festgelegt. Der Inhalt einer Station wiederum wird durch den Montageprozess und die zugeordneten Ressourcen beschrieben. In Abbildung 46 ist ersichtlich, dass jedem Füge-schritt mehrere Stationen zugewiesen werden können. Diese bestehen aus einer Geostation, in welcher die geometriegebenden Fügeelemente gesetzt werden, damit der zusammengeheftete Zusammenbau in die darauffolgenden Ausfügestationen transferiert werden kann. In diesen werden alle weiteren Ausfügeelemente gesetzt, um die finale Struktur, Geometrie und Steifigkeit des Zusammenbaus sicherzustellen. In der Idealplanung werden die einzelnen Stationen, die einem Fügeschritt zugeordnet werden, sequenziell angeordnet.

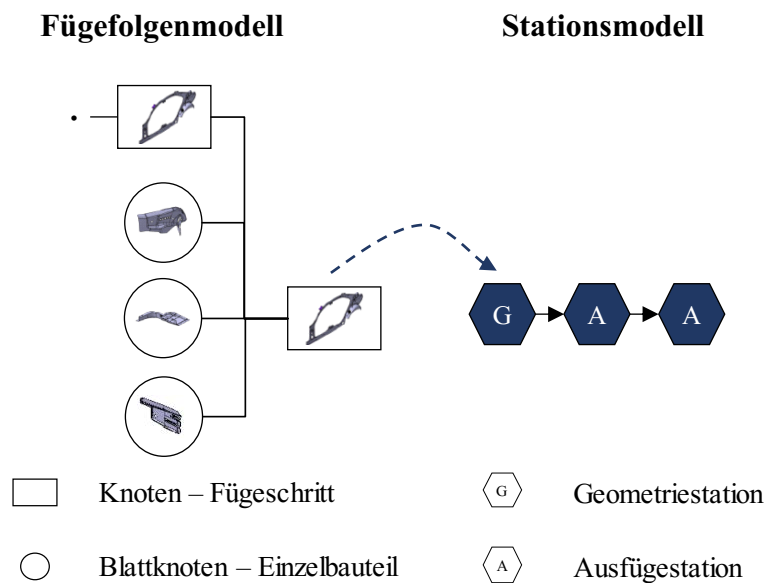


Abbildung 46: Ableitung Stationsstruktur⁶⁷

Die Anzahl der Ausfügestationen variiert und ist abhängig von den Inhalten der einzelnen Stationen sowie der Länge der Eingangsinformationen. Die stationsspezifische Ressourcenstruktur wird durch die zugehörigen Betriebsmittelmodule und -komponenten beschrieben, die der Betriebsmittelbibliothek (w.3) entnommen werden. Die entsprechenden Stationsprozesse werden äquivalent der Prozessbibliothek (w.1) entnommen und durch die Taktzeitprämisse c begrenzt. Die Taktzeitprämisse stellt einen sehr großen Einflussfaktor auf die Anlagengestaltung dar.

⁶⁷ Eigene Abbildung

Für die algorithmische Stationsgestaltung haben sich durch die Analyse möglicher Lösungsverfahren implizite Enumerationsverfahren bzw. exakte Suchverfahren als sehr geeignet herausgestellt, um das bereits beschriebene Optimierungsmodell in Abschnitt 5.3.2 zu lösen. Die Grundlogik dieser Problemlösungskomponente ist es, für die Problemstellung technisch sinnvolle und monetär optimale Anlagenkonfigurationen zu generieren, ohne dabei den vollständigen Lösungsraum untersuchen zu müssen. Das hier entwickelte implizite Suchverfahren basiert infolgedessen auf einem Branch and Bound Ansatz (BB). Im folgenden Abschnitt wird diesbezüglich das Branch and Bound Framework vorgestellt. Daraufhin wird die Suchstrategie eingeführt, die eine möglichst effiziente Suche innerhalb des Lösungsraums beabsichtigt.

5.4.2.1 Branch and Bound Verfahren

Es ist offensichtlich, dass die Anzahl der Gestaltungsalternativen sowohl in der Prozessgestaltung als auch für die Ressourcenstruktur durch die hohen Freiheitsgrade ein großes Ausmaß annehmen. Damit grenzt sich aus methodischer Komplexität die Problemlösungskomponente p.2 eindeutig von den sehr deterministisch geprägten Problemlösungselementen p.1 und p.3 ab. Dennoch sind die Vollständigkeit und Exaktheit in diesem Zusammenhang von sehr großer Bedeutung (vgl. Anforderung A.3), obwohl der Planer den großen Lösungsraum nur mit einem heuristischen Vorgehen beherrschen kann.

Es existieren nur eine begrenzte Anzahl an exakten Verfahren, die für das Lösen des eingeführten Optimierungsmodells in Frage kommen, wie die Untersuchung in Kapitel 4 ergeben hat. Diese exakten Verfahren sind beim Lösen NP-schwerer Probleme in ihrem Wachstum lediglich exponentiell beschränkt und führen dabei ab einer gewissen Länge der Eingabewerte zu entsprechend langen Berechnungszeiten. Die vollständige Enumeration stellt den naivsten Weg dar, Probleme solcher Art zu lösen. Jedoch steigt der Rechenaufwand dabei derart schnell, dass sie bei Anwendung industrieller Anwendungsfälle zu keiner akzeptablen Berechnungszeit führen. Aus diesem Grund werden, wenn möglich, implizite Verfahren angewandt, die trotz ihrer heuristischen Ansätze das Vollständigkeits- und Optimalitätskriterium erfüllen. Das hier vorgestellte Vorgehen basiert auf dem Branch and Bound (BB) Verfahren. Das BB Verfahren unterteilt (branch) Optimierungsprobleme in mehrere Teilprobleme, wie die folgende Abbildung 47 zeigt. Das Ausgangsproblem Q_0 wird dabei in Teilprobleme $Q_1 \dots Q_n$ aufgeteilt. Für jede Lösungsmöglichkeit u_i für das (Teil-) Problem Q_i folgt entsprechend ein weiteres Teilproblem Q_{i+1} , usw. Durch die Unterteilung entsteht ein Lösungsbaum, dessen Wurzel das erste Teilproblem Q_1 darstellt. Ein exemplarischer Lösungsbaum wird in der Abbildung 48 dargestellt. Der Lösungsraum wird dabei durch $U(Q_i)$ beschrieben. (Domschke et al. 2015, S. 140; Chen und Bushnell 1996, S. 4–5) Dieser Lösungsraum wird zunächst durch gegebene Randbedingungen limitiert und führt in diesem Kontext zur Sicherstellung der produktionstechnischen Sinnhaftigkeit. Darüber hinaus minimieren zwei Arten von Schranken (bound) effizient den Lösungsraum. Sogenannte untere Schranken $\underline{L}$ (auch globale Schranken genannt) sind Zielfunktionswerte für das Ausgangsproblem Q_0 (in diesem Fall valide Lösungen). Diese können durch Anwendung einer Heuristik abgeschätzt werden oder dynamisch anhand der bereits berechneten Lösungen bestimmt werden. (Schreier 2013, S. 43) Obere Schranken $\bar{L}_i$ werden hingegen spezifisch für die einzelnen Teilprobleme Q_i gebildet (aus diesem Grund auch lokale Schranken genannt) und basieren auf dem Lösen einer Relaxation Q'_i . Die Relaxation ist ein gegenüber Q_i vereinfachtes Problem, das zum Beispiel

durch das Weglassen einer Randbedingung gebildet wird. Damit gilt $Q(U_i) \subseteq Q(U'_i)$. (Domschke et al. 2015, S. 142) Durch die Zerteilung der Problemstellung in Teilprobleme und Funktionswerte, die sich aus den Teilproblemen ergeben, kann der Suchraum anhand der Schranken bereits während der Berechnung gezielt verkleinert werden. Führt beispielsweise die Lösung des Problems Q_i zu einem schlechteren Funktionswert als die globale Schranke $\underline{L}$, so kann dieser Lösungszweig verworfen werden. Dadurch, dass lediglich Teilmengen von U untersucht werden, wird das Branch and Bound Verfahren den impliziten Verfahren zugeordnet (Schreier 2013, S. 43).

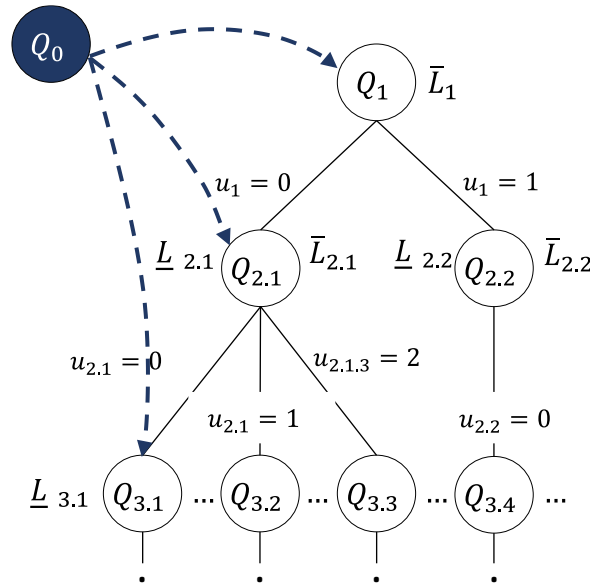


Abbildung 47: Lösungsbaum⁶⁸

5.4.2.2 Branching

Im Folgenden wird das BB Framework eingeführt, das entwickelt wurde, um das Problem Q_0 für die Prozess- und Stationsgestaltung zu lösen. Dabei wird in diesem Abschnitt zunächst auf das Branching eingegangen. Jeder Pfad einer möglichen Lösung für die Gestaltung einer Anlage dient der Bearbeitung eines Fügeschriffs. Der Pfad führt durch mehrere Suchbäume. Jeder der Bäume generiert Lösungen für eine Station. Zunächst für die Geostation, dem Problem Q_1 und darauffolgend für die Ausfügestationen $Q_2 \dots Q_n$. Das Generieren von Lösungen bezieht sich diesbezüglich sowohl auf die Prozessgestaltung als auch auf die Ressourcenauswahl. Anhand von Abbildung 48 und Abbildung 49 wird im Folgenden das Vorgehen erläutert. Dabei basiert das Beispiel der Abbildungen auf dem Fügeschritt der Abbildung 44 und die darauffolgenden Analyseergebnisse. Neben den Fügeschrittinformationen sind die folgenden Prämissen für dieses Beispiel zu nennen: maximale Anzahl an Fügerobotern an einer Vorrichtung $w_{crit} = 4$ und einer Taktzeitprämisse $c = 60$ s. Des Weiteren ist anzumerken, dass es aus Visualisierungsgründen leider nicht möglich ist, den kompletten Lösungsraum für dieses Szenario darzustellen. Infolgedessen wird ein expandierter Suchpfad aufgezeigt, welcher durch

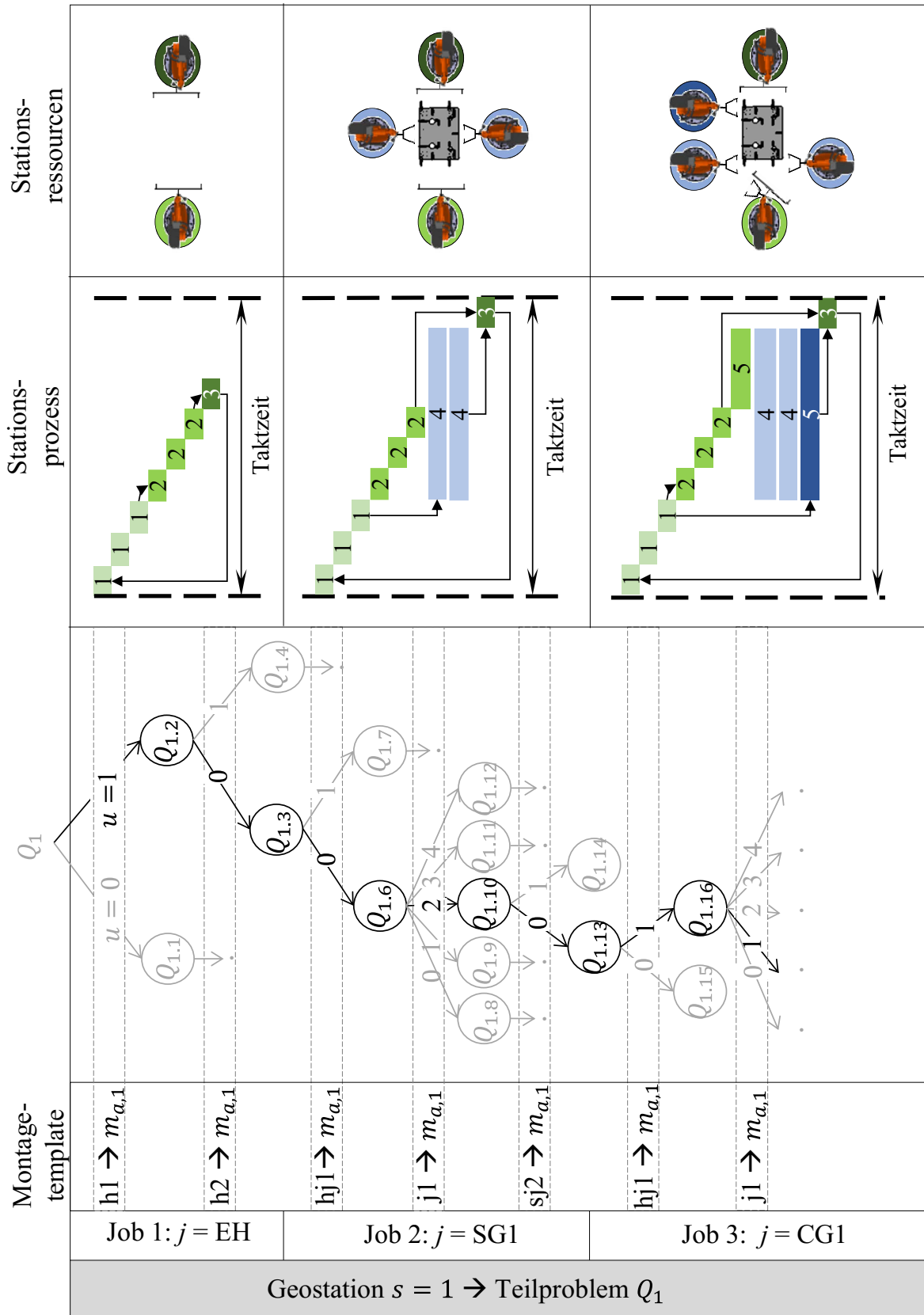
⁶⁸ Eigene Abbildung

die schwarzen Elemente erkennbar ist. Einzelne graue Knoten werden nicht weiter expandiert und dienen der Erläuterung der Ausprägungen der Montagetemplates.

Zunächst soll auf die einzelnen Suchbäume innerhalb des Branch and Bound Frameworks eingegangen werden. Links in Abbildung 48 ist ersichtlich, dass der dargestellte Suchbaum der Gestaltung von Geostationen dient – dem Teilproblem Q_1 . Der Suchbaum aus Abbildung 49 hingegen dient der Berechnung von Lösungsmöglichkeiten für die Gestaltung einer Ausfügestationen, also dem Teilproblem Q_2 . Dieser Station können dann weitere Ausfügestationen folgen, den Teilproblemstellungen $Q_{3...n}$. Das Problem der Anlagenkonzipierung wird also in mehrere Teilprobleme zerlegt, wobei jedes Teilproblem der Gestaltung einer Station dient. Ziel jedes Teilproblems ist es die beste Stationskonfiguration ε_s zu finden. Also für jeden Job j die Ausprägungen $m_{a,s}$ für die bestmögliche Verwendung jedes Montagetemplates a zu bestimmen. In Abbildung 48 ist auf der linken Seite die Logik innerhalb des Suchbaums aufgezeigt. Links ist zunächst erkenntlich, dass das Teilproblem Q_1 bearbeitet wird, in der nächsten Spalte werden die einzelnen Jobs j einzeln betrachtet und zuletzt die einzelnen Montagetemplates a . Für jede Kombination aus Station s , Job j und Montagetemplate a wird die dazugehörige Variable $m_{a,s}$ (Index: Station s , Montagetemplate a) für die Festlegung der Ausprägung des Templates bestimmt. Der Job j ist für die Fügetemplates gleichzeitig Hauptprozess (vgl. Tabelle 19). Die Wertebereiche der Variablen u für die jeweiligen Montagetemplates a sind in Wissenselement w.4 hinterlegt, vgl. Tabelle 19. Grundsätzlich ist bei der Verwendung der Montagetemplates hervorzuheben, dass sich das Verfahren flexibel gegenüber den Inhalten der Wissensbasis verhält. Werden weitere Montagetemplates in der deklarativen Wissensbasis hinterlegt, so werden diese hier in dem BB-Framework berücksichtigt.

Im Folgenden soll auf die Zuordnung der einzelnen Montagetemplates zu Stationen eingegangen werden. Die Zuordnung der Templates erfolgt über die Variable $m_{a,s}$ und weist Montagetemplates a den einzelnen Stationen s zu. Anhand der Teilprobleme Q_1 sowie Q_2 wird nun die Bestimmung der Variablen $m_{a,s}$ exemplarisch durchgeführt. Das Teilproblem Q_1 in Abbildung 48 wird zunächst in die zwei Teilprobleme $Q_{1.1}$ und $Q_{1.2}$ aufgeteilt. Die Variable u beschreibt die Ausprägung des Handlingtemplate h1. Der Wertebereich für die Variable ist $u = \{0,1\}$ und ist Tabelle 19 entnommen. In der Abbildung wird der Pfad dargestellt, für den $u = 1$ gilt. Somit wird über die Variable $m_{a,s}$ das Montagetemplate h1 mit der Ausprägung u und dem Hauptprozess j der Station 1 zugewiesen. Für die Gestaltung der Anlage ergeben sich damit die ersten prozess- und ressourcenseitigen Gestaltungsmerkmale, die in den zwei Spalten „Stationsprozess“ und „Stationsressourcen“ ersichtlich sind. Zu sehen sind sieben Handhabungsprozesse mit den Ziffern 1-3. Der letzte Schritt innerhalb des Taktes mit der Ziffer drei stellt den Entnahmeprozess dar, welcher für jede Station vorgesehen wird.

Die restlichen sechs Prozessschritte wurden nach der Logik des Templates h1 für die drei Bauteile hinzugefügt – drei für das Einlegen der drei Bauteile und drei für das Einsammeln der drei Bauteile. Gleichmaßen wird nach Template h1 der Ressourcenstruktur für diese Station ein Handhabungsrobotermodul hinzugefügt.



Stationsprozesse:

- 1 Standardprozess: EL1 – Einlegen
- 2 Standardprozess: ES1 – Einsammeln
- 3 Standardprozess: EN1 – Entnehmen
- 4 Standardprozess: SG1 – Geschweißen
- 5 Standardprozess: CG1 – Geoclinchen

Montageszenarien und -jobs:

Handhabungsszenario h1:	Sequenzielles Eingangshandling
Handhabungsszenario h2:	Eingangshandling mit Einsammelstation
Montageszenario hj1:	Greifer/Werkzeugkombination am Handhabungsroboter
Montageszenario sj2:	Stationäres Fügen mit Ausgangshandlingroboter
Fügeszenario j1:	Vorrichtungsbasiertes Fügen
Job EH:	Eingangshandling
Job SG1:	Vorrichtungsbasiertes Schweißen geometriebildend
Job CG1:	Vorrichtungsbasiertes Clinchen geometriebildend

Abbildung 48: Entscheidungsbaum Geostation⁶⁹

Die nächste Ebene bezieht sich auf das Teilproblem $Q_{1,2}$, in dem es die Variable $m_{a,s}$ für das Handhabungstemplate h2 zu bestimmen gilt. Das Handhabungstemplate hat ebenfalls zwei Ausprägungen, vgl. Tabelle 19. Für das in der Abbildung gezeigte Problem gilt es zusätzlich die Kombinierbarkeit des Montagetemplates innerhalb der Klasse zu betrachten. Denn das Montagetemplate h2 ist nicht mit anderen Templates der gleichen Klasse kombinierbar. Da h1 bereits der Station zugewiesen wurde, ist die Zuordnung des Templates h2 nicht zulässig. Unter Berücksichtigung dieser Information ist für das Problem $Q_{1,2}$ nur die Lösungsmenge $m(Q_{1,2}) = 0$ gültig. Das Montagetemplate h2 findet somit keine Verwendung. Für die Prozess- und Ressourcengestaltung ergeben sich für diesen Schritt somit keine inhaltliche Veränderung.

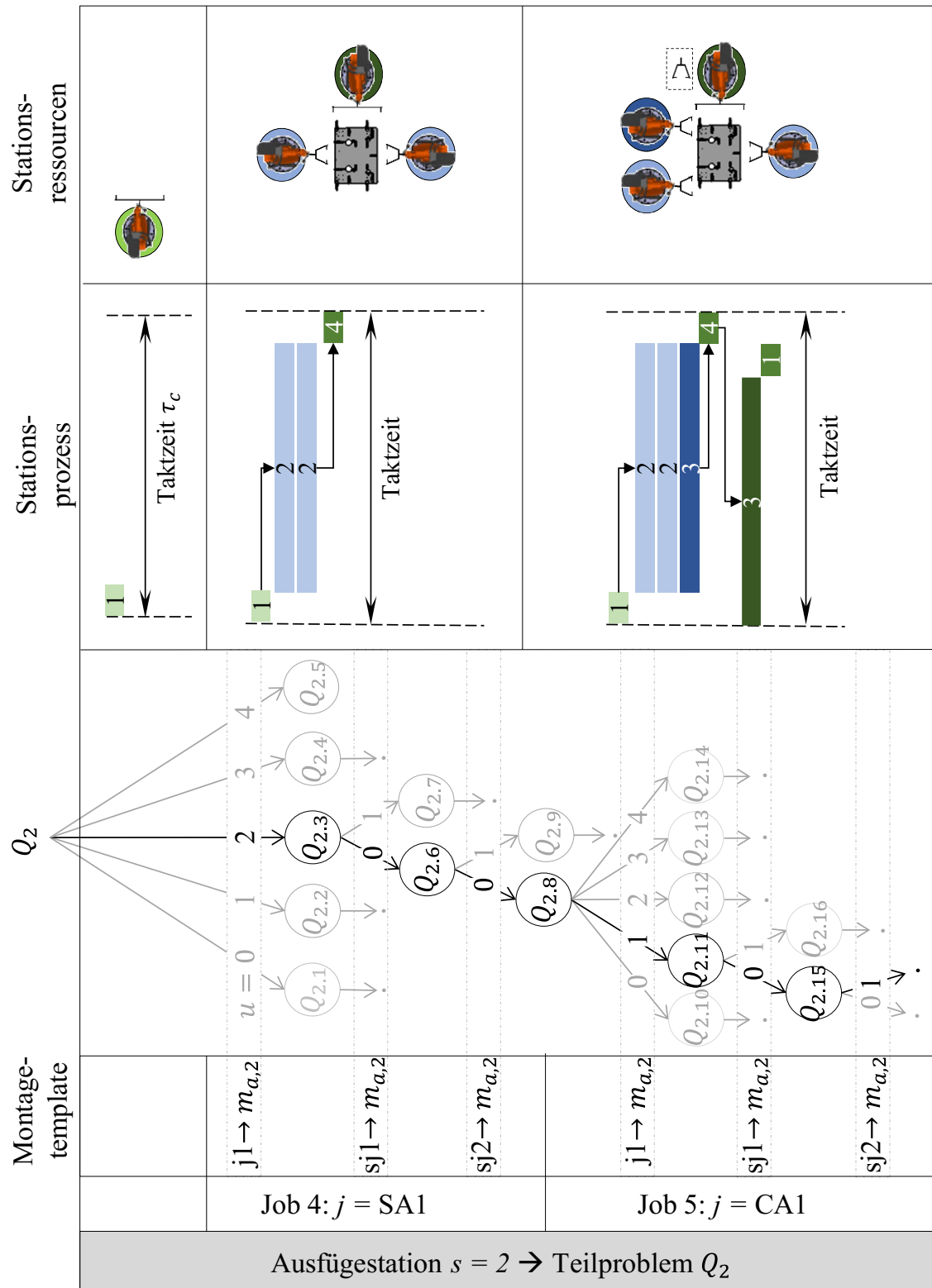
Nachdem Eingangshandling folgt die Gestaltung der Fügeprozesse. Betrachtet man den Vorranggraph in Abbildung 45, so folgen dem Eingangshandling die Geometrieprozesse für das Schweißen (SG1) und das Clinchen (CG1). Unter den zwei Jobs besteht keine Vorrangbeziehung. In diesem Fall werden zunächst die Gestaltungsmöglichkeiten für den Job SG1 untersucht. Die Untersuchungsreihenfolge von Jobs ohne Vorrangbeziehung hat keinen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Für den Job SG1 wird zunächst das Montagetemplate hj1 betrachtet, die Ausprägung des Templates hat einen Wertebereich von $u = \{0,1\}$. Das Template betrachtet, ob dem Eingangshandlingsroboter aus dem Template h1 neben dem Greifer, ein Fügewerkzeug hinzugefügt und dementsprechend ein Fügeprozess zugewiesen wird. In der Abbildung wird die Ausprägung $u = 0$ und damit $m_{as} = 0$ weiterverfolgt, welche zu keinen Änderungen in der Stationsgestaltung führt. In dem folgenden Teilproblem $Q_{1,6}$ wird Template j1 (konventionelles Fügen) untersucht. Die Variable u wird durch die maximale Anzahl an Fügerobotern $w_{crit} = 4$ in der Station beschränkt unter der Berücksichtigung der

⁶⁹ Eigene Abbildung

bereits verplanten Fügeroboter. In diesem Fall führt das zu $u = \{0,1,2,3\}$. In Abbildung 48 wird diesbezüglich der Fall $u = 2$ weiterverfolgt und über die Variable m_{as} der Station zugeordnet. Dadurch werden der Ressourcenstruktur eine Geometrievorrichtung und zwei Schweißmodule hinzugefügt und entsprechend zwei parallele Schweißprozesse. Zuletzt wird das Füge-template sj2 in Teilproblem $Q_{1,10}$ betrachtet mit dem Wertebereich $u = \{0,1\}$. In dem vorliegenden Beispiel wird $u = 0$ und $m_{as} = 0$ damit weiterverfolgt und verursacht damit keine Änderungen in der Station. Das Montagetable sj1 wird nicht für die Geometriestation berücksichtigt, da es nicht für geometriegebende Prozesse geeignet ist. Dieses Template untersucht, ob der Handhabungsroboter, der für das Entnehmen des Zusammenbaus aus der Station zuständig ist, mit einem stationären Werkzeug ausgestattet werden soll.

Gleiches Vorgehen wird für Job 3 wiederholt, dem Clinchen mit Geometrierelevanz. Dabei werden die bereits für Job 1 und Job 2 zugeordneten Ressourcen und Prozesse berücksichtigt. Aber auch die Kombinierbarkeit mit den bereits gestalteten Prozessen muss berücksichtigt werden. Zunächst wird diesbezüglich die Variable u betrachtet, die die Ausprägung für Template hj1 bzw. den Einsatz von Doppelequipment für Job 3 bestimmt. Da für Job 1 noch kein Doppelequipment verwendet wurde, besteht weiterhin der Wertebereich von $u = \{0,1\}$. Der dargestellte Pfad betrachtet nun die Verwendung von Doppelequipment für Job 3 und somit $u = 1$. Dem Eingangshandlingroboter wird somit zusätzlich ein Werkzeug hinzugefügt und ein Fügeprozess, der nach dem Einsammelprozess startet. Darauf folgend wird der Station auf Basis von Variablen ε für Template j1 mit Ausprägung u und Job j ein weiterer konventioneller Fügeprozess und Fügeroboter hinzugefügt. Zu diesem Zeitpunkt wurden für dieses Beispiel alle geometriegebenden Jobs betrachtet und alle Montagemplates für die Gestaltung der Station berücksichtigt. Sobald alle geometriegebenden Jobs vollständig Montageprozessen zugeordnet sind, werden die Jobs betrachtet, die Ausfügeprozesse erfordern.

Nun wird die Gestaltung der ersten Ausfügestation initiiert und betrachtet, siehe Abbildung 49. Diesbezüglich wird für die neue Station 2 ein neuer Suchbaum expandiert, dieser Vorgang kann auf jeder gültigen Lösung der Geostation basieren. Nach gleicher Vorgehensweise werden auch für die Ausfügestationen Teilprobleme nach den Standardmontagemplates gebildet, das soeben beschriebene Beispiel für die Geostation wird dabei in Abbildung 49 für die Ausfügestation weitergeführt. Im Gegensatz zu den Geometriestationen müssen für Ausfügestationen nicht einzelne Einzelbauteile oder ZBs aus Vorstationen eingesammelt werden. Für das Einlegen des in der Geostation zusammengehefteten Zusammenbaus in die Ausfügestation wird somit der Ausgangshandlingroboter der Vorgängerstation genutzt. Der Prozess wurde für diesen Roboter vorgesehen und ist in Abbildung 49 bereits unter der Ziffer 1 zu finden. Dieser Handhabungsroboter ist somit gesondert zu betrachten, da er der Vorgängerstation angehört, jedoch auch einen Prozess dieser Station durchführt. Der Roboter legt durch das Einlegen den Taktbeginn für die Ausfügestation fest. Im Gegensatz zu den Geostationen müssen für Ausfügestationen keine weiteren Handhabungstemplates betrachtet werden. Das Verfahren entnimmt dieses Wissen dem Ausfügeprozessattribut der Tabelle 19. Für dieses Beispiel wurden in Abbildung 49 zwei konventionelle Fügerobotermodule für Job1 hinzugefügt, also mit $u = 2$ und ein Roboter für das Entladen der Vorrichtung. Des Weiteren wurde ein konventioneller Prozess für Job 2 über $u = 1$ eingefügt und stationärer Prozess über $u = 1$, der dem Ausgangshandlingroboter zugeordnet wurde. Für das vorliegende Beispiel endet die Berechnung der Stationsgestaltung an diesem Punkt.



Stationsprozesse:

- 1 Standardprozess: EL1 – Einlegen
- 4 Standardprozess: EN1 – Entnehmen
- 2 Standardprozess: SA1 – Ausschweißen
- 3 Standardprozess: CA1 – Ausclinchen

Montageszenarien und -jobs:

Montageszenario sj1:	Stationäres Fügen in eigenem Takt
Montageszenario sj2:	Stationäres Fügen mit Ausgangshandlingroboter
Fügeszenario j1:	Vorrichtungsbasiertes Fügen
Job EH:	Eingangshandling
Job SA1:	Vorrichtungsbasiertes Ausschweißen
Job CA1:	Vorrichtungsbasiertes Ausclinchen

Abbildung 49: Entscheidungsbaum Ausfügestation⁷⁰

5.4.2.3 Suchstrategie

Suchstrategien beschreiben die Reihenfolge, in welcher die verzweigten Probleme des Lösungsbaums gelöst und expandiert werden. Sie haben einen großen Einfluss auf die Algorithmeneffizienz. Wie zuvor eingeführt, wird in dem BB-Verfahren das betrachtete Problem in einzelne Teilprobleme aufgeteilt. Die Reihenfolge, in welcher diese Teilprobleme expandiert werden, wird nicht durch das BB-Verfahren vorgegeben. Die meist verbreiteten uninformatierten Suchstrategien sind die Breiten- (engl. Breadth-first-search, BFS) und die Tiefensuche (engl. Depth-first-search, DFS) (Ertel 2009, 99 ff.). Uniformierte Suchstrategien zeichnen sich dadurch aus, dass sie bei der Festlegung der Reihenfolge neben der Problembeschreibung keine weiteren Informationen nutzen (Russell und Norvig 2012, S. 116). Bei der Tiefensuche wird jeweils das zuvor bearbeitete Problem weiter expandiert und bearbeitet. Nach Abbildung 47 würde die Tiefensuche den Lösungsbaum in der folgenden Reihenfolge expandieren: Q_1 , $Q_{2.1}$, $Q_{3.1}$, $Q_{3.2}$, $Q_{3.3}$, $Q_{2.2}$, $Q_{3.4}$. Dabei kann unterschieden werden zwischen der reinen Tiefensuche und der Tiefensuche mit vollständiger Verzweigung. In der reinen Tiefensuche wird zunächst nur ein Teilproblem gebildet, in der vollständigen Tiefensuche hingegen wird das Problem direkt vollständig in Teilprobleme aufgeteilt. Die Breitensuche expandiert die Teilprobleme, wie der Name bereits vorgibt, in der Breite und führt für den gegebenen Lösungsbaum zu folgender Expansionsreihenfolge: Q_1 , $Q_{2.1}$, $Q_{2.2}$, $Q_{3.1}$, $Q_{3.2}$, $Q_{3.3}$, $Q_{3.4}$. Basierend auf diesen zwei Verfahren wurden zahlreiche Suchstrategien entwickelt, selbst eine Kombination dieser Verfahren ist möglich (z.B. durch das Iterative Deepening). Der Einsatz von Domänenwissen für die Festlegung der Reihenfolge durch Heuristikfunktionen wird als informierte Suche oder heuristische Suche bezeichnet (Russell und Norvig 2012, S. 116). Der Einsatz von Heuristikfunktionen für die Reihenfolgefestlegung kann bei optimalen Verfahren zu einem effizienteren Vorgehen führen. Eine diesbezüglich häufig Anwendung findende Suchstrategie ist die A*-Suche (Russell und Norvig 2012, S. 128–133). Die A*-Suche expandiert Probleme in der Reihenfolge, in der eine Heuristikfunktion diese bewertet. Demnach werden die

⁷⁰ Eigene Abbildung

Teilergebnisse zuerst weiterverfolgt, die nach der Heuristikfunktion das höchste Potential aufweisen. Dabei wird lediglich die Reihenfolge der Suche verändert mit dem Ziel, frühzeitig gute Ergebnisse zu berechnen. Die frühzeitige Berechnung guter Ergebnisse führt gleichermaßen zu frühen guten Schranken $\underline{L}$ und somit zu der Verkleinerung des Lösungsraums während der Berechnung. (Sabel 2013, S. 40–44)

Das vorliegende Verfahren basiert auf der Tiefensuche unter Anwendung von Backtracking (reine Tiefensuche). Das Backtracking verfolgt einen Pfad nach der Logik der Tiefensuche so lange bis absehbar ist, dass dieser nicht zu einer optimalen Lösung führen kann. Zu diesem Zeitpunkt springt das Verfahren zurück auf das letzte offene Problem (Korte und Vygen 2012, S. 3–4; Russell und Norvig 2012, S. 123; Schöler et al. 2019, S. 96–98). Die folgenden Argumente verdeutlichen die Entscheidung für diese Suchstrategie:

- (i) Vollständigkeit und Exaktheit: in der Theorie ist die Tiefensuche nicht endlich und damit weder vollständig noch optimal. In dem hier beschriebenen Anwendungsfall handelt es sich um einen Lösungsbaum endlicher Tiefe, da iterativ die einzelnen Montageverfahren abgearbeitet werden. Das bedeutet gleichermaßen, dass alle Pfade endlich sind und somit die Tiefensuche in diesem Anwendungsfall vollständig und optimal ist.
- (ii) Schnelle und gute untere Schranken: die Tiefensuche ermöglicht den Vergleich zwischen dem sich in der Berechnung befindlichen Suchpfad und bereits berechneter Lösungen und führt damit frühzeitig zu guten unteren Schranken $\underline{L}$, insbesondere im Vergleich zur Breitensuche. Während der Berechnung kann der Algorithmus also genau die Lösungen verwerfen, die schon vor Pfadende kein Potential mehr haben, das bisher beste Ergebnis zu übertreffen. Kinderknoten dieser Lösung müssen somit nicht mehr in Betracht gezogen werden. Das BB Verfahren in Kombination mit der Tiefensuche führt diesbezüglich zu einer signifikant geringeren Anzahl an Kombinationen.
- (iii) Speicherbelegung für Industrialisierung des Verfahrens: im Vergleich zu anderen Suchstrategien hält die Tiefensuche nach Bedarf nur die beste bisherige Lösung und den aktuellen Teilpfad im Arbeitsspeicher und ist damit nicht speicherintensiv (Russell und Norvig 2012, S. 123).
- (iv) Der Einsatz von Heuristikfunktionen wurde für die effizientere Steuerung der Tiefensuche in Erwägung gezogen. Allerdings gibt es keine fundierten Anhaltspunkte für die Erstellung einer Heuristikfunktion für die Gestaltung von Anlagen. Ob Effizienzsteigerungen durch eine Heuristikfunktion erreicht werden können, müsste aus diesem Grund experimentell ermittelt werden und wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt.

5.4.2.4 Bounding

Während des Absuchens des Lösungsraums müssen die einzeln expandierten Knoten auf ihre Gültigkeit überprüft werden (Einhaltung der Nebenbedingungen) und die gültigen (Teil-) Lösungen müssen mit den formulierten Schranken abgeglichen werden.

Bounding durch Randbedingungen

Einige Nebenbedingungen sind bereits durch das Optimierungsframework berücksichtigt⁷¹. Im Folgenden wird auf die Einhaltung aller weiteren Nebenbedingungen eingegangen. Randbedingung (5.31) erfordert, dass alle einem Takt zugeordneten Prozesse innerhalb der gegebenen Taktzeitprämisse abgehandelt werden können. Diesbezüglich ist die kontextabhängige Berechnung der Prozessdauer notwendig. Ein standardisiertes Vorgehen ermöglicht die Berechnung anhand des Prozessgraphenmodells:

- (i) Berechnung der benötigten Prozesszeit für Handhabungsprozesse.
- (ii) Überprüfung, ob die Handhabungsprozesse des Taktes die Taktzeitgrenze übersteigen.
- (iii) Berechnung der für den Fügeprozess zur Verfügung stehenden Zeit und somit der impliziten Berücksichtigung der Taktzeitprämisse.⁷²

Zunächst soll auf Punkt (i) weitergehend eingegangen werden. Für die Handhabungstemplates ist die Anzahl der Bauteile, die gehandhabt werden müssen, ausschlaggebend für die entsprechende Anzahl an Prozessschritten und die benötigte Prozesszeit innerhalb eines Taktes. Die Gleichungen (5.32) und (5.33) beschreiben, wie viel Zeit für die Handhabungsprozesse benötigt wird. Diesbezüglich stellt die Variable $d_{ES,s}$ die Zeit dar, die in Station s benötigt wird, um nach Montagetemplate h1 die Anzahl n_f an Bauteilen (oder Zusammenbauten) aus Ladungsträgern einzusammeln. Gleichmaßen beschreibt die Variable $d_{EL,s}$ die benötigte Zeit für eine Station, um die Bauteile in eine Vorrichtung zu positionieren. Die dazugehörige Standardprozesszeit d_{EL} beschreibt die Dauer für die Handhabung eines Bauteils und ist Tabelle 13 entnommen.

$$d_{ES,s} = n_f * \tau_{ES} \quad (5.32)$$

$$d_{EL,s} = n_f * \tau_{EL} \quad (5.33)$$

Nach dem Fügeprozess müssen die Bauteile aus der Vorrichtung entnommen werden und für die Übergabe in die nächste Station bereitgestellt werden. Da am Ende einer jeden Station die

⁷¹ Über das Optimierungsframework ist bereits die Einhaltung der Randbedingungen (5.10), (5.14), (5.15) und (5.18) des Optimierungsmodells sichergestellt. Somit wird in diesem Kapitel die Überprüfung der Randbedingungen (5.6), (5.8), (5.17) und (5.31) während des Berechnungsvorgangs erläutert. Das Optimierungsmodell ist auf Seite - 86 - ff. zu finden.

⁷² In dem hier entwickelten Problemlösungsverfahren wurde darauf verzichtet zu berücksichtigen, dass unterschiedliche sequenziell ablaufende Fügeprozesse untereinander um Zeitanteile konkurrieren können. Diese Entscheidung wurde auf Basis von umfassenden Voruntersuchungen getroffen. Die Voruntersuchungen haben ergeben, dass die Berücksichtigung eine hohe algorithmische Komplexität hervorruft, allerdings aus produktionstechnischer Sicht keinen nennenswerten Mehrwert liefert.

Bestandteile eines Zusammenbaus bereits miteinander verbunden sind, können diese in einem Prozessschritt in die Folgestation gehandhabt werden und die Anzahl an Bauteilen entspricht dementsprechend eins.

Nach Punkt (ii) müssen nun die errechneten Werte den Stationsprozess übernommen werden und die aktuelle Gesamtprozessdauer c bestimmt werden. Ist die Prozessdauer aller Handhabungsprozesse, die einem Takt zugeordnet sind, bereits zu diesem Zeitpunkt länger als die Taktzeitprämisse, so wird Nebenbedingung (5.31) nicht erfüllt und die aktuelle Lösung ist nicht gültig. Der Pfad wird demnach nicht weiterverfolgt. In Abbildung 48 ist zu sehen, dass für Teilproblem $Q_{1.2}$ die berechneten grünen Prozessschritte nicht die Taktzeitprämisse überschreiten. Aus diesem Grund kann der Pfad weiter expandiert werden.

Zuletzt wird auf Punkt (iii) eingegangen. Die Berechnung der für den Fügeprozess i zur Verfügung stehenden Zeit erfolgt durch die Differenz der Prozessvorgänger und Nachfolger von der Taktzeit. Die Gleichung (5.34) zeigt ein Beispiel für das Teilprobleme $Q_{1.6}$ mit Template j1 und Teilproblem $Q_{1.13}$ mit Template hj1. Die Fügezeit $d_{i,max}$ für Template j1 in Teilproblem $Q_{1.6}$ wird durch die Differenz der Taktzeitprämisse c_τ und den Handhabungsprozessen EL und EN berechnet. Das Einsammeln von Bauteilen muss nicht berücksichtigt werden, da dieses parallel zum Fügeprozess stattfinden kann. Für das Template hj muss zusätzlich die Zeit für das Einsammeln von Bauteilen berücksichtigt werden, denn dieses wird von dem Handhabungsroboter durchgeführt, der auch die Bauteile einsammelt.

$$d_{i,max} = \begin{cases} \text{in } Q_{1.6} \text{ mit } j1, & c_\tau - (d_{EL} + d_{EN}) \\ \text{in } Q_{1.13} \text{ mit } hj1, & c_\tau - (d_{ES} + d_{EL} + d_{EN}) \end{cases} \quad (5.34)$$

Nach der Berechnung der für den Fügeprozess zur Verfügung stehenden Zeit findet die Berechnung der maximalen Anzahl an Fügeelementen statt, die in dieser Zeit gefügt werden können. Die berechnete Anzahl an Fügeelementen wird dann dem Fügeprozess und den zugehörigen Ressourcen zugeordnet. Sobald alle Fügeelemente einem Fügeprozess zugeordnet sind, wird das Suchverfahren abgebrochen, dies entspricht dem sogenannten Abbruchkriterium. Die folgende Gleichung (5.35) ermöglicht die Berechnung der möglichen Fügeelemente o_{is} innerhalb der berechneten Fügezeit $d_{i,max}$ und der Standardprozesszeit τ_i . Die Zuordnung der einzelnen Fügeelemente e zu den entsprechenden Prozessen findet auf Basis der binären Hilfsvariable y_{eis} statt. Auf dieser Basis wird überprüft, ob alle Fügepunkte zugewiesen wurden, und entspricht der Überprüfung der Nebenbedingung (5.17). Diese Überprüfung dient als Abbruchkriterium.

$$o_{is} = \left\lfloor \frac{d_{i,max} * \tau_i}{p_i} \right\rfloor \quad (5.35)$$

Des Weiteren müssen die folgenden Randbedingungen für jede Teillösung überprüft werden. Nebenbedingung (5.6) überprüft die Einhaltung einer minimalen Verfügbarkeit jeder Station. Gleichermaßen muss die maximale Anzahl an Robotern berücksichtigt werden, wie in Randbedingung (5.8) beschrieben ist.

Bounding durch Schranken

Neben der Überprüfung der Randbedingungen soll nun auf die Überprüfung der Schranken eingegangen werden. Zunächst werden in diesem Absatz die Schranken festgelegt, danach wird beschrieben, wie diese für jedes Teilproblem überprüft werden. Die untere globale Schranke $\underline{L}$ bildet sich für diese Methode durch die beste⁷³ bereits berechnete Lösungen K^* , vgl. (5.36). Jede (Teil-)Lösung, die für ein Problem berechnet wird, muss diesbezüglich nach Gleichung (5.37) mit der unteren Schranke verglichen werden. Ist diese kleiner als die untere Schranke, so stellt diese Lösung die neue untere Schranke dar.

$$\underline{L} = K^* \quad (5.36)$$

$$K \leq \underline{L} \quad (5.37)$$

Die obere Schranke $\bar{L}$ wird anhand einer Relaxation Q'_i gebildet. Anhand der Relaxation wird abgeschätzt, welchen Wert der Funktionswert K mindestens annimmt, wenn der aktuelle Lösungspfad weiterverfolgt wird. Es wird also abgeschätzt, auf welche Kosten die aktuelle Lösung mindestens steigt, um die Zuweisung aller Fügeelemente sicherzustellen. Die Bildung der Relaxation basiert auf der Menge noch nicht zugewiesener Fügepunkte. Also allen Fügeelementen der Menge E_j , ohne der Menge der bereits zugewiesenen Fügeelemente o_j des Jobs j . Relaxationen werden im Allgemeinen durch die Lockerung von Randbedingungen gebildet. In diesem Fall ignoriert die Relaxation die Unterscheidung zwischen geometriegebenden Fügeelementen und Ausfügeelementen. Zusätzlich erfolgt die Relaxation unter der Annahme, dass alle noch offenen Fügeelemente nach Montagetemplate j1 abgearbeitet werden. Anhand der noch zuzuweisenden Fügeelemente wird dementsprechend eine Abschätzung getroffen, wie viele Fügeroboter zusätzlich und mindestens benötigt werden, um die offene Menge an Fügeelementen zu fügen. Die Kosten für Vorrichtungen und Handhabungsroboter werden dabei nicht berücksichtigt. Gleichung (5.38) schätzt die Anzahl benötigter Fügeroboter w_s für einen Job j ab. Die für das Fügen zur Verfügung stehende Zeit innerhalb eines Taktes wird durch den Zähler der Gleichung (5.38) bestimmt. Sie berechnet sich aus der Differenz der Zykluszeit c und den Handhabungszeiten für das Eingangs- und Ausgangshandling. Gleichung (5.39) berechnet den Wert K' für das Relaxationsproblem Q' für alle Fügejobs und bildet sich aus der Summe über die benötigten Roboter multipliziert mit dem Kostenwert eines Robotermoduls k_{RB} . Zuletzt berechnet Gleichung (5.40) die obere Schranke L_i , also die sich bisher ergebenen Kosten aus dem Lösungspfad K_i addiert mit der Kostenabschätzung durch die Relaxation K' . Die obere Schranke stellt also eine sehr optimistische Kostenabschätzung dar, die unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen nicht erreicht werden kann, dient aber als Schranke, um den Lösungsraum zu limitieren.

⁷³ fitteste Lösung nach Zielfunktion

$$w_S = \frac{\tau_i * (E_j - o_j)}{c - (d_{EL} + d_{EN})} \quad (5.38)$$

$$K'_i = \sum_{j \in J} (w_S * k_{RB}) \quad (5.39)$$

$$\bar{L}_i = K_i + K'_i \quad (5.40)$$

Für jedes Problem Q_i müssen folgend unter Zuhilfenahme der oberen und unteren Schranke die folgenden drei Fälle abgeprüft werden.

$$(i) \quad \bar{L} > \underline{L} \quad (5.41)$$

$$(ii) \quad \bar{L} < \underline{L} \quad (5.42)$$

$$(iii) \quad U(Q_i) = \emptyset \quad (5.43)$$

Fall (i) bedeutet, dass der aktuell betrachtete Pfad nicht mehr zu einer besseren Lösung führen kann, denn selbst unter Annahme der sehr optimistischen Kostenabschätzung (durch die Relaxation) ergibt sich kein besserer Funktionswert als die momentan beste Lösung K^* . Der Pfad wird aus diesem Grund nicht weiterverfolgt. Fall (ii) deutet auf weiteres Potential des Pfads hin. Aus diesem Grund wird das Problem weiter verzweigt mit dem Ziel einer besseren Lösung. Zuletzt beschreibt Fall (iii), dass für die aktuelle Problemstellung unter den gegebenen Randbedingungen keine Lösung gefunden wird. Der Lösungsraum U für das Problem Q_i ist somit leer, auch für diesen Fall wird der Pfad des Lösungsbaums nicht weiterverfolgt. (Domschke et al. 2015, S. 141)

5.4.3 Systembildung

Die letzte Funktion der hier beschriebenen Methode befasst sich mit der *Systembildung*. Die Systembildung hat zum Ziel, die einzelnen Stationsverbünde, die durch die Problemlösungsfunktion p.2 generiert wurden, in ein zusammenhängendes Montagesystem zu überführen. Diesbezüglich werden die für die einzelnen Fügeschritte erstellten Stationsverbünde nach der Logik der Fügestruktur zusammengeführt. Die folgende Abbildung 50 zeigt die Funktionsweise der Systembildung auf. Im linken Teil des Bildes sind die Stationsverbünde S_f , $S_{f'}$ und S_g dargestellt, welche durch die Problemlösungsfunktion p.2 für die Fügeschritte f , f' und g erstellt wurden. Im rechten Teil des Bildes wird aus den Stationsverbünden ein Gesamtsystem gebildet. Dies umfasst die prozess- und ressourcenseitige Gestaltung der Übergänge zwischen den Stationsverbünden, die in der Abbildung durch die hellblauen Kanten gekennzeichnet ist. Die Zusammenführung basiert auf den Kanten des Fügefolgemodells. Ein Stationsverbund S_f , der dem Fügenschritt f abgeleitet wurde, ist Vorgänger des Stationsverbands S_g , denn dessen Fügenschritt g ist gleichermaßen direkter Nachfolger des Fügenschritts f .

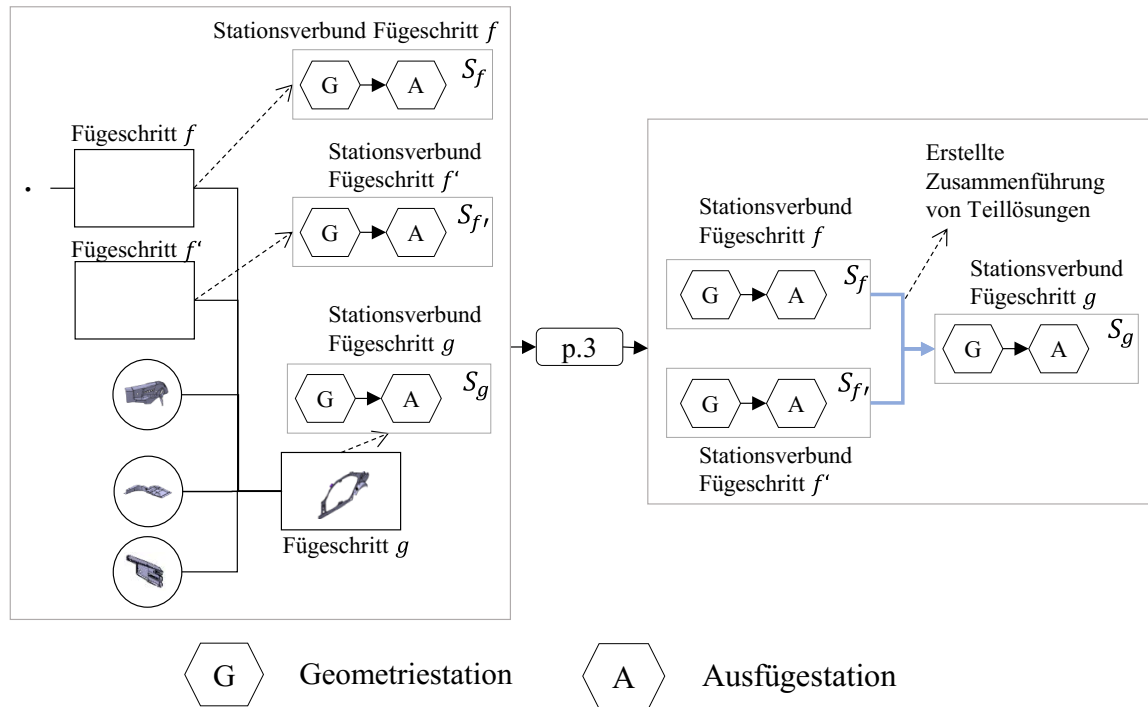


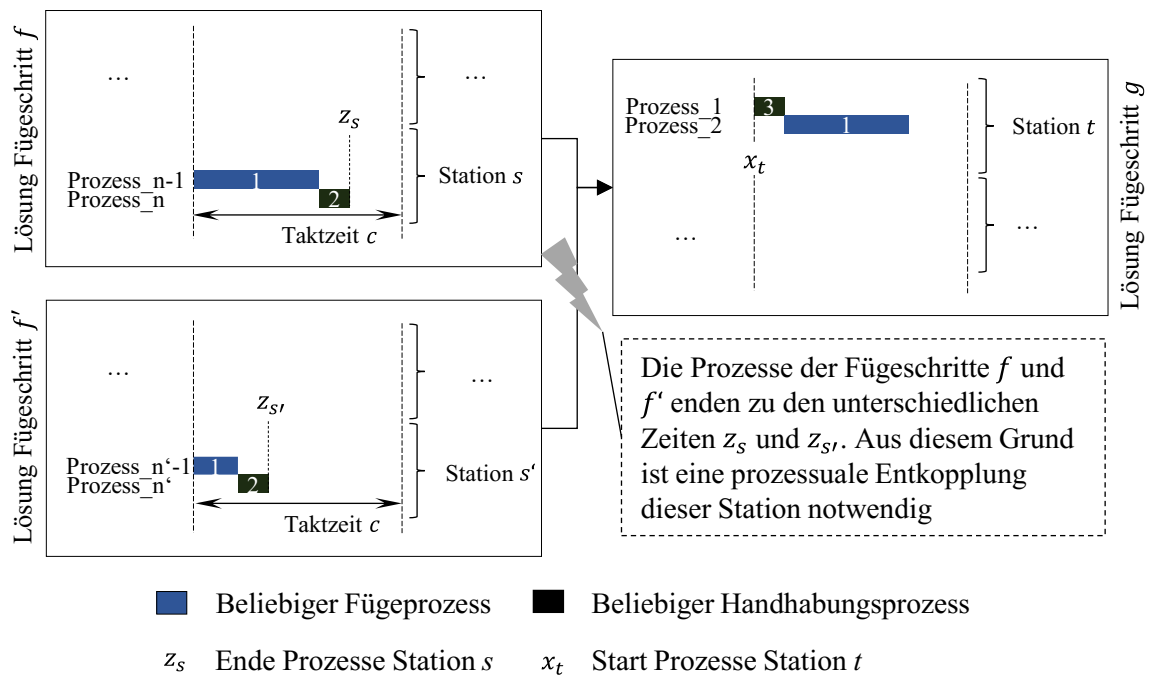
Abbildung 50: Funktion Systembildung⁷⁴

Hinsichtlich der Gestaltung der Übergänge der einzelnen Stationsverbände sind die folgenden Gesichtspunkte zu beachten:

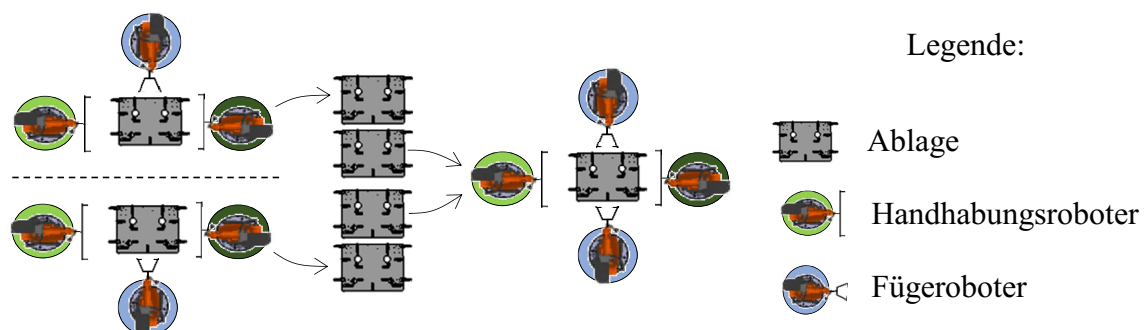
- Gestaltung des Transfers in die Folgestation
- Zeitliche Entkopplung der Stationsverbände

Zunächst wird auf den Bauteiltransfer zwischen den Stationsverbänden eingegangen. Durch Problemlösungskomponente p.2 wurden die einzelnen Stationsverbände gebildet. Jede der Stationen eines Verbands wurde diesbezüglich mit einem Handhabungsroboter ausgestattet, der für den Transfer in die Folgestation zuständig ist. Die Gestaltung des Transfers zwischen Stationsverbänden gestaltet sich aus mehreren Gründen als komplex. Zunächst ist zu erwähnen, dass die Stationen der einzelnen Stationsverbände zumeist aus Layoutsicht weit auseinanderliegen. Das direkte Einlegen der Produkte durch den Handhabungsroboter ist somit schon aus geometrischer Sicht schwer umzusetzen. Auch die direkte Übergabe von Roboter zu Roboter ist nicht immer möglich, da sich bei einer sogenannten Handshake-Übergabe die Bauteillage im Greifer ändert (Spur et al. 2013, S. 555). Aber auch die zeitlichen Aspekte (vgl. (ii)) haben Einfluss auf die Gestaltung der Übergaben und des Transfers, denn die zeitlichen Endpunkte z_s der Stationsverbände können voneinander abweichen. Die folgende Abbildung 50 zeigt diese Problemstellung auf. Station s und s' beziehen sich auf die Fügestritte f und f' der zuvor eingeführten Abbildung 48. Diese beinhalten Prozesse, die zu unterscheidenden Zeiten z_s und $z_{s'}$ enden. Die direkte Weitergabe der Zusammenbauten aus den Stationen s und s' ist auch aus diesem Hintergrund nicht zielführend, da es zu hohen Zeitverlusten kommen kann.

⁷⁴ Eigene Abbildung

Abbildung 51: Prozessspezifische Entkopplung in der Systembildung⁷⁵

Die Zusammenführung der einzelnen Stationsverbände erfordert aus diesem Grund eine layout- als auch zeitbedingte Entkopplung, um eine generische Lösungsfindung sicherzustellen. Für die zeitliche Entkopplung werden in Anlagen meist Puffer vorgesehen. Puffer können Ausprägungen von einfachen Ablagen (mit Puffergröße = 1) bis zu großen, variantenbehafteten Puffern annehmen. Die Art und Größe dieser Puffer werden auf Basis von Materialflusssimulationen bestimmt, erfordern jedoch einen weitaus kontextbezogeneren und detaillierteren Planungsstand als ihn die Idealplanung darstellt, um zielführende Ergebnisse zu generieren. Die Entkopplung in diesem Verfahren basiert aus diesem Grund auf der Verwendung doppelter Ablagen wie die folgende Abbildung 52 exemplarisch aufzeigt.

Abbildung 52: Ressourcenspezifische Entkopplung in der Systembildung⁷⁶⁷⁵ Eigene Abbildung⁷⁶ Eigene Abbildung

In der Abbildung sind für jede der zwei Stationen zwei Ablagen für die fertiggestellten ZBs vorgesehen. Dabei werden diese zwei Ablagen immer im Wechsel verwendet, um einen fertigen ZB abzulegen und für die Folgestation zu entnehmen. Auch weitere Bauteile, die eventuell aus Ladungsträgern entnommen werden müssen, können problemlos integriert werden. Somit ist gewährleistet, dass zu jedem Takt, unabhängig von dessen Beginn, ein ZB zur Verfügung steht.

5.5 Beantwortung Forschungsfragen und Forschungshypothese

Das vorliegende Kapitel 5 stellt den Kern dieser wissenschaftlichen Ausarbeitung dar und beschreibt die Methode für die algorithmische Konzipierung von hochautomatisierten Montagesystemen. Ziel der Methodenentwicklung ist die Schließung der Forschungslücke und diesbezüglich implizit dem Beantworten der Forschungshypothese und der Forschungsfragen.

Die Forschungshypothese wurde in Abschnitt 4.4 aufgestellt und postuliert, dass die Anwendung existierender Konzepte und Methoden wissensbasierter Systeme zu einer Lösung der Problemstellung führt. Die hier beschriebene Methode basiert auf dem Grundsatz wissensbasierter Systeme, der die eindeutige Trennung von der Wissensbasis und der Problemlösung vorgibt. Dieser Teil der Hypothese hat sich durch die Methodenentwicklung bewahrheitet. Das deklarative Wissen, das für die algorithmische Planung von Montagesystemen notwendig ist, wurde dementsprechend in den Wissenselementen vorgesehen, welche in Abschnitt 5.2 ausführlich dargelegt wurden. Für die Problemlösungsverfahren dieser Methode, die in Abschnitt 5.4 beschrieben wurden, stellt die Wissensbasis zwar die elementare Grundlage dar, dennoch werden die Lösungsverfahren getrennt von den Wissenselementen betrachtet und können unabhängig voneinander flexibel angepasst werden. Weiter behauptet die Hypothese, dass die Basis der Methode sowohl aus regelbasierten, also auch optimalen Verfahren besteht. Auch diese Teilhypothese hat sich bewahrheitet. Denn die Methoden basieren auf der logikbasierten Wissensrepräsentation, die den Informationsfluss durch die Problemlösungselemente und die Verwendung der Wissenselemente steuert. Diese wurde den Planungsprozessen abgeleitet, welche in Kapitel 2 dargelegt wurden. Auch die Problemlösungsverfahren basieren auf höchster Ebene auf logikbasierter Wissensrepräsentation. Die gestaltenden Funktionen der Methoden bestehen jedoch auf einem BB Verfahren, das den optimalen Optimierungsverfahren zugeordnet wird. Die Forschungshypothese kann vor diesem Hintergrund vollständig bestätigt werden.

Gleichermaßen soll auf die formulierte Forschungsfrage und die zugehörigen Leitfragen eingegangen werden. Die Forschungsfrage beschreibt die Forschungslücke und wird dabei durch fünf Leitfragen weiter untergliedert, an denen sich die folgende Ausführung orientiert. Die erste Leitfrage bezieht sich auf die notwendigen Informationen für die Automatisierung der Idealplanung. Die notwendigen Informationen sind zwei Kategorien zugeordnet worden. Erstere stellt die projektspezifischen Eingangsinformationen dar. Die Methodenentwicklung hat herausgestellt, dass diese aus Produkt-, Fügefolge und Projektprämissen bestehen. Diese Informationen wurden ausführlich in Kapitel 5 diskutiert und als Informationsmodelle bereitgestellt. Die zweite Kategorie stellen Wissens- bzw. Planungsinformationen dar. Auch diese Informationen wurden in Abschnitt 5.2 erläutert. Informationen, die die Methode nicht

berücksichtigt, sind Geometrieinformationen des Produkts. Sie haben das Potenzial, die Ergebnisqualität weiter zu verbessern.

Die zweite Leitfrage bezieht sich auf die Nutzung bestehender Konzepte und Methoden wissensbasierter Systeme, ähnlich wie die Forschungshypothese. Die entwickelte Methode basiert auf dem bestehenden Grundkonzept der wissensbasierten Systeme, also einer klaren Trennung von Wissens- und Problemlösungskomponenten. Für die gestaltende Problemlösungskomponente hat sich neben logikbasierten Bausteinen das BB Verfahren als eine effiziente und hilfreiche Lösung für die Problemstellung ergeben. Dennoch konnten die Standardvorgehensweisen des BB Verfahrens für die hier behandelte, sehr spezifische Problemstellung nicht direkt übernommen werden. Vielmehr musste ein neues Vorgehen für die Anwendung des BB Verfahrens auf Basis der Wissensbasis entwickelt werden.

Das Wissen und die Wissensformalisierung werden durch die dritte Leitfrage thematisiert. Die Formalisierung des Planungswissens stellt eine sehr große Hürde hinsichtlich der Automatisierung der Idealplanung dar. Während deklaratives Wissen sehr leicht formalisierbar ist und in den Wissenselementen abgelegt ist, hat sich die Formalisierung des impliziten Wissens als sehr komplex herausgestellt. Aus diesem Grund findet für die Repräsentation des impliziten Planungswissens das BB Verfahren auf Basis der deklarativen Wissensbasis Einsatz. Für die vollständige Formalisierung des prozeduralen Planungswissens wurde somit keine Lösung gefunden, sondern das Problem durch die implizite Kombinatorik von möglichen Lösungen gelöst. Nach den gewonnenen Erkenntnissen im Rahmen dieser Arbeit wird darüber hinaus die Sinnhaftigkeit der reinen Formalisierung menschlichen Wissens für die algorithmische Planung in Frage gestellt, denn durch die Formalisierung des impliziten prozeduralen Planungswissens werden auch die Fehler der menschlichen Arbeitsweisen imitiert. Der Karosseriebau stellt einen sehr diversen Montagebereich dar, in welchem eine Vielzahl an Fügetechnologien, Materialien etc. zum Einsatz kommen. Die Wissensbasis als auch die Problemlösungsverfahren decken diese Diversität ab und haben das Potential, das menschliche Planungsvorgehen zu übertreffen.

Zuletzt hat sich aber auch gezeigt, dass die Methode durch einige Aspekte an ihre Grenzen stößt, vgl. Leitfrage 5. Insbesondere Planungsaspekte, die im herkömmlichen Planungsprozess durch Intuition oder auf Erfahrung erfolgen, werden nicht vollständig abgedeckt werden. Dazu gehört der sich exponentiell vergrößernde Lösungsraum in Abhängigkeit von der Eingangslänge und die diesbezüglich abhängige Rechenzeit für das Genieren der optimalen Anlagengestaltung. Wo genau die Grenzen der Lösungsgenerierung in angemessener Zeit liegen, kann durch das alleinige Betrachten der Methode nicht beantwortet werden und wird aus diesem Grund in Kapitel 6 experimentell untersucht. Auch kann die Methode nur auf die in der Wissensbasis hinterlegten Templates zurückgreifen, um die Gestaltung der Anlage voranzutreiben. Das kreative Suchen nach gänzlich neuen Lösungsszenarien wie beispielsweise der Einsatz entkoppelter flexibler Anlagenelemente können durch eine Methode mit logikbasierten Mustern nicht generiert werden.

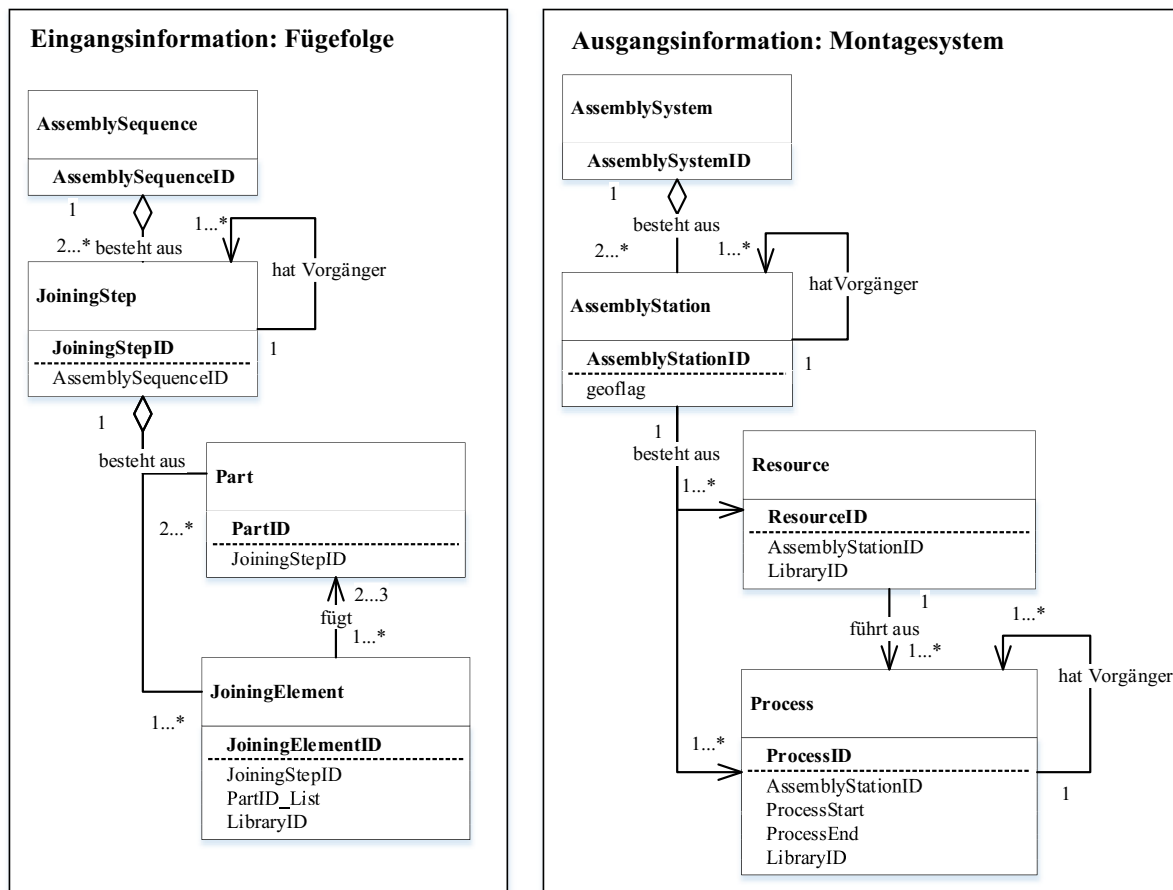
6 SYSTEM FÜR DIE KONZEPTION VON MONTAGESYSTEMEN

Als Teil der Softwareentwicklung befasst sich der Systementwurf sowohl mit der Festlegung der Softwarearchitektur als auch mit der Funktionsmodellierung und der Schnittstellendefinition der einzelnen Systemmodule (Brandt-Pook und Kollmeier 2015, S. 14). Im ersten Teil dieses Kapitels wird auf Basis der in Kapitel 5 entwickelten Methode ein Softwaresystem entworfen und in den folgenden Abschnitten ausdetailliert und prototypisch umgesetzt. Ziel der Systementwicklung in dieser Arbeit ist die Überprüfung der definierten Anforderungen sowie der Zielstellung. Für die Integration in bestehende industrielle Systemlandschaften wird darüber hinaus ein Konzept für die Systemeinbindung vorgestellt. Denn nur über eine vollständige Integration der Methode kann das Ziel der Automatisierung und Datendurchgängigkeit nachhaltig verfolgt werden, welches im Konzept der digitalen Fabrik verankert ist.

6.1 Systementwurf

Ziel des zu entwickelnden Systems ist die informationstechnische Umsetzung und Einbindung der dargelegten Methode. Detailliertere Anforderungen wurden diesbezüglich bereits in Abschnitt 2.3.4 definiert und müssen im Softwareentwurf berücksichtigt werden. Das System hat somit die konkrete Zielsetzung aus dem Systeminput, also der Fügefolge, den Produktdaten und den Projektprämissen automatisiert einen Montageprozess und das dazugehörige Montagesystem zu generieren, dem Systemoutput. Die folgende Abbildung 53 (a) stellt das Datenmodell des Systeminputs dar. Dabei hat jeder Fügeschritt einer Fügefolge genau einen direkten Nachfolger, kann jedoch mehrere Vorgänger besitzen. Jeder Fügeschritt umfasst mindestens zwei Bauteile oder Zusammenbauten. Darüber sind jedem Fügeschritt ein bis viele Fügeelemente zugeordnet, welche die enthaltenen Bauteile verbinden. Die Fügeelemente tragen Eigenschaften, nach welchen die Fügeelemente klassifiziert werden können: (i) Geometrierelevanz (mit den Ausprägungen: „geometriebildend“ oder „ausfügend“); (ii) Fügetechnologie (z.B. mit der Ausprägung „Schweißen“). Jedes dieser Fügeelemente kann bis zu drei Bauteile verbinden.

Der erwartete Systemoutput (vgl. Abbildung 53), die Montagesystembeschreibung, ist durch Montagestationen gegliedert. Montagestationen bestehen wiederum aus Prozess- und Ressourcenelementen. Jede Station besteht aus mindestens einer Ressource, die über die LibraryID auf das Bibliotheksobjekt referenziert. Gleichzeitig besteht jede Station aus mindestens einem Prozess, jeder Prozess referenziert auf die ausführende Ressource. Prozesse definieren sich insbesondere durch den Start- und Endpunkt und referenzieren wie auch die Ressourcen über die LibraryID auf die entsprechenden Bibliothekselemente.

Abbildung 53: Eingangs- und Ausgangsinformationen⁷⁷

Aus dem gegebenen Datenmodellen und insbesondere aus dem Methodenentwurf wird die Gesamtarchitektur des Systems abgeleitet, siehe dazu Abbildung 54. Zunächst wird diesbezüglich ein Importmodul der Eingangsinformationen und ein Exportmodul für die Ausgangsinformationen vorgesehen. Für Produkt-, Fügeföge-, Prozess- wie auch Ressourcendaten bedient sich das System an dem Datenmodell AutomationML (*.aml oder AML). AutomationML hat sich als offener Standard für Anlagenplanungsdaten in der Industrie etabliert. AML ist ein auf XML-basierendes Datenformat und ermöglicht dadurch den Datenaustausch auch in heterogenen IT-Landschaften wie in Abschnitt 6.3 nähergehend erläutert wird. (Schleipen und Drath 2009, S. 1–3) Die Benutzeroberfläche (GUI) ermöglicht dem Anwender die Eingangsinformationen zu selektieren. Zusätzlich kann über die GUI die Taktzeitprämisse gewählt und die Berechnung der Montageanlage gestartet werden. Kern des Back-ends bildet ein Verwaltungs- und Hilfsmodul, welches durch den GUI-Start erstmalig aufgerufen wird. Das Modul ist für den Aufruf der einzelnen Module zuständig. Neben dem Import- und Exportmodul sind das das Problemlösungsmodul und die Wissensbasis und verdeutlicht die wissensbasierte Architektur.

⁷⁷ Angelehnt an Hagemann und Stark 2020, S. 5.

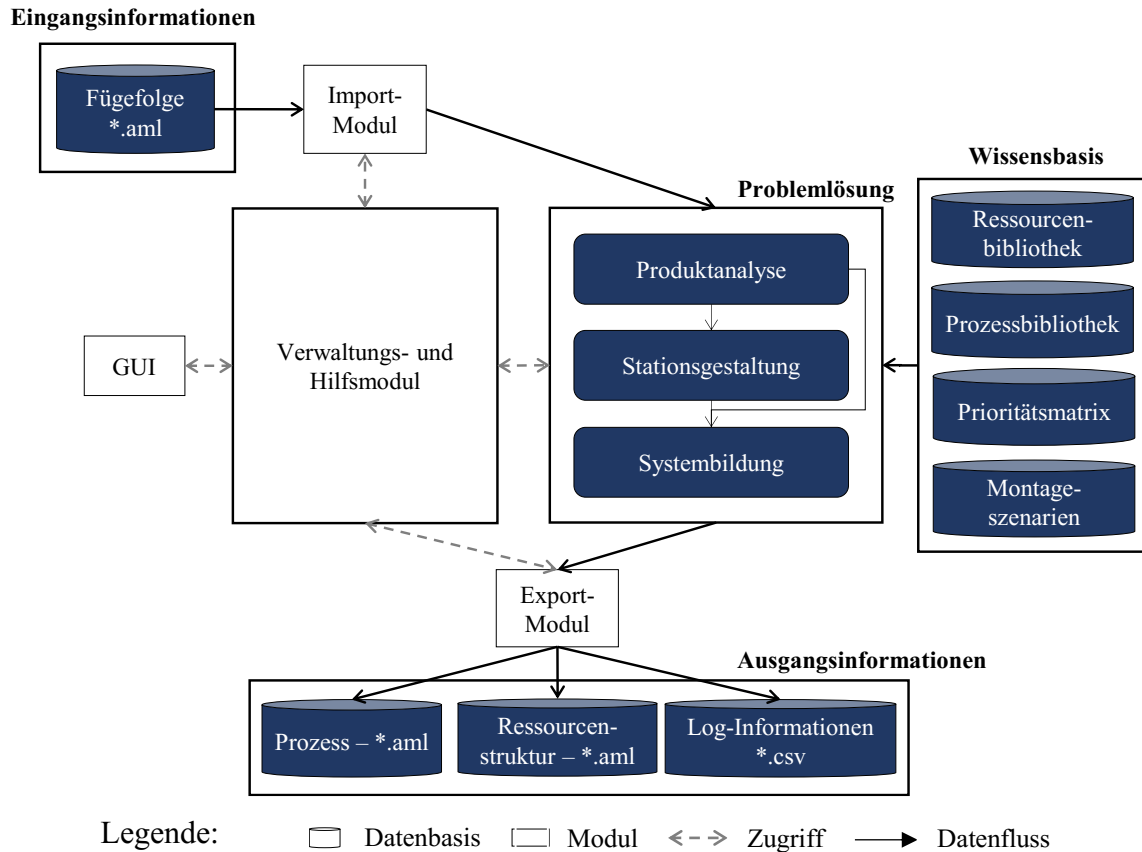


Abbildung 54: Architektur und Informationsfluss des Softwaresystems⁷⁸

Die Wissensbasis basiert auf den in Abschnitt 5.1 beschriebenen Wissensmodulen. Im Problemlösungsmodul befinden sich die einzelnen Problemlösungsalgorithmen, die die Problemlösungsverfahren der Methode durchführen. Anhand der Problemlösungsalgorithmen werden die Eingangsinformationen in die Ausgangsinformationen überführt. Die Ergebnisse werden durch Aufruf des Exportmoduls als AML-Files exportiert.

6.2 Umsetzung der Problemlösungsalgorithmen

Für die Evaluation der Methode, unter anderem anhand realer Industrieszenarien, die in Kapitel 7 thematisiert wird, wurde das entworfene System prototypisch umgesetzt. Der Prototyp wurde in der Programmiersprache C# geschrieben. Den algorithmischen Kern des wissensbasierten Systems stellen die Problemlösungsmodule dar. Das Problemlösungsmodul für die Produkt- und Fügefolgeanalyse sowie die Systemerstellung sind, wie im Methodenteil beschrieben, logikbasierte, deterministische Module, welche die Daten für die Stationsgestaltung vorbereiten bzw. in ein Gesamtsystem überführen. Sie stellen somit den Pre-, bzw. Postprozessor der Stationsgestaltung dar. Auf eine ausführliche Beschreibung der Algorithmen wird aufgrund der geringeren algorithmischen Komplexität im Folgenden verzichtet. Der Stationsgestaltungsalgorithmus stellt hingegen eine sehr hohe algorithmische Komplexität und Neuartigkeit dar, sodass dieser im Folgenden detailliert ausgeführt wird.

⁷⁸ Eigene Abbildung

Hinsichtlich der besseren Verständlichkeit dieser Problemlösungskomponente wird zunächst das zugehörige Klassenmodell des Moduls Stationsgestaltung (im folgenden *StationDesign*) eingeführt, welches in Abbildung 55 dargestellt ist. Besonderer Fokus liegt dabei auf den Aufrufabhängigkeiten zwischen den einzelnen Methoden, welche in der Abbildung durch Pfeile visualisiert sind. Detailliert eingeführt wird die Logik der drei Methoden *BeginNewStation*, *EquipGeoStation* und *EquipAusfügestation* mit Hilfe der folgenden Pseudocodeelemente 1-3. Die Klasse wird über die Methode „Run“ initiiert. Durch diese werden die notwendigen Informationen für die Klasse durch den Aufruf der Methode *ImportCaseInfo* bereitgestellt. Darunter gehört das Array *Premises*, in der die Projektprämissen abgelegt sind. Darüber hinaus ist das Objekt *JobList* von hoher Bedeutung. Die *JobList* ist ein Objekt, indem die in der Problemlösungskomponente p.1 erzeugten notwendigen Montagejobs und die Vorrangbeziehungen für jeden Fügenschritt abgelegt werden. Zusätzlich wird durch die Methode *Run* die Methode *BeginNewStationGroup* aufgerufen, welche einen neuen Stationsverbund durch die Erstellung einer neuen Instanz des Objekts *StationGroup* initiiert. Diese Instanz wird folgend über den Aufruf der Methode *BeginNewStation* weitergegeben.

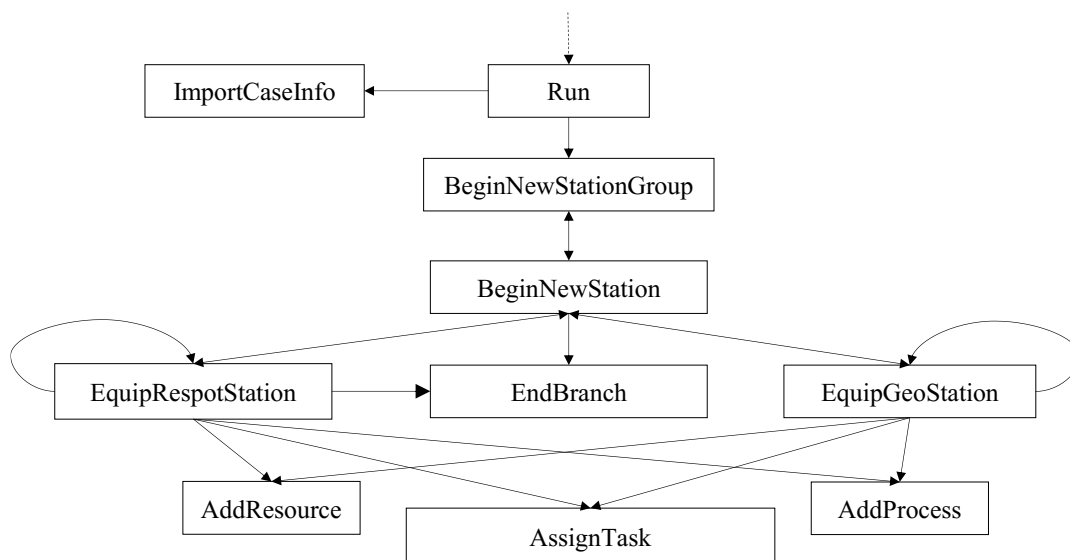


Abbildung 55: Klassenmodell Stationsgestaltung⁷⁹

Die Methode *BeginNewStation* regelt auf höchster Ebene die Gestaltung einzelner Stationen. Sie erzeugt die Instanzen der Objekte *GeoStation* (Geometriestation) und *RespotStation* (Ausfügestation) für die einzelnen Stationen und ruft diesbezüglich die Methoden *EquipRespotStation* und *EquipGeoStation* für die Befüllung dieser Stationen auf. In diesen Methoden für die Befüllung der Stationen *EquipRespotStation* und *EquipGeoStation* werden die Lösungsbäume für die Gestaltung der einzelnen Stationen aufgebaut und nach der festgelegten Suchstrategie durchlaufen. Für Teillösungen, also den einzelnen Knoten in den Suchbäumen, die als gültige Lösungen bewertet werden, werden die Methoden *AddResource* und *AddProcess* aufgerufen und durch diese die entsprechenden Ressourcen und Prozesse anhand der Montagetemplate der temporären Lösung *CurrentSolution* zugewiesen. Folgend wird über die Methode *AssignTasks* die mögliche Anzahl an Montageaufgaben nach dem aktuellen Szenario den Prozessen und Ressourcen zugeordnet. Durch den Wiederaufruf der Klasse *BeginNewStation* wird die

⁷⁹ Eigene Abbildung

Erstellung der Folgestation initiiert. Sobald in der Klasse *AssignTasks* festgestellt wird, dass alle Montageaufgaben zugewiesen wurden, stellt dieser Pfad eine gültige Lösung dar. Somit wird die Klasse *EndBranch* nach dem Hinzufügen der Prozesse und Ressourcen aufgerufen. Diese legt die berechnete Lösung als *BestSolution* ab, sollte diese einen besseren Funktionswert als die aktuelle *BestSolution* (untere Schranke) aufweisen. Am Ende des letzten berücksichtigten Pfades wird wiederum die Methode *BeginNewStationGroup* aufgerufen, damit der Stationsverbund für den nächsten Fügeschritt initialisiert wird.

6.2.1.1 Stationserzeugung

Die Stationserzeugung basiert auf einem verschachtelten, rekursiven Vorgehen, das die Stationen des Montagesystems gestaltet. Die Suchstrategie wie sie in Kapitel 5 entwickelt wurde, basiert auf den folgenden Methodenaufrufen und der Enumeration von Variablen in der Reihenfolge (i) Erzeugung neuer Stationen durch Aufruf der Methode *BeginNewStation*; (ii) Durchlaufen der Jobs durch den Aufruf der Methoden *EquipGeoStation* bzw. *EquipRespotStation* und Enumeration der Variablen j (Jobs); (iii) Durchlaufen der Montage-templates durch Aufruf der Methode *EquipGeoStation* bzw. *EquipRespotStation* und Enumeration der Variable a (Montagetemplates) und (iv) Durchlaufen der Ausprägungen der Montagetemplates innerhalb der Methoden *EquipGeoStation* bzw. *EquipRespotStation* durch Enumeration der Variable u . Auf dieser Basis erfolgt die Zuweisung von Templates zu Stationen über die Variable m_{as} . Auf der höchsten Ebene des Algorithmus findet dementsprechend die Methode *BeginNewStation* Anwendung, welche das Erstellen von Geometriestationen und Ausfügestationen übernimmt. Der folgende Pseudocode 1: Methode *BeginNewStation*

beschreibt die Logik dieser Methode.

Methode <i>BeginNewStation</i> des RASD Algorithmus	
1:	method <i>BeginNewStation</i> (<i>CurrentSolution</i> , <i>JobList</i> , <i>Premises</i>)
2:	if $JobList[E_g] > 0$ then
3:	Initialize new <i>GeoStation</i> s_g
4:	<i>CurrentSolution.add</i> (s_g)
5:	<i>EquipGeoStation</i> (<i>CurrentSolution</i> , <i>JobList</i> , <i>Premises</i> , a , s , j)
6:	elseif $JobList[E_a] > 0$ then
7:	Initialize new <i>RespotStation</i> s_a
8:	<i>CurrentSolution.add</i> (s_a)
9:	<i>EquipRespotStation</i> (<i>CurrentSolution</i> , <i>JobList</i> , <i>Premises</i> , a , s , j)
10:	<i>EndBranch</i> (<i>CurrentSolution</i>)
11:	end function

Pseudocode 1: Methode *BeginNewStation*

Durch den Aufruf der Methode *BeginNewStation* werden drei Argumente übergeben: die *JobList* (das Ergebnis aus Problemlösungselement p.1), die *CurrentSolution* (welche als temporärer Cache für die aktuellen Teillösungen fungiert) und die *Premises* (den Projektprämissen). Im ersten Schritt überprüft die Methode, ob sich geometriegebende Fügeelemente in der *JobList* befinden, vgl. Zeile 2. Befinden sich geometriegebende Fügeelemente in der *JobList*, so wird die Erstellung einer Geostation initiiert, vgl. Zeile 3. Dadurch wird eine neue Geostation instanziiert und dieser Station ein in jeder Station befindliches Ausgangshandlingrobotermodul hinzugefügt. Zusätzlich wird ein entsprechender Handhabungsprozess für die Weitergabe

des Endprodukts erstellt. Die Station wird folgend der *CurrentSolution* hinzugefügt. Für die weitere Gestaltung der Station wird die Methode *EquipGeoStation*⁸⁰ aufgerufen (siehe Pseudocode 2). Für jede daraus entstehende gültige Lösung der Geometriestation wird die Station *BeginNewStation* wieder aufgerufen (vgl. Pseudocode 2), um falls notwendig, weitere Ausfügestationen für dies Lösung zu generieren. Bei dem Wiederaufruf sind keine Geometriepunkte mehr in der *Joblist* vorhanden, dadurch wird die Erstellung der ersten Ausfügestation initiiert. Die Erstellung der Ausfügestationen ähnelt der Erstellung der Geometriestationen, es wird jedoch für die Befüllung der Ausfügestation die Methode *EquipRespotStation*⁸¹ aufgerufen. Das Vorgehen wird so lange wiederholt, bis sich keine Fügeelemente mehr in der *JobList* befinden. Dadurch ist die erste Lösung abgeschlossen. Gleiches Vorgehen wird für alle anderen Pfade des Lösungsbaums durchgeführt. Das entsprechende Vorgehen wird durch die Betrachtung der folgenden Methode *EquipGeoStation* und *EquipRespotStation* und den entsprechenden Pseudocode ersichtlich.

6.2.1.2 Gestaltung der Geostationen – Methode: EquipGeoStation

Die Gestaltung der Geostationen wird durch die Methode *EquipGeoStation* ermöglicht, welche anhand des folgenden Pseudocode 2 nähergehend eingeführt wird.

Methode EquipGeoStation des RASD Algorithmus

```

1:  method EquipGeoStation(CurrentSolution, BestSolution, Premises, JobList, a, s, j)
2:    for  $u_{\min}(a_g)$  to  $u_{\max}(a_g)$ 
3:      if  $u > 0$  && checkcompatibility(CurrentSolution, a) == 0 then break;
4:      if  $\eta(s) < \text{Premises}[\eta_{\text{crit}}]$  ||  $w_s > \text{Premises}[w_{\text{crit}}]$  then break; //Nebenbedingung (5.6) & (5.8)
5:      CurrentSolution[s].add(processes(u, a, j));
6:      CurrentSolution[s].add(resources(u, a, j));
7:      if costs(Relaxation(CurrentSolution, JobList)) < Costs(BestSolution) then
8:        AssignTasks(CalculateProcessSteps(a, c, j)) //Nebenbedingung (5.17) & (5.31)
9:        if  $a_g < |A_g|$  then
10:          EquipGeostation(a++, s, j) endif
11:        elseif  $j_g < |J_g|$  &&  $o_j = E_j$  then
12:          EquipGeostation(a=0, s, j++) elseif
13:        elseif  $o_j = E_g$  then
14:          BeginNewStation(JobList, CurrentSolution, a=0, s++, j=0) elseif
15:        else print("Für die gegebenen Eingangsinformationen existiert keine gültige Lösung") endelse
16:      endfor
17:    endfunction

```

Pseudocode 2: Methode EquipGeoStation

Die Übergabewerte an die Methode bestehen aus den Objekten *CurrentSolution*, *JobList*, *Premises* sowie den Variablen *s*, *j*, *a* (Station *s*, Job *j*, Montagetemplate *a*). Ziel der Methode ist es die Geostation zu gestalten. Dabei wird durch die Methode *EquipGeoStation* das rekursive Vorgehen des Backtracking Verfahrens umgesetzt und weist der Station iterativ Ressourcen, Prozesse und Fügeelemente zu. Der rekursive Aufruf der Methode *EquipGeoStation* dient dem Hinzufügen neuer Ressourcen und Prozesse. Durch das Hinzufügen werden genau diesen

⁸⁰ Die Methode *EquipGeoStation* wird im folgenden Abschnitt 6.2.1.2 detailliert eingeführt

⁸¹ Die Methode *EquipRespotStation* wird im folgenden Abschnitt 6.2.1.3 detailliert eingeführt

kontinuierlich Montageaufgaben aus der *JobList* zugeordnet. Sind alle Geometrieelemente einer Geometriestation zugeordnet, handelt es sich um eine gültige Lösung.

Zunächst werden im Pseudocode 2 für den ersten Job $j = 0$ die Ausprägungen des ersten Montagetemplates $a = 0$, das für Geometrieprozesse zulässig ist, enumeriert (vgl. Zeile 2). In Abbildung 56 wird diese Enumeration aufgezeigt. Die Enumeration der Variablen u erfolgt dabei innerhalb des durch das Montagetemplate in Tabelle 19 festgelegten Wertebereichs. Für jeden Enumerationswert für u wird die Kombinierbarkeit des Montagetemplates innerhalb der Montagetemplateklasse (also z.B. Handhabungstemplate oder Fügetemplate) und innerhalb der Station geprüft anhand der Funktion *CheckCompability* überprüft, vgl. Zeile 3.

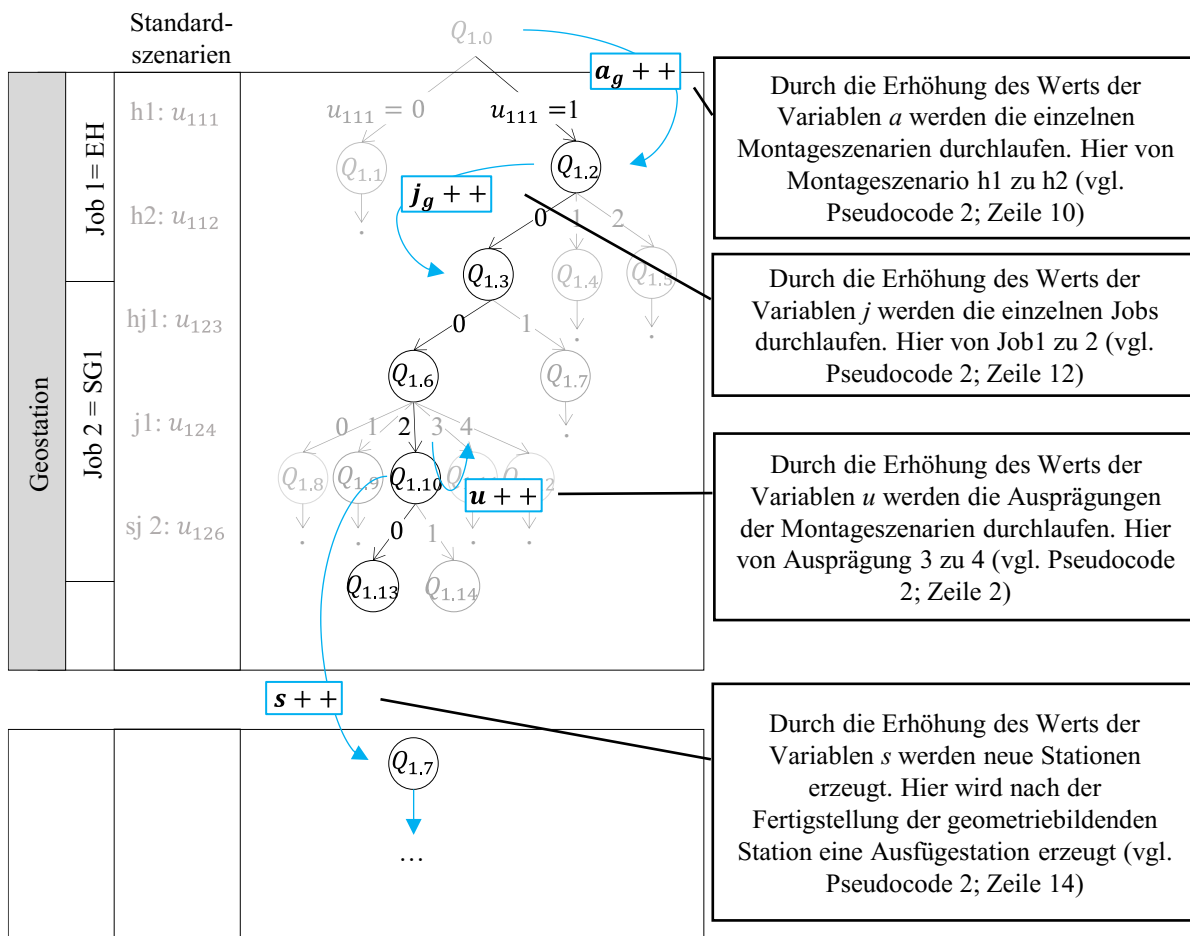


Abbildung 56: Elementare Variablen für rekursive Suche⁸²

Die Funktion gibt einen Wert 1 zurück, falls das aktuelle Montagetemplate mit den bisher eingesetzten Montagetemplates kombiniert werden kann und greift dafür auf die Wissensbasis w.2 zurück. Ist es nicht möglich, so gibt diese den Wert 0 zurück. In diesem Fall wird die Enumeration weiterer Ausprägungen für dieses Template durch die *break*-Anweisung abgebrochen, denn auch für höhere Werte von u ist die Kombinierbarkeit des Templates unverändert. In Zeile 4 erfolgen zwei weitere Überprüfungen nach Randbedingung (5.6) und (5.8). Durch die Randbedingungen wird überprüft, ob die maximal mögliche Anzahl an Fügerobotern w_{crit} , die an dem Zusammenbau arbeiten, eingehalten wird und auch, ob die

⁸² Eigene Abbildung

Stationsverfügbarkeit höher ist als die Mindestverfügbarkeit η_{crit} . Die Werte beider Schranken werden dem globalen Prämissenset *Premises* entnommen. Können auch diese zwei Bedingungen erfüllt werden, handelt es sich bei der betrachteten Lösung um eine technisch sinnvolle Lösung. Die neuen Ressourcen und Prozesse können nach Montagetemplate a und Ausprägung u dementsprechend der aktuellen Lösung *CurrentSolution* hinzugefügt werden (vgl. Zeile 5 und 6), um folgend den Abgleich zwischen der oberen und unteren Schranke durchzuführen.

Die untere Schranke $\underline{L}$ wird in Pseudocode 2 durch die Variable *BestSolution* beschrieben. Die Bildung der oberen Schranke $\bar{L}$, wie im Methodenteil beschrieben auf Basis der Relaxation K' und der aktuell betrachteten Lösung *CurrentSolution* und der *JobList*, vgl. Zeile 7 im Pseudocode. Nur wenn die Kosten laut Wert der oberen Schranke geringer sind als die aktuell beste Lösung, wird die aktuelle (Teil-)Lösung weiter berücksichtigt. Bei Erfüllung kann folgend die mögliche Anzahl an Montageaufgaben, also Füge- und Handhabungsschritten für die Ausprägung u des Montagetemplate a berechnet werden, vgl. Zeile 8. Dieser Berechnungs- und Zuordnungsteil findet durch den Aufruf der Methode *AssignTasks* statt. Dabei wird auch überprüft, ob über das Setzen von Geometrieelementen auch noch freie Zeit für das Setzen von Ausfügepunkte zur Verfügung steht. Wenn möglich, werden den einzelnen Ressourcen und Prozessen Ausfügepunkte zugeordnet.

Folgend wird das weitere Vorgehen durch drei Bedingungen entschieden, wie diese in Kapitel 5 durch die Ungleichungen (5.41)-(5.43) eingeführt wurden. Diesbezüglich dient Abbildung 56 der besseren Verständlichkeit. In der Abbildung werden die Bedingungen anhand des Beispiels aufgezeigt. Bedingung (1) (vgl. Pseudocode Zeile 9) überprüft, ob bereits alle Montagetemplates, die für Geometrieprozesse zugelassen sind, für den aktuellen Job betrachtet wurden. Wird diese Bedingung nicht erfüllt, so wird die Methode für die gleiche Station s und für das nächste Montagetemplate a (bei gleichem Job) durch die Erhöhung des Werts der Variablen a , wieder aufgerufen.

Die zweite Bedingung in Zeile 11 überprüft, falls Bedingung (1) nicht wahr ist, ob alle Füge- und Handhabungsschritte des aktuellen Jobs j Prozessen und Ressourcen zugeordnet wurden. Die Überprüfung erfolgt dabei über die Variable o_j , der Menge aller zugeordneter Montageaufgaben des Jobs j . Ist ein Job vollständig zugeordnet, so wird die Funktion wieder aufgerufen, um für den nächsten Job $j + 1$ die Montagetemplates zu durchlaufen (wiederum für die gleiche Station s). Die letzte Bedingung überprüft, wenn sowohl die erste als auch die zweite Bedingung nicht erfüllt wurden, ob für alle Jobs alle Montageaufgaben der *JobList* zugeordnet wurden. Wenn das der Fall ist, wird die Funktion *BeginNewStation* aufgerufen, um folgende Ausfügestationen für die aktuelle Lösung zu generieren, falls sich in der *JobList* weitere Montageaufgaben befinden. Wenn jedoch keine der drei Bedingungen erfüllt wird, so gibt es unter den gegebenen Randbedingungen keine gültige Lösung, vgl. Zeile 15.

6.2.1.3 Gestaltung Ausfügestation – EquipRespotStation

Basierend auf jeder gültigen Lösung einer Geostation wird die Gestaltung der Ausfügestationen ausgelöst, vgl. Pseudocode 2, Zeile 14. In sehr ähnlicher Weise wie die rekursive Logik der Geometriestationen, zeigt der folgende Pseudocode 3 die Gestaltung von

Ausfügestationen. Diese bestimmt iterativ, durch den Aufruf der Funktionen *BeginNewStation* und *EquipRespotStation* die bestmögliche Zuordnung von Montagetemplates zu Stationen. Dennoch ergeben sich einige Unterschiede zwischen den Logikelementen, denn für Geometriestationen ist eine Lösung nur dann gültig, wenn innerhalb der Geometriestation alle geometrieebenen Elemente abgehandelt werden können. Diese Bedingung gilt für Ausfügestationen nicht, wie durch die Methode in Kapitel 5 beschrieben wurde. Dadurch ergibt sich für die Gestaltung der Ausfügestationen ein deutlich größerer Lösungsraum.

In der Methode *EquipRespotStation* wird zunächst überprüft, ob es noch Ausfügeelemente für den Job j gibt, die noch keiner Stationen zugeordnet sind, vgl. Zeile 2. Ist das nicht der Fall, so wird der nachfolgende Job betrachtet. Für den ersten Job, der die Bedingungen in Zeile 2 erfüllt, folgt die Enumeration der Ausprägungen der Variable u für alle Montagetemplates a , die nach Tabelle 22 für Ausfügeprozesse zulässig sind. Wie auch für die Geometriestationen wird im Folgenden durch die zwei if-Bedingungen die Einhaltung der Kombinierbarkeit der Montagetemplates (vgl. Zeile 4), die Stationsverfügbarkeit (vgl. Zeile 5) und die Anzahl führender Roboter gegenüber der Einhaltung der Schranken überprüft (vgl. Zeile 5). Trifft eine dieser Bedingungen nicht zu, so führen diese zu einer break-Anweisung, sodass die for-Schleife verlassen wird und dieser Knoten im Suchbaum nicht weiter expandiert wird und auch weitere Werte für u nicht weiter berücksichtigt werden. Der aktuellen Lösung *CurrentSolution* werden die neuen Ressourcen und Prozesse hinzugefügt (vgl. Zeile 6 + 7). Die aktualisierte *CurrentSolution* wird folgend wiederum genutzt, um die obere Schranke zu bilden, welche wie in der Geometriestation mit der unteren Schranke abgeglichen wird (vgl. Zeile 8). Für den Fall, dass die Relaxation zu niedrigeren Kosten führt als die bisher beste Lösung, werden die Montageaufgaben den einzelnen Prozessen und Ressourcen zugeordnet (vgl. Zeile 9). Falls nicht, wird der aktuelle Suchpfad nicht weiter expandiert.

Für die weitere Vorgehensweise dienen wiederum Bedingungen, die sich elementar von denen der Geometriestation differenzieren. Erstere dient dem wiederholten Aufruf der Funktion *EquipRespotStation* mit dem Ziel, das nächste Montagetemplate zu betrachten. Der Funktionsaufruf erfolgt mit einem um eins erhöhten Variablenwert von a , vgl. Zeile 10 und 11. Allerdings erfolgt der Aufruf nur für die Fälle, für die weitere Füge- und Handhabungselemente für den aktuellen Job zuzuordnen sind, da der Einsatz weiterer Ressourcen, obwohl keine Fügeelemente mehr zugeordnet werden müssen, nicht zu besseren Ergebnissen führen kann. Die zweite Bedingung führt zu den Fällen, für die bereits alle Montagetemplates des aktuellen Jobs j durchlaufen wurden und noch weitere Jobs betrachtet werden müssen. Auch für diesen Fall ruft sich die Methode erneut auf, um die nächste Fügeaufgabe j für die aktuelle Station zu betrachten. Die dritte Bedingung führt zum Aufruf der Funktion *BeginNewStation*, um eine neue Station zu instanziiieren. Dabei ist sicherzustellen, dass in jeder Station mindestens eine Füge-/Montageaufgabe zugeordnet wurde und damit auch mindestens eine Ressource und ein Prozess. Bei Nichteinhaltung führt es bei der Enumeration von Lösungen zu Kombinationen, die sich lediglich durch ihre Reihenfolge der Bearbeitung von Fügeverfahren unterscheiden, diese Fälle sollen bewusst ausgeschlossen werden, da sie zu keinen niedrigeren Zielfunktionswerten führen können und erheblich höheren Rechenaufwand verursachen. Zuletzt wird überprüft, ob durch die aktuelle Schleife alle Fügeelemente des aktuell betrachteten Jobs zugewiesen wurden. Ist das der Fall, so wird die for-Schleife abgebrochen, denn weiteres Equipment für dieses Verfahren ist nicht mehr notwendig.

Methode EquipRespotStation des RASD Algorithmus

```

1  method EquipRespotStation(CurrentSolution, BestSolution, JobList, Premises, a, s, j)
2    if  $O < E$  then
3      for  $u_{\min}(a)$  to  $u_{\max}(a)$ 
4        if  $u > 0$  && CheckCompatibility(CurrentSolution, a) == 0 then break endif
5        if  $\eta(s) < Premises[\eta_{crit}]$  ||  $w_s > Premises[w_{crit}]$  then break; //Nebenbedingung (5.6) & (5.8)
6        CurrentSolution[s].add(processes(u, a, j));
7        CurrentSolution[s].add(resources(u, a, j));
8        if Costs(Relaxation(CurrentSolution, JobList)) < Costs(BestSolution) then
9          assignTasks(CalculatePossibleTasks(a, ct, j)); //Nebenbedingung (5.17) & (5.31)
10         if  $a_r < |A_r|$  &&  $o_j < E_j$  then
11           EquipRespotStation(a++, s, j) endif
12         if  $j_r < |J_r|$  &&  $a_r = |A_r|$  && assignTasks() > 0 && CheckPredecessor(JobList, j) > 0
13           EquipRespotStation(a=0, s, j++) endif
14         if assignTasks() > 0 &&  $a = |A|$ 
15           BeginNewStation(CurrentSolution, BestSolution, JobList, a=0, s++, j=0) endif
16         if  $O == E$  then break endif
17       elseif CheckPredecessor(JobList, j) > 0
18         EquipRespotStation(a=0, s, j++)
19     endfunction

```

Pseudocode 3: Methode EquipRespotStation

6.3 Integration in existierende Systemlandschaften

Hinsichtlich der Industrialisierung eines neuartigen und innovativen Systems ist die Integrierbarkeit in existierende Systemlandschaften von elementarer Wichtigkeit. Die Integrierbarkeit gestaltet sich insbesondere aufgrund von bestehenden Schnittstellen und Mechanismen existierender Systemlandschaften schwierig. Im vorliegenden Kapitel wird sich auf ein unabhängiges Integrationskonzept aufgrund der hohen Varianz existierender IT-Landschaften fokussiert. Die folgende Abbildung 57 visualisiert dieses Integrationskonzept. In den grauen Boxen sind zunächst einzelne Disziplinen einer industriellen IT-Landschaft angedeutet, in diesem konkreten Fall die Produktentwicklung und die Anlagenplanung. Innerhalb dieser Disziplinen wird unter Funktions- und Datenmanagementkomponenten differenziert wie der Legende zu entnehmen ist. Die Pfeile in der Abbildung stellen Schnittstellen und Informationsflüsse zwischen den einzelnen Komponenten dar. Die Produktentwicklung ist in der Abbildung stark vereinfacht dargestellt. Die Funktionskomponente wird dabei der Disziplin CAD zugeordnet und die zugehörige Datenmanagement-Komponente dem PDM. Die IT-Landschaft der Anlagenplanung ist detaillierter dargestellt, jedoch wurde sich auch hier bewusst auf eine für den Kontext dieser Arbeit relevanten Teilmenge aller Systeme der Anlagenplanung fokussiert. Die Systemlandschaft der Anlagenplanung wird durch zwei Funktionskomponenten für die digitale, aber manuelle Anlagenplanung und für die digitale Produktanalyse dargestellt. Die Produktanalyse umfasst eine rechnerbasierte Unterstützung für die Analyse der Produktdaten unter produktionsspezifischen Aspekten und der Überführung der Produktstruktur in eine Fügefolgestruktur. Die Anlagenplanung umfasst darauf basierend sowohl die Prozess- als auch die Ressourcenplanung. Die Systeme verwalten ihre Daten über EDM Bausteine. Die EDM Bausteine wurden dabei nach den gängigen und auch in dieser Arbeit betrachteten Bausteinen für die Projekte, Bibliotheken, Ressourcen, Prozesse und die Fügefolge unterteilt.

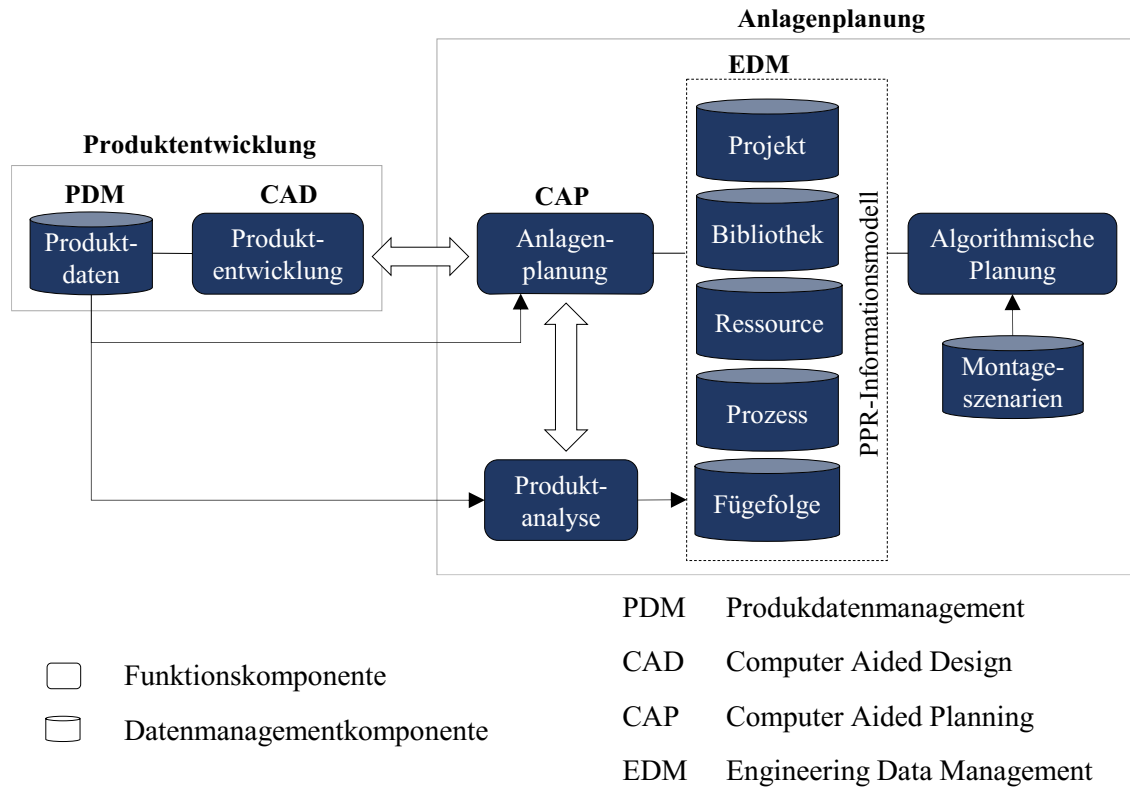


Abbildung 57: Einbindung in existierende Systemlandschaften⁸³

Die algorithmische Planung wird als eigene Funktionskomponente vorgesehen, die sowohl auf die Daten des EDM zugreift, aber auch Berechnungsergebnisse in das Planungssystem zurückspielen kann. Dadurch wird die algorithmische Planung als reine Back-End Lösung in die existierende Systemwelt integriert. Der Anwender soll die Funktionen der algorithmischen Planung diesbezüglich aus seiner Oberfläche der Anlagenplanung ansteuern können. Die notwendigen Eingangsdaten werden dem EDM-Modul Fügefolge entnommen oder, wenn notwendig, händisch ergänzt. Die Wissensbasis für die algorithmische Planung ist mit einem größeren Integrationsaufwand verbunden. Die Betriebsmittel- und Prozessbibliothek, die im Rahmen dieser Forschungsarbeit umfassend beschrieben wurden, können ggf. in existierenden Bibliotheken integriert oder ergänzt werden. Dabei muss analysiert werden, inwieweit eine strukturierte Datenhaltung für Prozess- und Ressourcenkomponenten bereits existiert und inwieweit diese durch die notwendigen Informationen für die algorithmische Planung erweitert werden kann. In der industriellen Praxis werden beispielsweise oft Bibliotheken für Ressourcen geführt, standardisierte Prozessbausteine werden häufig in den frühen Planungsphasen vernachlässigt oder von jedem Planer individuell gestaltet. Unabhängig vom Stand industrieller Bibliotheken ist es empfehlenswert, sowohl Prozesse als auch Betriebsmittel in einer zentralen Bibliothek zu verwalten und der manuellen wie auch der algorithmischen Planung zur Verfügung zu stellen. Bzgl. der Ablage von Montagetemplates ist abzuwägen, ob eine zentrale Datenablage zielführend ist, da sie vermutlich alleinig durch die algorithmische Planung verwendet wird.

⁸³ Eigene Abbildung

In diesem Kapitel wurde ein Integrationskonzept für die algorithmische Anlagenplanung aufgezeigt. Durch die prototypische Umsetzung des Softwaresystems können nun die Anforderungen an das System und die Ziele dieser wissenschaftlichen Arbeit fundiert überprüft werden. Das folgende Kapitel 7, der Evaluation, stellt den elementaren Teil dieser Überprüfung dar.

7 EVALUATION

Die Evaluation umfasst die strukturierte Bewertung der Methoden- und Systementwicklung hinsichtlich der in Abschnitt 2.4.5 definierten Anforderungen. Diesbezüglich bezieht sich der erste Abschnitt 7.1 auf die Festlegung eines Evaluationsplans. Hierbei werden den definierten Anforderungen an die Lösung Evaluationskriterien abgeleitet und das Evaluationsvorgehen beschrieben. In Abschnitt 7.2 werden daraufhin zwei Industrieszenarien vorgestellt, die folgend für die Evaluation der IT- und planungstechnischen Anforderungen Anwendung finden. Die informationstechnische Evaluation in Abschnitt 7.3 umfasst die Überprüfung algorithmischer Eigenschaften wie der Algorithmeneffizienz. Hingegen umfasst die planungstechnische Evaluation in Abschnitt 7.4 die Überprüfung techno-ökonomischer Anforderungen.

7.1 Evaluationsplan

Ziel der Evaluation ist die Bewertung der Ergebnisse der Methoden- und Systementwicklung anhand der in Abschnitt 2.4.5 festgelegten Anforderungen. Die Anforderungen beziehen sich sowohl auf informationstechnische als auch auf produkt- bzw. planungstechnische Aspekte. Diese richten sich an die Methode selbst, aber auch an den ganzheitlichen Lösungsansatz, der die prototypische Umsetzung inkludiert. Die Bewertungskriterien, die für die in diesem Kapitel stattfindende summative Evaluation herangezogen werden, werden direkt von den Anforderungen abgeleitet und jeweils zu Beginn der entsprechenden Kapitel eingeführt. Die Einhaltung der Kriterien wird abhängig von der Messbarkeit der einzelnen Kriterien objektiv oder subjektiv bewertet. Messbare Aspekte wie zum Beispiel die ausreichende Algorithmeneffizienz werden, wenn möglich objektiv bewertet, wohingegen die Lösungsgüte der Algorithmen einer subjektiven Bewertung unterzogen wird. Heutige industrielle Planungsprozesse sind hoch kreative und manuelle Prozesse, welche insbesondere in den frühen Planungsphasen stark personenabhängig sind. Die Phase der Idealplanung ist in der industriellen Praxis aber auch eine Phase, die nicht scharf von der Vorplanung und der Realplanung getrennt wird. In den industriellen Prozessen ist der Übergang zwischen diesen Phasen fließend. Damit variiert der Detaillierungsgrad wie auch die Berücksichtigung von Eingangsinformationen in der Idealplanung stark. Die Dokumentation von Planungsergebnissen in den frühen Phasen der Montageplanung erfolgt rein bedarfsorientiert und damit kosten- und ressourcenbasiert in oft zweifelhafter Qualität (Hagemann und Stark 2018, S. 192–193). Eine vergleichende Evaluation auf Basis von Bestandsdaten wird durch den Autor aus diesen Gründen als nur bedingt sinnvoll erachtet. Die folgende produktionstechnische Evaluation der algorithmischen Planungsergebnisse basiert somit auf bewertenden und analysierenden Verfahren. Als Bewertungsgegenstand dienen reale Industrieszenarien, welche im folgenden Abschnitt 7.2 eingeführt werden. Dabei ist zu betonen, dass die Auswahl der Szenarien eine größtmögliche Abdeckung der großen Diversität der Anlagenplanung beabsichtigt. Die Bewertung der Ergebnisse, basierend auf den Szenarien, wurde unter Zuhilfenahme von Experten durchgeführt. Auch die Auswahl (vgl. Anhang A4) der Experten beabsichtigt die größtmögliche Abdeckung notwendiger Expertise für die Beurteilung.

Neben der reinen Verifikation der Anforderungen sollen analysierende Evaluationsansätze weitere Gestaltungsmöglichkeiten und damit Ansätze für die weiterführende Forschung

hervorbringen. Diese basieren auf den identifizierten Schwachstellen, die sich durch die Ergebnisanalyse der algorithmischen Planung ergeben. In diesem Kapitel wird somit zum einen das Erreichte überprüft – summativ und rückblickend – und auf Basis gefundener Schwachstellen neue Gestaltungsmöglichkeiten abgeleitet – analysierend und visionär.

7.2 Industrieszenarien

Die Methode wurde durch die prototypische Umsetzung anhand einer hohen Anzahl realer industrieller Szenarien getestet. Zwei Industrieszenarien sowie die dafür berechneten Ergebnisse der Problemlösungsalgorithmen sollen im Folgenden detailliert eingeführt werden und dienen in den Folgeabschnitten 7.3 und 7.4 als Bewertungsgrundlage. Die Industrieszenarien stammen aus den Fügestufen Z1 und Z3 eines großen europäischen Automobilherstellers. Das erste Industrieszenario ist der Baugruppe Heckwagen zugehörig, das zweite gehört der Baugruppe Motorhaube an. Die Wahl der zwei Industrieszenarien wurde bewusst so getroffen, sodass eine möglichst große Diversität des automobilen Rohbaus abgedeckt wird. So wurde mit der Baugruppe Vorbau ein Szenario mit mehreren Varianten gewählt, wohingegen die Baugruppe Motorhaube nur eine Variante aufzeigt. Weiter unterscheiden sich die zwei Szenarien maßgeblich durch die eingesetzten Fügeverfahren. In der Baugruppe Heckwagen werden die Fügeverfahren Widerstandspunktschweißen und Clinchen angewendet, wohingegen in der Motorhaube die Verfahren Kleben, Clinchen und Falzen Anwendung finden.

7.2.1 Industrieszenario 1: Baugruppe Heckwagen

Das erste Szenario umfasst die Montage der Karosseriebaugruppe Heckwagen. Die vorgegebene Taktzeit beträgt 60 Sekunden⁸⁴. Die entsprechende Fügefolge ist in der folgenden Abbildung 29 visualisiert. Die dazugehörigen Metadaten in der darauffolgenden Tabelle 24.

⁸⁴ Die Taktzeitprämisse wird auf Basis des Marktbedarfs der betrachteten Produktvarianten sowie auf Basis von bestehenden/geplanten Produktionskapazitäten in anderen Anlagen im Produktionsnetzwerk berechnet und dem Produktionsplaner vorgegeben. Umso niedriger die Taktzeit einer Anlage, desto größer ist deren (theoretische) Ausbringung. Aus diesem Grund werden aber auch mehr Produktionsressourcen benötigt, woraus folgt, dass Anlagen mit geringerer Taktzeit größer und kostenintensiver sind als Anlagen größerer Taktzeit.

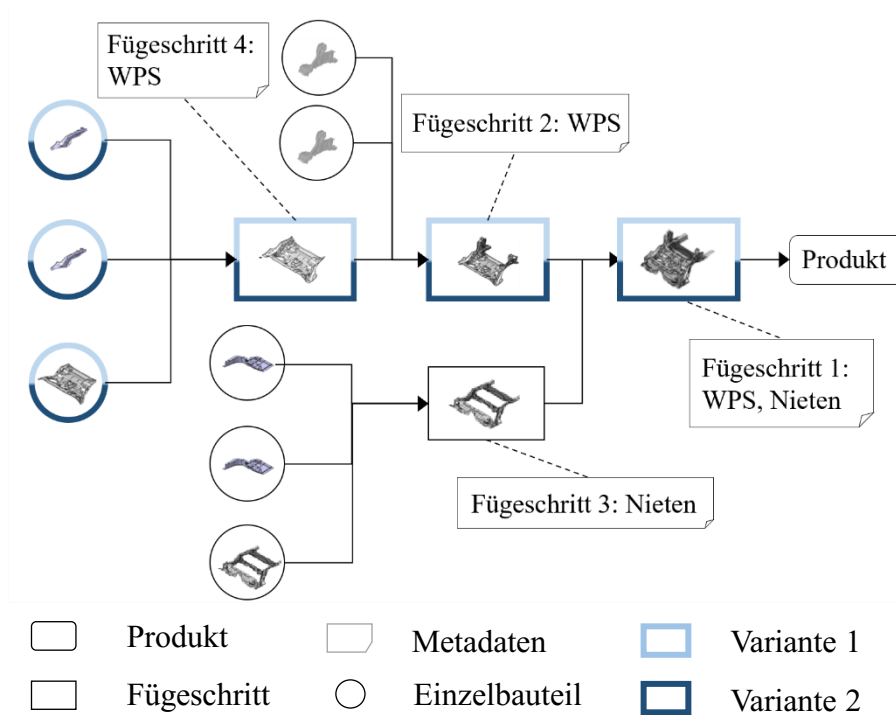


Abbildung 58: Fügefolge Industrieszenario 1 – Baugruppe Heckwagen⁸⁵

Die Fügefolge umfasst vier Füge Schritte mit jeweils ein bis zwei Fügeverfahren. Die zwei Produktvarianten werden in der Fügefolge durch die zwei Farben Hellblau und Dunkelblau unterschieden und beziehen sich auf sowohl auf die Einzelbauteile als auch auf die entsprechenden Inhalte der Füge Schritte. Die Metadaten zeigen die Verfahren der einzelnen Füge Schritte und die entsprechende Anzahl an Geometrie- und Ausfügeelementen an.

Tabelle 24: Fügeinhalte Industrieszenario 1

Füge Schritt	Variante	Schweißpunkte (WPS)		Nietpunkte	
		E_a ⁸⁶	E_g ⁸⁷	E_a	E_g
Füge Schritt 1	Variante 1	112	20	32	8
	Variante 2	108	18	32	8
Füge Schritt 2	Variante 1	70	18	70	18
	Variante 2	74	20	74	20
Füge Schritt 3	-	-	-	28	8
Füge Schritt 4	Variante 1	112	26	-	-
	Variante 2	107	18	-	-

⁸⁵ Eigene Abbildung

⁸⁶ E_a – Menge aller Ausfügepunkte

⁸⁷ E_g – Menge aller geometriebildenden Punkte

Für die Berechnung der Anlagenlösungen wurden die in Anhang A1 dokumentierte Wissensbasis verwendet. Zusätzlich wurden die aus Kapitel 5 bekannten Montagetemplates genutzt. Die folgende Abbildung 59 zeigt die durch den Prototyp generierte Lösung für das Industrieszenario 1. Die Rahmen stellen die Stationsverbünde dar und zeigen die Zugehörigkeit zu den einzelnen Fügeschritten an. Das Montagesystem hat 20 Stationen. 15 Handhabungsroboter ermöglichen den Weitergabeprozess zwischen diesen Stationen und das Einsammeln von Einzelteilen. Drei der Handhabungsroboter verfügen über Doppelequipment und neun dieser Handhabungsroboter sind mit stationären Werkzeugen ausgestattet. Insgesamt wurden dem Montagesystem 31 Fügeroboter hinzugefügt. Fünf für das Nieten und 26 für das Widerstandspunktschweißen. Die Roboter haben eine Auslastungsrate von 72,14%. 68,05% dieser Zeit wird für den Fügeprozess verwendet und 31,95 % für Handhabungsprozesse. 27,86 % der Zeit stellen Stillstandszeiten dar. Für die Berechnung des ersten Fügeschritts wurden $6,1 \cdot 10^4$ Knoten expandiert, für den zweiten 95 Knoten, für den dritten Fügenschritt lediglich 55 Knoten und für den vierten Fügenschritt 189 Knoten. Die Gesamtknotenanzahl für das gezeigte Szenario entspricht 61985 Knoten. Bei Anwendung des Prototypen ohne Berücksichtigung der unteren Schranke liegt die Lösung mit dem höchsten Kostenwert 193% über der besten Lösungsvariante. Gesamtinvestment für eine ausgeplante Anlage dieser Größe (nur Hardware) liegt in der Größenordnung von 20-30 Millionen €⁸⁸.

⁸⁸ Diese Kostenangabe dient lediglich dem besseren Verständnis. Die Kostenangaben beziehen sich auf den Endausbauzustand einer Anlage dieser Größenordnung. Dazu gehören neben den hier für die Konzeption genutzten Ressourcen weitere Betriebsmittel wie z.B. für die Steuerungstechnik.

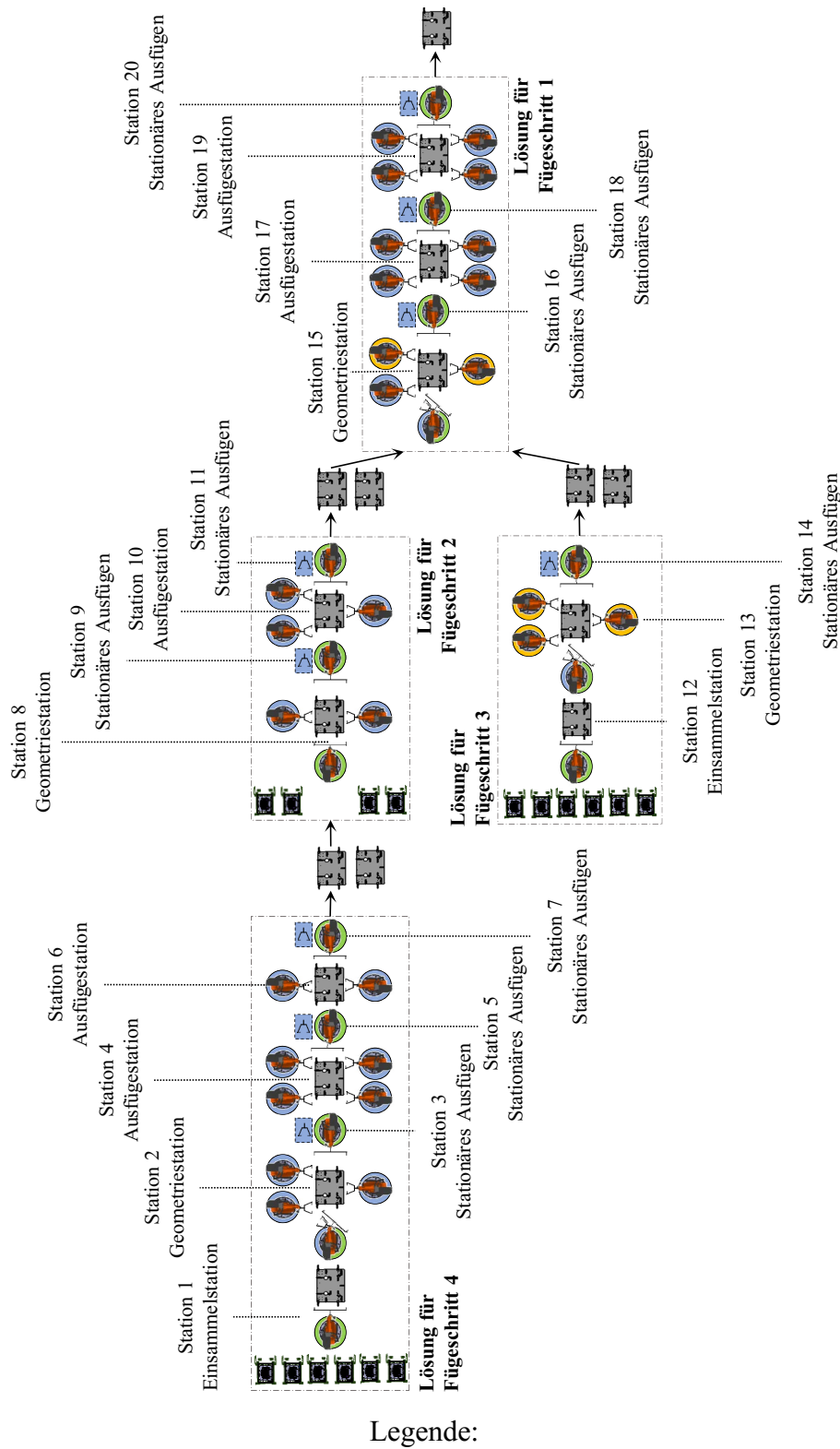


Abbildung 59: Montagesystem Industrieszenario 1: Baugruppe Heckwagen⁸⁹

⁸⁹ Eigene Abbildung

7.2.2 Industrieszenario 2: Baugruppe Motorhaube

Das zweite Industrieszenario umfasst die Montage einer Motorhaube. Die in diesem Szenario betrachtete Motorhaube besteht aus Aluminiumbauteilen. Die Prämisse für die Taktzeit der zu planenden Anlage ist auf 45 s festgelegt. Die Fügeverfahren für die Strukturteile in Fügenschritt 2 umfassen Clinchen und Kleben. Um die Beplankung in Fügenschritt 1 mit den Strukturteilen zu verbinden, werden Strukturkleber und das Fügeverfahren Falzen angewendet. Für die Dichtheit der Falzverbindung werden darüber hinaus Falzkleber eingesetzt.

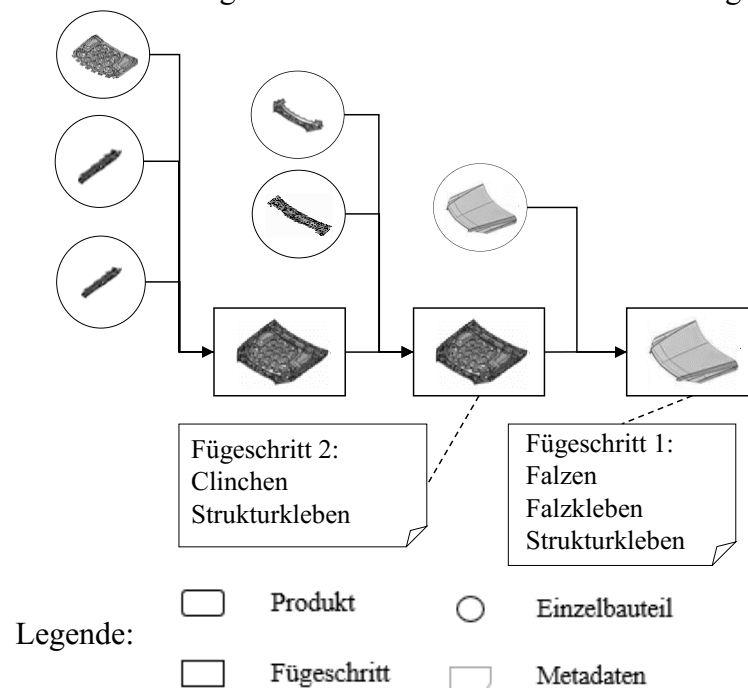


Abbildung 60: Fügefolge Industrieszenario 2 – Baugruppe Motorhaube⁹⁰

Wie in Industrieszenario 1 können die notwendigen Informationen zu den Fügeverfahren der einzelnen Fügenschritte der folgenden Tabelle 25 entnommen werden.

Tabelle 25: Fügeinhalte Industrieszenario 2

Fügenschritt	Clinchen		Strukturkleben		Falzkleben		Falzen	
	E_a	E_g	E_a	E_g	E_a	E_g	E_a	E_g
Fügenschritt 3	32	9	1300 mm	-	-	-	-	-
Fügenschritt 2	26	6	1200 mm	-	-	-	-	-
Fügenschritt 1	-	-	3400 mm	-	4200 mm	-	2000 mm	2200 mm

Gleichermaßen kann die hinterlegte Wissensbasis (Prioritätsmatrix und Standardprozesszeiten) der Anlage A1 entnommen werden. Auch die Montagetemplates sind wie bereits für Industrieszenario 1 dem Kapitel 5 zu entnehmen.

⁹⁰ Eigene Abbildung

Die folgende Abbildung 61 zeigt auf Basis der eingeführten Informationen das durch den Planungsalgorithmus generierte Ergebnis. Das Montagesystem hat 14 Stationen. 14 Handhabungsroboter ermöglichen den Weitergabeprozess zwischen diesen Stationen und das Einsammeln von Einzelteilen. Zwei der Handhabungsroboter werden dabei mit einem Doppelwerkzeug ausgestattet und sechs der Handhabungsroboter unterstützen die Fügeprozesse durch stationäre Werkzeuge. Ein großer Teil der Klebprozesse werden anhand stationärer Klebedüsen ausgeführt. Die Roboter haben insgesamt eine Auslastungsrate von 67,26%. Folgend stellen 31,74% der Prozesse Stillstandszeiten dar. 64,24% der produktiven Tätigkeiten sind wertschöpfend, wohingegen 35,76% der Tätigkeiten nicht wertschöpfenden Handhabungsprozessen zuzuordnen sind.

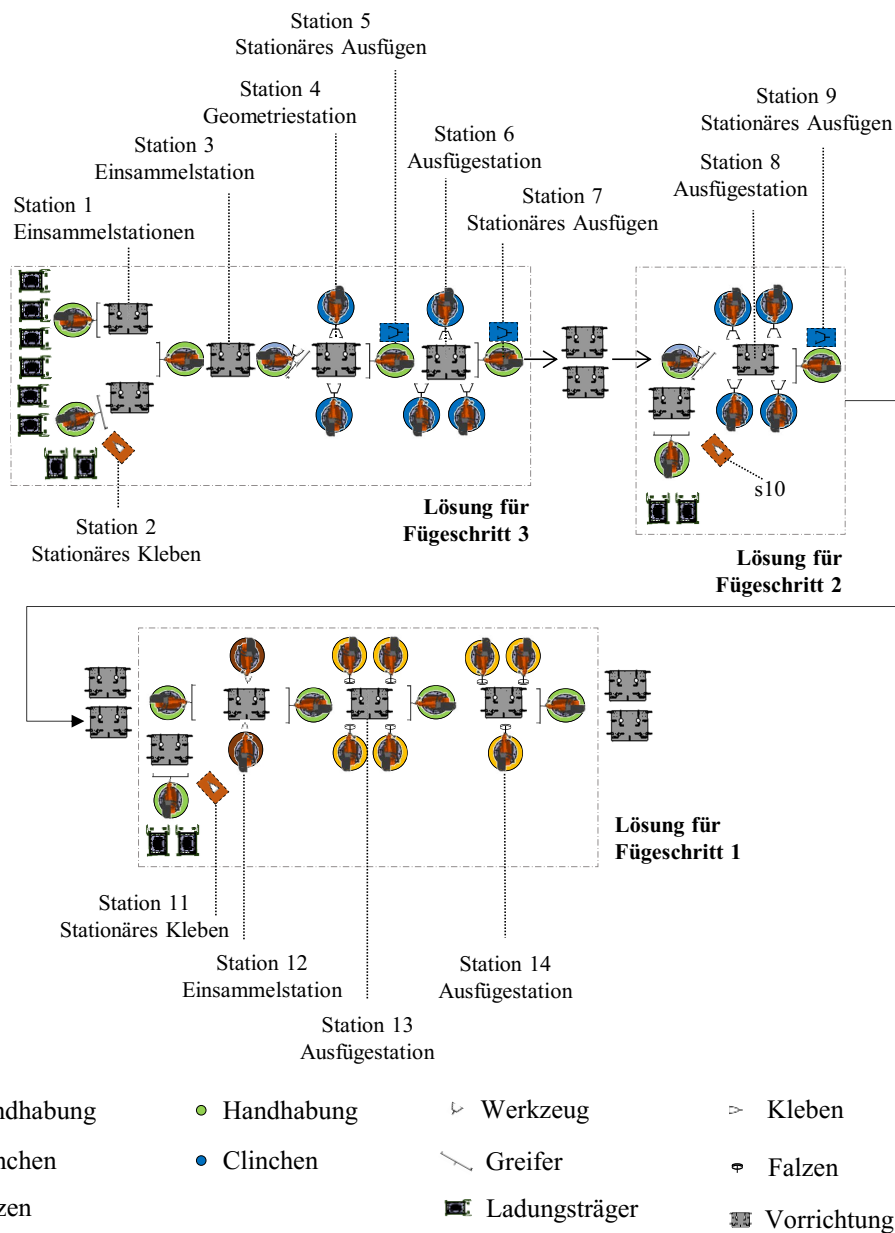


Abbildung 61: Montagesystem Industrieszenario 2: Baugruppe Motorhaube⁹¹

⁹¹ Eigene Abbildung

Für die Berechnung des ersten Fügeschritts wurden 11000 Knoten expandiert, für den zweiten 73 Knoten, für den dritten Fügeschritt lediglich 658 Knoten. Die Gesamtknotenanzahl entspricht 11985 Knoten. Bei Anwendung des Prototypens ohne Berücksichtigung der unteren Schranke liegt die Lösung mit dem höchsten Kostenwert 157% über der besten Lösungsvariante. Gesamtinvestment für eine Anlage dieser Art und Kapazität (nur Hardware) liegt bei einer Größenordnung von 5 Millionen €.

7.2.3 Industrielle Wertebereiche der Eingangsgrößen

Die Wertebereiche der Eingangsgrößen spielen insbesondere für die folgende Bewertung der Algorithmeneffizienz eine maßgebende Rolle, die im Abschnitt 7.2.3 näher untersucht wird. Für die Identifizierung der realen Wertebereiche der Eingangsgrößen industrieller Szenarien wurde eine Analyse innerhalb eines europäischen Automobilherstellers durchgeführt. Die Analyse umfasst die Untersuchung aller Fügeschritte von fünf aktuellen Baureihen inklusive aller betreffenden Derivate und Varianten. Dabei werden die einzelnen Fügeschritte wie auch durch p.2 einzeln betrachtet. Die folgende Abbildung 62 zeigt die Analyseergebnisse für die Wertebereiche von der ausschlaggebenden Eingangsvariablen. Variablen werden genau dann als ausschlaggebend betrachtet, wenn diese innerhalb des Problemlösungsalgorithmus zu einem exponentiellen Anstieg des Berechnungsaufwands beitragen. Dazu gehört die Projektprämisse Taktzeit, die Anzahl der einzelnen Fügeverfahren innerhalb der Fügeschritte, die diesbezüglich erforderlichen Prozesszeiten sowie die Anzahl der zugehörigen Fügeelemente. Ergänzend ist anzumerken, dass in der Abbildung auf eine Unterscheidung zwischen geometriegebenden und Ausfügeelementen verzichtet wurde. Vorhergehende Untersuchungen haben gezeigt, dass geometriegebende Elemente aufgrund der deutlich strengeren Randbedingungen zu einem deutlich geringeren Lösungsraum führen. Damit führt der Verzicht auf die differenzierte Untersuchung von geometriegebenden Elementen zu einer konservativeren Abschätzung der Eingangsgrößen.

Der Wertebereich der Taktzeit-Prämisse, welcher zwischen 45 s und 150 s liegt, ist in der Abbildung 62 obenstehend aufgeführt, da sich die Prämissen auf einzelne (Teil-)Projekte bezieht und nicht auf die folgenden Eigenschaften der einzelnen Fügeschritte. Die Analyse der einzelnen Fügeschritte ist aus diesem Grund getrennt aufgeführt. Zunächst soll diesbezüglich auf die einzelnen Jobs innerhalb der Fügeschritte eingegangen werden. Unabhängig von der Anzahl verschiedener Jobs und der Taktzeit wurde kein Fügeschritt gefunden, der mehr als 200 Fügeelemente enthält. Grundsätzlich besteht diesbezüglich die Tendenz, dass Fügeschritte mit vielen Fügeelementen auch in Kombination mit einer höheren Taktzeit stehen. Die hohe Anzahl an Fügeelementen kommen zumeist in Fügeschritten wie der Seitenwand oder den Hauptmontagelinien vor. Fügeschritte dieser Größenordnung beinhalten im Normalfall einen großen Anteil an Schweißpunkten, da es sich dabei um ein sehr schnelles (Prozesszeit < 3,5 s) als auch billiges Verfahren handelt. Alternative Fügeverfahren wie das Nieten haben höhere Standardprozesszeiten (Prozesszeit > 3,5 s) und sind aus diesem Grund signifikant teurer und zeitaufwendig, erlauben aber das Fügen von unterschiedlichen Materialien. Keine der untersuchten Fügeschritte mit Fügetechnologien mit einer Prozesszeit größer als 3,5 s beinhaltet mehr als 150 Fügeelemente. Für Fügeschritte mit zwei Fügeverfahren hat die Analyse ergeben, dass das zweite Fügeverfahren nie mehr als 50 Fügeelemente beinhaltet. In seltenen Fällen gibt es ein drittes Fügeverfahren in Fügeschritten. Im dritten Fügeverfahren

gibt es maximal zehn weitere Fügeelemente. Zuletzt hat die Analyse hervorgebracht, dass maximal fünf Bauteile in einem Fügenschritt miteinander verbunden werden.

Prämissen	Taktzeit: 45...150 s	
	Job_1 Prozesszeit: 2,5...3,5 s; Anzahl Fügeelemente: 1...200 Prozesszeit: 3.5...4.5 s; Anzahl Fügeelemente: 1...150	
Fügeschritte	ja	Jobs>1 nein
	Job_2 Prozesszeit: 2,5...4,5 s; Anzahl Fügeelemente: 1...200 Prozesszeit: 3.5...4.5 s; Anzahl Fügeelemente: 1...50	
	ja	Jobs>2 nein
	Job_3 Prozesszeit: 2,5...4,5 s; Anzahl Fügeelemente: 1...10	

Abbildung 62: Wertebereich in industriellen Szenarien⁹²

7.3 Informationstechnische und prozessuale Anforderungen

Dieses Kapitel fokussiert sich auf die Überprüfung der informationstechnischen Anforderungen C.1-C.3. Anforderung C.1 und C.2 sind Anforderungen an die Algorithmeneffizienz. Die Anforderung C.3 an die Qualität des Datenmodells, bzw. der Datendurchgängigkeit und Integrierbarkeit in bestehende industrielle IT-Landschaften. Zunächst erfolgt im folgenden Abschnitt 7.3.1 die Untersuchung einer aus Experimenten erhobenen Datenbasis und der Operationalisierung der Anforderungen, also dem Ableiten konkreter Messgrößen. Auf dieser Basis erfolgt die Verifizierung der Anforderungen hinsichtlich der Algorithmeneffizienz. Die Anforderung C.3 erfolgt in Abschnitt 7.3.2 basierend auf der Befragung von Experten.

7.3.1 Algorithmenbewertung und -analyse

Zunächst soll nach Anforderung C.1 die Berechenbarkeit industrieller Anwendungsfälle in einer angemessenen Zeit betrachtet werden. In Kapitel 2 wurde die maximale Berechnungszeit auf 11 h festgelegt. Der Rechenaufwand von kombinatorischen Algorithmen ist sehr hoch und steigt in Abhängigkeit von der Anzahl der Eingangsvariablen und den zugehörigen Eingangswerten, die es zu kombinieren gilt. Aus diesem Grund ist die Algorithmeneffizienz ein entscheidender Bewertungsfaktor. Die Berechnungszeiten hingegen, welche regelmäßig als Bewertungskriterium herangezogen werden, hängen stark von den eingesetzten Computern und der Parallelisierung der Berechnung ab und dienen aus diesem Grund nur bedingt als Evaluationskriterium für die Algorithmeneffizienz. Von deutlich höherer Aussagekraft hat sich die

⁹² Eigene Abbildung

Anzahl der expandierten Knoten als Evaluationskriterium für die Bewertung von diskreten Suchalgorithmen erwiesen (Ausiello 2003, S. 2). Dennoch ist für die Entscheidung für den industriellen Einsatz eine Darlegung von Berechnungszeiten von hoher Wichtigkeit. Im Folgenden wird zunächst auf die Algorithmeneffizienz auf Basis der expandierten Knoten eingegangen und folgend auf die Ergebnisse der Berechnungszeiten.

Die theoretische Berechnung der Anzahl an Kombinationen für die Untersuchung der Algorithmeneffizienz ist für die hier entwickelte Methode und den umgesetzten Algorithmus nicht trivial. Für die Bewertung der Algorithmeneffizienz wurde aus diesem Grund auf computerbasierte Experimente zurückgegriffen. Exemplarisch werden in Abbildung 53 ein Teil der Versuchsergebnisse aufgezeigt, weitere Versuchsergebnisse sind im Anhang A2 zu finden. Der 3D-Plot in Abbildung 53 zeigt den Rechenaufwand für die Kalkulation von Montagesystemkonfigurationen und basiert auf 400 durchgeführten Kalkulationen. Das graue Netz zeigt den Berechnungsaufwand für Fügeschritte mit Widerstandspunktschweißelementen aufgetragen über die Zeit. Die einzelnen Punkte des Netzes zeigen über die vertikale Achse die Anzahl expandierter Knoten. Es ist deutlich erkennbar, dass der Berechnungsaufwand bei steigender Anzahl an Fügeelementen und sinkender Taktzeit exponentiell ansteigt. Die eingezeichnete schwarze Box auf der grauen Fläche zeigt die Ergebnisse der zuvor erwähnten Analyse und damit den Wertebereich industrieller Anwendungsfälle für das Verfahren Punktschweißen. Der extremste industrielle Anwendungsfall in dieser Abbildung ist die Kombination aus einer Taktzeit von 45 s und der Anzahl von 200 Schweißpunkten. Der blaue Graph zeigt für eine Taktzeit von 45 s die Anzahl expandierter Knoten unter Anwendung einer vollständigen Permutation möglicher Anlagenkonfigurationen, also ohne Einsatz der entwickelten impliziten Suchstrategie. Schon für den hier dargestellten industriellen Extremfall würde eine Berechnung zu über mehr als 10^9 Lösungen führen.

Es ist nicht offensichtlich, welche Kombination der Eingangswerte zu der höchsten Anzahl expandierter Knoten führt. Die folgende Tabelle 26 führt Testergebnisse auf, die zu extrem aufwendigen Ergebnissen geführt haben. Damit nicht alle möglichen Kombinationen der Wertebereiche berechnet werden müssen, wurden dabei die Variablen, für die der Wert bekannt ist, die zu der höchsten Anzahl an Kombinationen führt, fixiert. Als Beispiel kann diesbezüglich die Taktzeit herangezogen werden, denn je kleiner die Taktzeit ist, desto größer ist die Anzahl der Kombinationen, dies wird u.a. bei Betrachtung der Abbildung 63 ersichtlich. Aus diesem Grund wird dieser Wert für die Taktzeit bei 45 s festgehalten, dem kleinsten Wert der industriellen Studie. Grund für das Verhalten ist die Notwendigkeit von mehr Stationen und mehr Robotern für das Ausführen einer Montageaufgabe bei kleineren Taktzeiten. Mehr Stationen und Ressourcen führen gleichzeitig zu einem tieferen Suchbaum, dessen Breite in der Tiefe exponentiell ansteigt und somit auch zu einem exponentiell wachsenden Suchraum führt. Gleiches gilt für die Prozesszeit der Fügeverfahren, welche abhängig von der Anzahl der maximalen Fügeelemente bei 3,5, bzw. 4,5 s festgehalten wird und somit zu einer maximalen Anzahl an Kombinationen führt. Zuletzt soll auf die Anzahl der Fügeelemente eingegangen werden, welche jeweils für die Anzahl der Jobs auf die maximale Anzahl nach Abbildung 62 gesetzt wird.

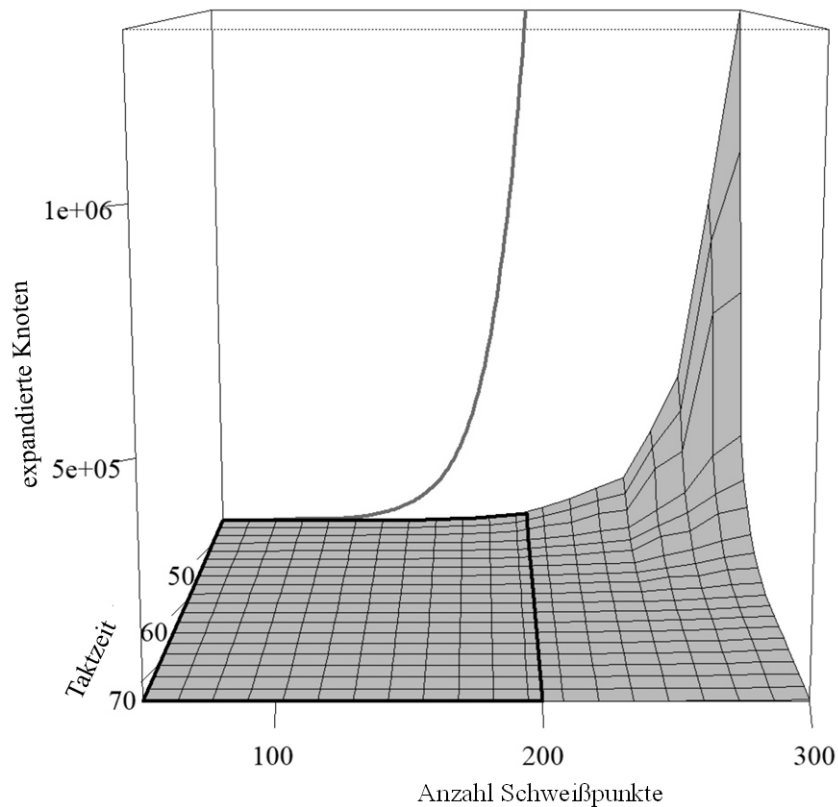


Abbildung 63: Softwareexperimente Abschätzung Berechnungsaufwand⁹³

Einzig das Verhältnis der Anzahl an Fügeelementen zwischen den Jobs, das zu einem maximalen Rechenaufwand führt, wurde durch Kombinatorik bestimmt, vgl. Spalte 2-4 in Tabelle 26. Da eine vollständige Kombination aller Wertepaare zu einem immensen Rechenaufwand führen würde, wurden diesbezüglich Stichproben genommen, die den großen Kombinationsbereich gleichmäßig abdecken und das globale Maximum annähernd bestimmen. Ein Auszug aus diesen Stichproben ist in Tabelle 26 vorzufinden. Die Versuche zeigen, dass die Anzahl an expandierten Knoten nicht über 10^9 Knoten liegt. Damit zeigen die Versuche auf, dass der Algorithmus die in Kapitel 7.2.3 gezeigten industriellen Wertebereiche innerhalb von Minuten absucht. Die Anforderung C.1 ist somit vollumfänglich erfüllt.

Tabelle 26: Softwarebasierte Berechnungsergebnisse

Test Nummer	Job 1	Job 2	Job 3	Expandierte Knoten
1	$t_{sp} = 3.5 \text{ s}; |E| = 200$	-	-	$6,7 * 10^4$
2	$t_{sp} = 4.5 \text{ s}; |E| = 150$	-	-	$6,6 * 10^5$
3	$t_{sp} = 3.5 \text{ s}; |E| = 150$	$t_{sp} = 4.5 \text{ s}; |E| = 50$	-	$3,64 * 10^7$
4	$t_{sp} = 4.5 \text{ s}; |E| = 100$	$t_{sp} = 4.5 \text{ s}; |E| = 50$	-	$1,74 * 10^8$
5	$t_{sp} = 3.5 \text{ s}; |E| = 150$	$t_{sp} = 4.5 \text{ s}; |E| = 40$	$t_{sp} = 4.5 \text{ s}; |E| = 10$	$2,72 * 10^8$
6	$t_{sp} = 4.5 \text{ s}; |E| = 100$	$t_{sp} = 4.5 \text{ s}; |E| = 40$	$t_{sp} = 4.5 \text{ s}; |E| = 10$	$9,89 * 10^8$

⁹³ Eigene Abbildung

Neben Anforderung C.1 soll nun Anforderung C.2 betrachtet werden. In C.2 werden Eigenschaften des Algorithmus eingefordert: Vollständigkeit, Optimalität, Transparenz und Nachvollziehbarkeit. Für die Verifikation dieser Anforderungen soll darauf hingewiesen werden, dass sich die Anforderung Optimalität auf Eigenschaften und Funktionsweisen des Algorithmus beziehen und nicht auf die produktionstechnische Ergebnisqualität, wie zum Beispiel der produktionstechnischen Optimalität der Konfiguration. Auf diese wird separat im folgenden Abschnitt 7.4.2 eingegangen.

Zunächst soll auf die Aspekte Vollständigkeit und Optimalität eingegangen werden. Ein vollständiger Algorithmus zeichnet sich dadurch aus, dass er eine Lösung im Suchraum findet, sofern es eine gibt. Darüber hinaus findet ein optimaler Algorithmus immer die optimale Lösung im Suchraum, in diesem Fall durch Beschreibung des Optimierungsmodells. Damit grenzen sich vollständige und optimale Algorithmen von Heuristiken ab (vgl. Abschnitt 5.2). Da sich die hier behandelte Methode in drei Teilbereiche untergliedert, findet auch eine getrennte Bewertung statt. Zunächst soll auf den Kern der Methode eingegangen werden, der Prozess- und Stationsgestaltung. Diese Problemlösungskomponente verwendet einen kombinatorischen Ansatz mit optimaler und vollständiger Suchstrategie. Für die Prozess- und Stationsgestaltung ist somit die Anforderung erfüllt. Für die Produkt- und Fügefolgeanalyse sowie auch für die Systembildung wurde ein regelbasierter Algorithmus angewandt, der die Eingangsinformationen für die Bearbeitung analysiert und vorbereitet. Diese Arbeitsschritte werden auch durch den Menschen deterministisch durchgeführt und können regelbasiert optimal gelöst werden. Es bleibt zu erwähnen, dass die Systembildung und insbesondere die notwendigen Gestaltungsvorgänge Alternativen aufweisen können, die unter Umständen zu besseren Ergebnissen führen. Untersuchungen werden diesbezüglich in Abschnitt 5.4.3 ausführlich erläutert. Die folgende Tabelle 27 fasst die soeben beschriebene Verifizierung der Anforderungen C.1 und C.2 über die einzelnen Problemlösungsfunktionen zusammen.

Tabelle 27: Verifikation Anforderung C.1 und C.2

	Produkt- und Fügefolgeanalyse	Prozess- und Stationsgestaltung	Systembildung
C.1	●	●	●
C.2	●	●	◐

Legende:

 Anforderung (nahezu) nicht erfüllt
  Anforderung teilweise erfüllt
  Anforderung annähernd erfüllt
  Anforderung vollumfänglich erfüllt

7.3.2 Systemintegrierbarkeit und PPR-Informationsmodell

In diesem Abschnitt wird die Anforderung C.3 nähergehend betrachtet. C.3 bezieht sich auf die Integrierbarkeit in die heutigen IT-Systemlandschaften.

Um Anforderung C.3 zu überprüfen, wurden Expertenworkshops durchgeführt. Die Auswahl der Teilnehmer dieser Workshops sind in Anhang A3 dokumentiert. Die Auswahl der Teilnehmer basiert dabei auf dem Ziel ein möglichst breites Spektrum an Kompetenz für die

entsprechenden Anforderungen abzudecken. Den Experten wurde das in Abschnitt 6.3 entwickelte Integrationskonzept anhand des prototypischen Systems vorgestellt und insbesondere die Datendurchgängigkeit (filebasiert, AutomationML) mit Hilfe der Planungssoftware Delmia V5 aufgezeigt. Die anwesenden Experten in den Workshops waren sich einig, dass eine Integration in bestehende Systemlandschaften aus IT-Sicht möglich ist. Dennoch äußerten sich die Teilnehmer skeptisch über die vermutlich unzureichende Datenintegrität und Dokumentationsqualität in heutigen produkt- und anlagenspezifischen Datenmanagementsystemen. Eingabedaten wie die Produktstrukturen und Fügefolgen liegen zwar heute in digitaler Form vor, jedoch sind diese Modelle häufig nicht ausreichend beschrieben. Für eine vollständige Beschreibung ist z.B. die digitale Dokumentation aller Fügeverfahren notwendig. Für das Industrieszenario 2 waren diesbezüglich Falzstrecken nicht im digitalen Modell dokumentiert und mussten manuell für die Evaluation ergänzt werden. Aber auch in Bezug auf die Wissensbasis könnten Aspekte der Datenqualität den Integrationsaufwand erhöhen. So bestehen heute häufig keine digitalen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Wissensobjektinstanzen. Eine Prozessbibliothek kann exemplarisch häufig nicht maschinenbasiert abgewonnen werden, für welche Fügeverfahren die einzelnen Standardprozesse vorgesehen sind und der Zusammenhang kann nicht abgebildet werden. Diesbezüglich sind auch heutige virtuelle Betriebsmittel nicht ausreichend attribuiert, um eine Fähigkeit zum Ausführen eines Prozesses abzuleiten. Durch die Experten wurde darüber hinaus bestätigt, dass die Ablage der Montagetemplates gänzlich neu entwickelt und folgend integriert werden müsste. Denn heutige Planungssysteme können mit Ihren aktuellen Datenmodellen diese Montagetemplates nicht abbilden. Zuletzt wurde darüber hinaus auch bestätigt, dass die Algorithmen, wie sie im Integrationskonzept vorgesehen wurden, als separates Modul vorgesehen werden sollten.

Dennoch wurde ein großes Potenzial hinsichtlich der Datendurchgängigkeit, der Datenintegrität und Automatisierung durch die vorgestellte Methode und dem Integrationskonzept in den frühen Phasen der Anlagenplanung gesehen. Die Experten betonten, dass die Betrachtung des Integrationskonzept die Schwachstellen heutiger Systemlandschaften in Bezug auf das Konzept der Digitalen Fabrik aufzeigen. Unabhängig von der Integration von Planungsalgorithmen muss es laut der Interviewten Ziel sein, ein umfangreiches PPR-Konzept in der Industrie sowie die dafür notwendigen Unternehmensprozesse zu etablieren. Zusammengefasst konnte festgestellt werden, dass für alle drei Bereiche der Methode und Applikation eine Integration möglich ist, dabei jedoch der Aufwand für eine Integration nicht zu vernachlässigen ist. Denn die Integration erfordert neue Schnittstellen, Anpassungen der Datenmodelle für die Bereitstellung einer vollumfänglichen Wissensbasis und Mechanismen für den Austausch bzw. der Bereitstellung der Berechnungsergebnisse. Die folgende Tabelle 28 fasst die Bewertung der Anforderungen C.3 zusammen.

Tabelle 28: Verifikation Anforderung C.3

	Produkt- und Folgeanalyse	Prozess- und Stationsgestaltung	Systembildung
C.3			

Legende:

 Anforderung (nahezu) nicht erfüllt
  Anforderung teilweise erfüllt
  Anforderung annähernd erfüllt
  Anforderung vollumfänglich erfüllt

7.4 Planungsspezifische Anforderungen

In diesem Abschnitt wird auf die planungsspezifischen Anforderungen eingegangen. Die Anforderungen A.1 - A.3 beziehen sich dabei sowohl auf produktbezogene (Abschnitt 7.4.1) als auch produktionstechnische Anforderungen B.1 + B.2 (Abschnitt 7.4.2). Zu allen Planungsspezifischen Anforderungen wurden während der Methoden- und Systementwicklung regelmäßig Workshops durchgeführt, um die automatisierten Planungsergebnisse stetig zu verbessern. Eine ausführliche Dokumentation der Ergebnisse kann dem Anhang A4 entnommen werden.

7.4.1 Produktspezifische Anforderungen

Die Anforderungen B.1 und B.2 stellen produktspezifische Anforderungen dar. Zum einen wird durch die Anforderungen gefordert, dass die Methode auf alle gängigen Karosseriebauarten anwendbar ist (B.1) und darüber hinaus auf alle dazugehörigen Karosseriebereiche (B.2). Die Methode deckt beide Anforderungen ab. Bei der näheren Betrachtung von selbsttragenden-, nichtselbsttragenden- oder auch Mischbauweisen fällt auf, dass die frühen Montageplanungsphasen nicht im direkten Zusammenhang mit den Bauweisen stehen. Unabhängig von der Karosserieart kann für die Montage eine variantenbehaftete Fügefolge festgelegt, die Fügeelemente untersucht und entsprechend Ressourcen und Prozesse gestaltet werden. Auch der mögliche Einsatz von abweichenden Füge Technologien wird durch die flexible Wissensbasis der Methode abgedeckt. Für die weitere Evaluation der Anforderung B.1 wurde die Fügefolge einer Rahmenstruktur einer Lastkraftwagenbaureihe sowie einer Space-Frame PKW-Karosserie gesichtet und keine Hindernisse in Bezug auf die Anwendung der Methode festgestellt.

Die Anforderung B.2 bezieht sich auf die Abdeckung der verschiedenen Bereiche von Karosserien. Diesbezüglich sind insbesondere die unterschiedlichen Charakteristiken der einzelnen Bereiche zu betrachten. Während die ersten zwei Zusammenbaustufen die strukturierenden Bereiche einer Karosserie umfassen, umfasst die dritte Zusammenbaustufe die beweglichen und nicht strukturell, nicht-integrierten Bereiche der Karosserie. Insbesondere die nicht-integrierten Bereiche bedienen sich differenzierender Fügeverfahren. Diesbezüglich stellen Verfahren, die nicht auf den Einsatz von Fügeelementen basieren, eine Herausforderung dar, denn trotzdem benötigt diese Methode eine umfassende digitale Dokumentation. Für das Verfahren

Falzen erfordert dies zum Beispiel die digitale Dokumentation der Fügestrecke, darüber hinaus eine Dokumentation wie oft die Falzstrecke abgefahren werden muss (Anzahl der Falzstufen). Ist die Bedingung der ausführlichen Dokumentation für alle Fügeverfahren erfüllt, so erfüllt die Methode die Anforderung vollständig. Prinzipiell hat die Methode den Anspruch, auch gänzlich andere Produkte abzudecken. Von der Erprobung der entwickelten Methode anhand von Produkten anderer Art wurde in der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit abgesehen. Jedoch soll diesbezüglich eine Abschätzung abgegeben werden. Diese Abschätzung basiert auf einem weiteren Beispiel: dem Bau von Waschmaschinen. Die Montage von Waschmaschinen kann prinzipiell in zwei Gewerke unterteilt werden. Der Aggregatmontage sowie der Gehäusemontage. Beide Gewerken haben ein hohes Potential für die Automatisierung. Die Gehäusemontage ähnelt der Karosseriemontage, da das Gehäuse den strukturgebenden Teil der Waschmaschinen darstellt und in vielen Werken bereits vollständig, durch den Einsatz von Industrierobotern, automatisiert ist. Für das Fügen der Gehäuse kommt größtenteils das Verfahren Clinchen zum Einsatz und für die Dokumentation der Fügeschritte wird eine Fügefolge erstellt. (ABB 2020) Die Montage findet entweder in Vorrichtungen statt oder in vorrichtungsfreien Stationen statt, in denen die einzelnen Bauteile durch Roboter zueinander positioniert werden. Aus Sicht des Autors steht der Anwendung der hier entwickelten Methode bzw. des Systems nichts entgegen. Durch die flexible Wissensbasis ist es möglich, die Methode auf Produkte anzupassen, für die eine automatisierte Montage realisierbar ist.

Die folgende Tabelle 29 fasst die Evaluation der Anforderungen B.1 und B.2 durch das Expertenteam zusammen.

Tabelle 29: Verifikation Anforderung B.1 und B.2

	Produkt- und Füge- folgeanalyse	Prozess- und Stations- gestaltung	Systembildung
B.1	●	●	●
B.2	●	●	●

Legende:

			
Anforderung (nahezu) nicht erfüllt	Anforderung teilweise erfüllt	Anforderung annähernd erfüllt	Anforderung vollumfänglich erfüllt

7.4.2 Produktionsspezifische Anforderungen

Der letzte Teil der Evaluation umfasst die Bewertung der Anlagengenerierung auf Basis der prototypischen Umsetzung und stellt damit den wichtigsten als auch schwierigsten Teil der Evaluation dar. Die Evaluation strukturiert sich auch in diesem Abschnitt anhand der gestellten Anforderungen (A.1-A.3). A.1 bezieht sich dabei auf die prozessuale Integrierbarkeit der Methode in heutige industrielle Produktentstehungsprozesse, A.2 auf die Generierung von Ressourcenstrukturen und Prozessbeschreibungen und A.3 auf die Güte der durch die Methode generierten Anlagen. Für die Verifikation aller drei Anforderungen wird eine bewertende Evaluation anhand der zwei gegebenen Industrieszenarien angewandt. Die Bewertung

wurde von Experten im Rahmen von Evaluationsworkshops vorgenommen. Eine weiterführende Dokumentation der Workshops ist im Anhang in Abschnitt A3 aufzufinden.

Anforderung A.1 fordert eine vollständige Integrierbarkeit der Methode in bestehende Produktentstehungsprozesse. Diesbezüglich wurde das Expertenteam zunächst aufgefordert, betreffende Prozesse zu identifizieren, welche im Folgenden aufgezeigt werden:

- Klassische Prozesse der Anlagenkonzipierung
- Prozesse der kollaborativen Fabrikplanung
- Prozesse der produktionsgerechten Produktgestaltung
- Prozesse hinsichtlich der Unterstützung strategischer Entscheidungen

Nach Meinung der Experten sind die Prozesse der klassischen Anlagenkonzipierung gut in die aktuellen Planungsprozesse integrierbar und ergeben insbesondere in den initialen Planungsphasen ein großes Effizienzpotential. Jedoch wurde auch das zunächst gegensätzliche erscheinende Vorgehen aktueller Modul- und Templatestrategien intensiv diskutiert, die momentan von einem Großteil der Automotive-OEMs verfolgt wird. Die Expertengruppe kam zu dem Entschluss, dass die Methode keinen Widerspruch zu den aktuellen Modul- und Templateaktivitäten darstellen muss. Nicht immer können durch die Karosserieentwicklung die Limitationen von Templates eingehalten werden. Die Erfahrungen der Planer zeigen, dass diese Fälle weiterhin einen großen Teil der Karosseriebereiche einnehmen. Insbesondere die aktuelle Diversitätssteigerung der Karosseriearchitekturen durch neue Elektro- und Hybridmodelle führt wieder zu einer stärkeren Individualisierung der Anlagen und damit zur Notwendigkeit von individuellen Planungen, zum Beispiel durch Automatismen. Weitere Forschungsaktivitäten sollten dementsprechend in die Methodenentwicklung investiert werden, deren Ergebnisse es ermöglichen auch bestehende Planungen oder entsprechend Module- und Templates berücksichtigen zu können, um gezielt Änderungsbedarfe bzw. Änderungsvorschläge zu generieren. Dadurch wäre auch eine Kombination aus Template- und algorithmischer Planung möglich.

Des Weiteren wurde die Integration neben der initialen Planung in frühen Planungsphasen in weiterführende Planungsaktivitäten untersucht. Diesbezüglich wurde durch das Expertenteam kritisch betrachtet, dass der heutige Stand der Methode nicht ermöglicht, bereits händisch vorgenommene Änderungen beizubehalten bzw. für eine fortführende algorithmische Planung zu nutzen. Bei einer Produkt- oder Prämissenänderungen könnte man zwar ein neues Anlagenkonzept durch die Algorithmen generieren lassen, jedoch können händische Eingriffe der Planer zum heutigen Stand nicht berücksichtigt werden. Dieser Bereich wurde bisher im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht berücksichtigt, sollte jedoch in zukünftigen Forschungsaktivitäten in den Fokus rücken.

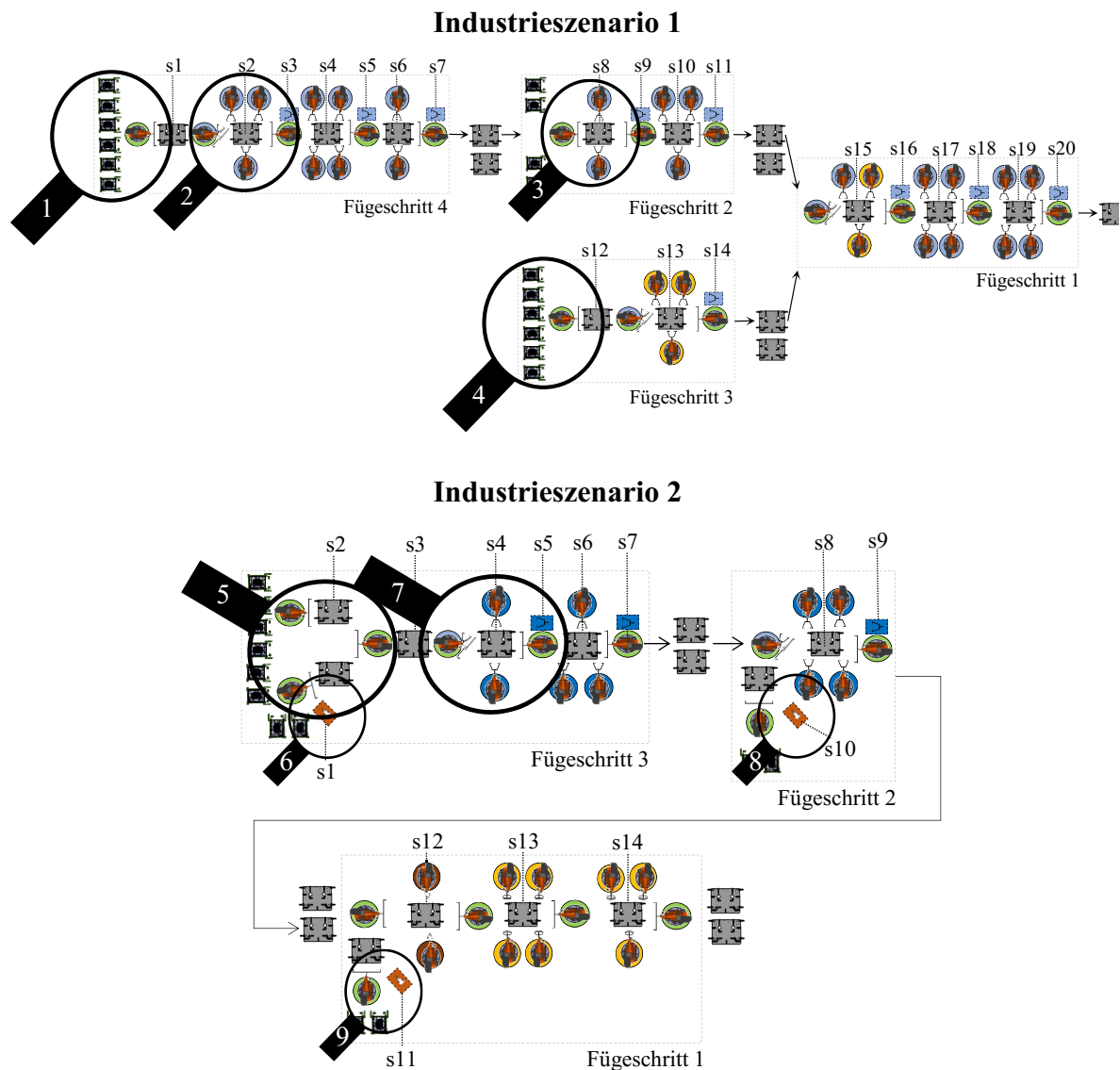
Auch die Einrichtungsplanung benötigt Anlageninformationen wie Hüllgeometrien und Medienbedarfen der Anlagen bereits in den frühen Planungsphasen. Die Methode lässt sich dabei ohne weiteres in die aktuellen meist noch wenig digitalisierten Kollaborationsprozesse zwischen Anlagenplanung und Einrichtungsplanung integrieren.

Neben den klassischen Konzeptions- und Entwicklungstätigkeiten wurden durch die Experten auch die Integration in solche Prozesse bewertet, welche der Entscheidungsfindung in der produktionsgerechten Produktgestaltung (PPG) und der strategischen Produktionsplanung

dienen. Entwicklungsvarianten oder Produktänderungen führen heute zu umfangreichen Untersuchungsaufwänden in der Produktionsplanung, und die Rückmeldung für die Produktentwicklung nimmt einige Zeit in Anspruch. Eine automatisierte Generierung von Anlagenkonzepten und im besten Fall eine automatisierte Deltaanalyse führt laut der Experten zu einer deutlichen Verkürzung der Analysetätigkeiten. Darüber hinaus würde sie zu einer hohen Transparenzsteigerung für den Produktentwickler führen. Für den Produktentwickler wäre ad-hoc ersichtlich, welche Änderungen an der Produktkonstruktion welche Auswirkungen am Anlagenmodell hat. Dadurch würde sich nicht nur der Anlagenplanungsprozess deutlich verkürzen, sondern auch die Entwicklung von Karosserieprodukten nennenswert unterstützt werden. Auch die Integration der entwickelten Methode in bestehende Prozesse der strategischen Produktionsplanung zeigt hohe Potentiale auf. Nach Einschätzung der Experten könnten die Ergebnisse der Planungsalgorithmen ohne weitere Anpassungen für strategische Entscheidungen eingesetzt werden, solange deren Qualität sichergestellt ist. Da heutige Entscheidungen zumeist auf Erfahrungswissen und Abschätzungen der Planer getroffen werden, stellt jegliche Möglichkeit der Entscheidungsquantifizierung ein großes Potential dar, die strategische Produktionsplanung zu unterstützen.

Anforderung A.2 fordert die automatisierte Erstellung eines Montageprozesses und der dazugehörigen Montageressourcen sowie der Anlagestruktur. Dieser Teil der Anforderung wurde vollumfänglich durch die automatisierte Generierung zahlreicher Testinstanzen bestätigt. Darüber hinaus wird die technische Sinnhaftigkeit der Berechnungsergebnisse gefordert. Die Bewertung der technischen Sinnhaftigkeit wird im Folgenden durch die Experten anhand der zwei eingeführten Industrieszenarien durchgeführt. Insgesamt wurde die technische Umsetzbarkeit der Berechnungsergebnisse als sehr gut bewertet. Dabei wurde insbesondere die hohe digitale Dokumentationsqualität betont und als großer Benefit hinsichtlich der Verkürzung folgender und angrenzender Prozesse hervorgehoben. Dennoch sind einige negative Aspekte bei der genauen Analyse identifiziert worden, die im Folgenden aufgeführt werden. Durch die Methode wird davon ausgegangen, dass bei der Wahl von Greifern bzw. Vorrichtungen alle Varianten abgedeckt werden können. So ist es bei genauer Betrachtung der Zusammenbauzustände und der Einzelbauteile für die durch die Lupen markierten Bereiche 1 und 5 in der folgenden Abbildung 64 nicht möglich, alle Bauteile aller Varianten mit einem Greifer einzusammeln. Trotz der aktuell steigenden Flexibilität von Greifern und Vorrichtungen kann in der Anlagentechnik weiterhin nicht davon ausgegangen werden, dass die Anpassungsfähigkeit der Greifer und Vorrichtungen den Einsatz für alle Variantengeometrien ermöglicht. Gleichartige Geometrieuntersuchungen müssen auch für den Einsatz unterschiedlicher Werkzeuge stattfinden. Nach der vorliegenden Methode wird davon ausgegangen, dass jedes Werkzeug jeden Fügepunkt erreicht und fügen kann. Für jeden Fügeprozess merkten die Experten an, dass zunächst die Erreichbarkeit durch das entsprechende Werkzeug durch Simulationen untersucht werden muss. Zumeist werden für diese Simulationen mehrere Standardwerkzeuggeometrien herangezogen. Basierend auf den Ergebnissen muss der Produktionsplaner entscheiden, welches Fügeelement durch welches Werkzeug gesetzt wird. In der Idealplanung führt der Produktionsplaner diese Tätigkeit zunächst durch Heuristiken oder auf Erfahrung basierender Abschätzungen durch. Dies könnte aber auch auf Basis von Algorithmen gelöst werden. Weiterführende Untersuchungen finden erst in den Prozessen der Realplanung statt. In den vorliegenden Industrieszenarien stellt genau dieser Umstand in den durch die Lupen

2,3 und 7 markierten Bereichen ein technisch nicht realisierbares Anlagenkonzept dar, siehe Abbildung 64. Minimaler Anspruch an die Methode ist aus Sicht der Experten eine heuristische Abschätzung darüber, wie viele verschiedene Werkzeuge benötigt werden, um daraufhin die Abwägung zwischen Werkzeugwechseln oder der Verteilung auf verschiedene Roboter zu unterstützen bzw. der spezifischen Konstruktion eines Spezialwerkzeugs. Detailliertere Untersuchungen würden damit in der Verantwortung der Realplanung bleiben.



Identifizierte Optimierungspotentiale:

Technische Sinnhaftigkeit:

- Greiferauswahl: 1, 4
- Werkzeugauswahl: 2, 3, 7

Monetäre Optimalität:

- Klebeszenarien: 6, 8, 9
- Handhabungszenarien: 1, 3, 4, 5, 6, 8, 9
- Umgang mit symmetrischen Bauteilen: 1, 3, 4, 5

Abbildung 64: Defizitanalyse in den generierten Anlagenkonzepten⁹⁴

⁹⁴ Eigene Abbildung

Zuletzt wurde ein geometrisches Problem durch die Experten identifiziert. Eine weitere geometrische Untersuchung wäre für den Einsatz von stationären Werkzeugen erforderlich. Ähnlich wie bei der Werkzeugwahl wird auch bei den stationären Werkzeugen davon ausgegangen, dass diese für alle Bauteile anwendbar sind. Bei sehr sperrigen und schweren Zusammenbauten ist es allerdings nicht immer möglich, die notwendige Prozessrobustheit beim Fügen durch stationäre Werkzeuge sicherzustellen. In den vorliegenden Szenarien können jedoch alle Bauteile und Zusammenbauten stationär bearbeitet werden. In Anhang A3 zeigt Abbildung 65 ein solches stationäres Füg Szenario.

Ansonsten stellen die generierten Anlagenkonzepte valide technische Lösungen dar, sodass nun auf Anforderung A.3 eingegangen wird. Die Anforderung fordert, dass die generierten Lösungen möglichst nahe am monetären Optimum liegen. Die Lösungen wurden durch die Experten also ein weiteres Mal analysiert, diesmal in Bezug auf ihre Optimalität. Dabei soll auf drei Aspekte eingegangen werden, die wiederum durch die Lupen in der Abbildung hervorgehoben sind. Erster behandelt die Optimierungsmöglichkeiten für Klebeszenarien. Klebeszenarien stellen aus vielerlei Hinsicht sehr komplexe Prozesse für die initiale algorithmische Planung dar. Insbesondere weil sie meist mit Handhabungsprozessen interagieren und nicht komplett getrennt betrachtet werden können. Die Experten haben diesbezüglich Optimierungspotentiale für die Bereiche 6, 8 und 9 in Abbildung 64 identifiziert. Für alle drei Bereiche hat der Algorithmus einen stationären Klebeprozess vorgesehen, der aus produktionstechnischer Sicht auch einem gültigen Konzept entspricht, jedoch einen weiteren Roboter inkl. Ablage erfordert. Die Methode bietet zum vorliegenden Stand keine Funktionalität, den Klebeprozess mit weiteren Einsammelprozessen zu kombinieren. Insbesondere bei kurzen Klebestrecken und langen Taktzeiten würde diese Situation zu einer sehr niedrigen Auslastung der entsprechenden Klebe- und Handhabungsroboter führen.

In diesem Zusammenhang wurden auch die Handhabungsprozesse als Optimierungspotential identifiziert. Für Stationen, in denen sehr viele Bauteile eingesammelt werden müssen, werden durch die Methode zumeist kaskadierende Stationen eingesetzt, die die Handhabungsprozesse auf mehrere Stationen und Roboter verteilen, wie durch Markierung 5 ersichtlich wird, siehe Abbildung 64. Auch diese Lösung stellt eine technisch valide Lösung dar, vernachlässigt allerdings nicht die Möglichkeit, mit zwei verschiedenen Robotern in eine Vorrichtung einzulegen. Dieses Optimierungspotenzial kann über die Definition weiterer Montagetemplates gelöst werden und ist dabei keine direkte Kritik an der vorliegenden Methode. Dennoch soll anhand dieser aufgezeigten Beispiele aufgezeigt werden, dass durch die Definition weiterer Montagetemplates optimalere Lösungen generiert werden können, die eine höhere Effizienz aufweisen. Zuletzt soll auf das Optimierungspotential durch die Berücksichtigung von produktgeometrischen Symmetrien eingegangen werden. Durch die Experten wurde das diesbezügliche Potential als am höchsten eingeschätzt. In den zwei Industrieszenarien besteht folgend in den Bereichen 1, 3, 4 und 5 Optimierungspotential. Zum einen kann nach Aussage der Experten der Einsammelprozess optimiert werden, indem symmetrische Bauteile in einem Ladungsträger bereitgestellt werden und im besten Fall durch einen Greifprozess eines Greifers aufgenommen werden. Diese können aber auch zumeist gleichzeitig durch einen Greifer eingelegt werden, wodurch wiederum ganze Handhabungsschritte eingespart werden können.

Trotz der Aspekte, die durch die Experten identifiziert wurden, um sowohl die technische Validität der Lösungen sicherzustellen als auch die monetäre Optimalität zu verbessern, wurde

die Methode als große und qualitativ hochwertige Unterstützung für den Planer bewertet. Die folgende Tabelle 30 zeigt die zusammenfassende Bewertung der Experten auf.

Tabelle 30: Verifikation Anforderung A.1-A.3

	Produkt- und Folgeanalyse	Prozess- und Stationsgestaltung	Systembildung
A.1			
A.2			
A.3			

Legende:

			
Anforderung (nahezu) nicht erfüllt	Anforderung teilweise erfüllt	Anforderung annähernd erfüllt	Anforderung vollumfänglich erfüllt

7.5 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde die Methode anhand der prototypischen Umsetzung des Softwaresystems evaluiert. Ziel der Evaluation war es dabei die Anforderungen an die Methode und das Planungssystem zu überprüfen. Dabei hat die Evaluation ergeben, dass sich die Methode in heutige System- und Prozesslandschaften integrieren lässt als Grundvoraussetzung für den industriellen Einsatz. Darüber hinaus wurde die Leistungsfähigkeit und die Algorithmeneffizienz untersucht. Die diesbezüglich durchgeführten Softwareexperimente zeigen auf, dass die Algorithmen für Eingangsgrößen industrieller Anwendungsfälle innerhalb von Minuten Anlagenkonzepte berechnen und damit innerhalb der Anforderungsbeschreibung liegen. Zuletzt wurde die Ergebnisgüte anhand von zwei realen Industrieszenarien überprüft. Dabei wurde unter der technischen Validität und der sich ergebenden Anlageneffizienz unterschieden. Die Bewertung wurde von mehreren Experten durchgeführt, die die generierten Lösungen unabhängig voneinander bewerteten. Diesbezüglich wurden die Ergebnisse als technisch sinnvoll und qualitativ hochwertig bewertet. Dennoch wurden einige Optimierungspotentiale identifiziert, welche in Abschnitt 8.3 als Input für das Aufzeigen weiterer Forschungsbedarfe herangezogen werden.

Der resultierende Mehrwert der algorithmischen Planung wurde einstimmig bestätigt, insbesondere hinsichtlich der Möglichkeit, für Prämissen- oder Produktänderungen unmittelbar Abschätzungen für benachbarte Bereiche wie der Produktentwicklung oder Produktionsstrategie zu generieren.

8 SCHLUSSBETRACHTUNG

Die vorhergehende Evaluation hat gezeigt, dass die Anforderungen zu einem großen Teil durch die entwickelte Methode erfüllt werden. In der Schlussbetrachtung sollen abschließend die in Kapitel 1 beschriebenen Ziele dieser Arbeit betrachtet werden. Diesbezüglich werden zunächst die elementaren Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst. Daraufhin werden die Ziele mit den Ergebnissen dieser Arbeit abgeglichen und dadurch das Fazit gebildet. Basierend auf dem Fazit werden Handlungsempfehlungen sowie weitere Forschungsbedarfe hinsichtlich einer industriellen Umsetzung und Einführung formuliert.

8.1 Fazit

Die digitale und algorithmische Montagesystemkonzeption setzt aufgrund ihres stark multidisziplinären Charakters Wissen verschiedenster Disziplinen wie der Produktionstechnik, der Informationstechnik und der Optimierung voraus. Doch nicht lediglich aufgrund der Vielseitigkeit, sondern vielmehr aufgrund der Komplexität der algorithmischen Produktionsentwicklung existiert bis heute ein großes Defizit in der softwarebasierten Unterstützung der Produktionsgestaltung in Industrie und Forschung.

Zielsetzung dieser wissenschaftlichen Arbeit war die algorithmische Anlagenkonzeption in der Idealplanung hochautomatisierter Montagesysteme. Der Fokus der Untersuchung wurde dabei auf den automobilen Karosseriebau gelegt. Für die Einordnung des Forschungsgegenstands wurde in Kapitel 2 der Karosseriebau in den produktions- und planungstechnischen Kontext eingeordnet. Die systematische Charakterisierung des Forschungsgegenstands hat es diesbezüglich ermöglicht, die Problemstellung dem RASD Problem (Robotic Assembly System Design) in drei sich stark differenzierende und unabhängige Problemstellungen aufzuteilen. Auf dieser Basis war es möglich, existierende Lösungsansätze zu untersuchen und hinsichtlich der Anwendbarkeit auf die Teilproblemstellungen zu bewerten. Es hat sich dadurch gezeigt, dass keiner der existierenden Ansätze das RASD Problem vollständig lösen kann.

Grundlage der Methodenentwicklung stellt die umfangreiche Analyse existierender Verfahren der Informationstechnik dar (vgl. Kapitel 4), die für die Automatisierung von Anlagenplanungsprozessen in Betracht gezogen werden können. Die Analyse hat ergeben, dass sich trotz der hohen Rechenaufwände insbesondere implizite Enumerationsverfahren für die Automatisierung eignen, jedoch die diesbezügliche Formulierung eines mathematischen Optimierungsmodells einem hohen Komplexitätsgrad unterliegt.

Um die Beherrschbarkeit dieses Modells sicherzustellen, wurde von industriellen Montage-templates Standardmontagetemplates abgeleitet und damit der Lösungsraum für die Gestaltung von Montagesystemen deutlich eingeschränkt. Außerdem wurde damit ermöglicht, auch implizites Planungswissen für die Methode zu formalisieren. Für die effiziente Kombination dieser Montagetemplates basiert die Methode auf dem Branch and Bound Verfahren, das für die umfangreiche Evaluation der Methode in ein entwickeltes Softwaresystem integriert wurde. Die Evaluation der entwickelten Methode für die Planungsautomatisierung hat das große Potential für die Steigerung von Effizienz, Planungs- und Dokumentationsqualität (vgl.

Zielstellung 1 und Zielstellung 2) aufgezeigt sowie einen großen Schritt in die Richtung der Datendurchgängigkeit, Digitalisierung des Produktentstehungsprozesses geschaffen und erfüllt damit die Zielsetzung 3.

Damit leistet die hier vorliegende Arbeit einen wesentlichen wissenschaftlichen Beitrag im Feld der automatisierten Anlagenplanung. Für eine industrielle Einführung und operative Anwendung sind jedoch weitere Schritte notwendig, für welche im folgenden Kapitel Handlungsempfehlungen ausgesprochen werden sollen.

8.2 Handlungsempfehlungen

Es wurde gezeigt, dass sich die hier entwickelte Methode sowohl in der Ergebnisgüte als auch in der softwaretechnischen Umsetzung als solides, neuartiges und effizientes Werkzeug im Bereich der digitalen Fabrik bewiesen hat. Die Methode stellt eine Weiterführung des Konzepts der Digitalen Fabrik und der rechnergestützten Produktionsplanung dar. Diesbezüglich kann es beim Einsatz in der industriellen Praxis zu hohen Effizienzsteigerungen in der Montagesystemgestaltung kommen. Die Entwicklung und die Einführung neuartiger digitaler Methoden stellen in der industriellen Praxis ein komplexes Unterfangen dar. Hierfür müssen wesentliche prozessuale als auch technische Voraussetzungen erfüllt sein.

Die flächendeckende Etablierung der entwickelten Methodik in die Prozesse der Automobilindustrie bedarf der digitalen Bereitstellung der beschriebenen Eingangsinformationen sowie der umfangreichen Wissensbasis. Es ist prozessual sicherzustellen, dass diese Informationen in digitaler Form zu Planungsbeginn in hoher Datenqualität zur Verfügung stehen. Das Konzept der digitalen Fabrik sieht die Produkt-, Fügefolgedaten und auch Prämissen über den gesamten Fabriklebenszyklus digital vor, ist in den heutigen industriellen Prozessen jedoch zumeist nicht vollumfänglich realisiert. Auch hinsichtlich der eingeführten Wissensbasis bedarf es einer hohen Datenqualität, die den Anforderungen der algorithmischen Planung gerecht werden und für welche im industriellen Umfeld Administratorenrollen eingeführt werden müssen, die für die Pflege, aber auch für die Weiterentwicklung zuständig sind. Die Erstellung der Montagetemplates für die Wissensbasis erfordert dabei sowohl planungstechnische- als auch algorithmische Kompetenzen.

In den für die Evaluation geführten Gesprächen und Workshops mit Fachexperten hat sich ergeben, dass die Akzeptanz der Endanwender von Automatisierungssystemen die größte Hürde für die Industrialisierung der Methode darstellt. Das Misstrauen der Endanwender gegenüber automatisch generierten Ergebnissen ist hoch. Noch einmal soll an dieser Stelle betont werden, dass das Ziel der hier vorgestellten Methode in keiner Weise das Ersetzen des menschlichen Planungsvermögens ist, sondern den Planer in den frühen Phasen der Produktionsentwicklung, insbesondere bei repetitiven Arbeitsvorgängen, rechnerbasiert zu unterstützen. Genau dieses Verständnis muss bei der Einführung und Entwicklung eines industrialisierten Softwaretools im Endanwenderkreis entwickelt werden. Die Akzeptanz der Planer kann diesbezüglich durch die Einbeziehung in die Erarbeitung und Pflege der Logik des Planungsalgorithmus erhöht werden. Darüber hinaus ist es von hoher Wichtigkeit, dass die Anwender durch ein transparentes und intuitives Bedienkonzept trotz der hohen Komplexität der Planungsalgorithmen durch die Systeme geführt werden.

Aus technischer Sicht ist es notwendig, die Systemmodule für die Planungsautomatisierung so in die Systemlandschaft zu integrieren, dass das Konzept des PPR-Informationsmodells schon in den frühen Phasen verwirklicht werden kann. Nur durch die Sicherstellung der datentechnischen Verknüpfung zwischen Produkt-, Prozess und Ressourcendaten und der entsprechenden Datenintegrität ist die Weiterverwendung in folgenden Planungssystemen sinnvoll und effizienzsteigernd. Dadurch kann eine Nachverfolgbarkeit für die einzelnen Phasen des Anlagenlebenszyklus sichergestellt werden und zu einer stetigen Optimierung von Systemlandschaft und Planungsprozessen führen.

Für die Erstellung der Wissensbasis ist es notwendig, eine Oberfläche zu entwickeln, die die Konfiguration von Planungsszenarien ermöglicht, sodass diese durch planungserfahrene Mitarbeiter direkt in den Systemen gepflegt werden können, ohne dass umfassende Kenntnisse der Graphentheorie benötigt werden. Auch die Einflussnahme auf die Berechnungslogik sollte den Planern zur Laufzeit zugelassen werden, um eine Interaktion zwischen Planern und Planungsalgorithmen zu ermöglichen. Auf dieser Basis wird die Flexibilität auf bisher nicht betrachtete Anwendungsfälle deutlich gesteigert.

8.3 Weitere Forschungsbedarfe

Das Forschungsfeld der algorithmischen Produktionsplanung für hochautomatisierte Montagesysteme ist ein junges Forschungsfeld, welches über vielfältige weitere Potenziale verfügt. Die Menge weiterführender Forschungsbedarfe ist dementsprechend hoch.

Die hier vorgestellte neuartige algorithmische Planungsmethode berücksichtigt eine Vielzahl an Eingangsinformationen. Dennoch gibt es weitere Informationen, die bereits in die frühen Phasen Berücksichtigung finden können, jedoch zur Notwendigkeit der Erweiterung der bestehenden Algorithmen führen. Ein wesentlicher Aspekt, welcher auch heute durch die manuell durchgeführte Idealplanung vernachlässigt wird, sind die Ergebnisse von Zugänglichkeitsimulationen. Die in den frühen Phasen durchgeführten Zugänglichkeitssimulationen für Standardwerkzeuge ergeben, ob diese einzelne Fügepunkte erreichen. Bei mehreren Standardwerkzeugen folgt daraus ein erweitertes Optimierungsproblem, das die Zuordnung von Fügeelementen zu Standardwerkzeugen betrachtet. Ebenso gilt es diesbezüglich mögliche Zangenwechsel innerhalb eines Taktes oder zwischen den Takten für verschiedene Varianten in Betracht zu ziehen. Die hier vorgestellte Methode geht vereinfachend davon aus, dass jedes Werkzeug jeden Punkt des Bauteils erreichen kann. Die Berücksichtigung von Simulationsergebnissen kann bereits in den frühen Planungsphasen zu einer höheren Genauigkeit der Ergebnisse führen, weiten den Suchraum aber deutlich aus. In gleicher Art und Weise kann auch die geometrische Lage von Fügeelementen für die Berechnung berücksichtigt werden. Denn die Erreichbarkeit der einzelnen Fügeelemente ist nicht nur durch die Geometrie von Werkzeugen und des Produktes beschränkt, sondern darüber hinaus zusätzlich durch die Aktionsradien und Position der Roboter. Die Bewegungen und Bewegungsräume der parallel arbeitenden Roboter sowie deren Anzahl stellen gleichermaßen eine Limitation der Planungsfreiheit dar, wenn Kollisionen vermieden werden sollen.

Neben den Erreichbarkeitssimulationen können Materialflusssimulationen in die Berechnung einbezogen werden. Die generierten Ergebnisse werden lediglich auf einer statischen und auf Erfahrungswerten basierenden Verfügbarkeit abgeschätzt. Materialflusssimulationen

ermöglichen weitaus detailliertere Untersuchungen, welche in die Berechnungslogik einfließen können, jedoch zu einem erheblichen Rechenaufwand führen. Bei einer hohen Anzahl an Planungsalternativen wäre die Berechnung und Simulation in angemessener Zeit nicht realisierbar. Aus diesem Grund bestehen Forschungsbedarfe darin, wie und inwieweit es möglich ist, Materialflusssimulationsergebnisse in die Berechnung einzubeziehen. Diesbezüglich kann auch eine Berechnung von Pufferpositionen und Pufferkapazitäten eine mögliche Weiterentwicklung der hier vorliegenden Methode darstellen.

Die algorithmische Planung, wie sie in dieser wissenschaftlichen Arbeit vorstellt wurde, unterstützt den Planer in den initialen Planungsphasen und ermöglicht insbesondere das Generieren vieler Planungsvarianten. Die folgenden Planungsphasen sind durch fortlaufende Änderungen und Optimierungen des Produktionssystems geprägt, der Planer erfährt dann keine softwarebasierte Unterstützung mehr. Auch mit dem Umgang von Änderungen der Eingangsvariablen wie zum Beispiel Produktänderungen wird der Planer nicht unterstützt. Die Ausweitung der algorithmischen Planungsunterstützung über den kompletten Planungszyklus ist daraus folgend ein großer Forschungsbedarf. Dazu gehören gleichermaßen Brownfield Planungsszenarien, die aufgrund der höheren Flexibilität heutiger Produktionssysteme und der dadurch hervorgerufenen Wiederverwendung von Montagesystemen immer häufiger Notwendigkeit finden werden. Brownfield Planungsszenarien rücken aus diesem Grund immer mehr in den Fokus der Forschung. Für eine algorithmische Brownfield-Planung ist im besonderen Maße die Datenqualität des digitalen Abbilds des Montagesystems von grundlegender Wichtigkeit und betont die Relevanz der Forschung im Bereich digitaler Zwillinge.

Nicht zuletzt durch digitale Zwillinge wird die Menge generierter Informationen sowie die Informationsqualität und -durchgängigkeit über den kompletten Fabriklebenszyklus in den nächsten Jahren drastisch steigen. Die Potenziale zur Effizienzsteigerungen in der Produktionsplanung und folgend auch in der Serienproduktion sind beträchtlich. Im Vergleich zu den noch offenen Forschungsbedarfen bildet diese wissenschaftliche Arbeit lediglich einen ersten Schritt – jedoch eine fundamentale Grundlage für weitere Forschungsaktivitäten hin zu der automatisierten, auf Algorithmen basierenden Planung von Montagesystemen.

ANHANG

A1 Detailinformationen Evaluation und Industrieszenarien

Hinterlegte Informationen in der Wissensbasis für die Evaluation:

Tabelle 31: Standardprozesszeiten

Verfahren	ID	Geometrierelevanz	Material	Geometrie	Standardprozesszeit
WPS	SG1	Geometriegebend	Stahl	punktförmig	2,5 s
WPS	SA1	Ausfügen	Stahl	punktförmig	3,5 s
Clinchen	CG2	Geometriegebend	Aluminium	Punktförmig	
Clinchen	CA2	Ausfügen	Aluminium	punktförmig	
Kleben (Struktur)	KL1	Ausfügen	-	-	150 mm/s
Kleben (Falzkleben)	KL2	Ausfügen	-	-	100 mm/s
Nieten	NG1	Geometriegebend	Stahl, Alu	punktförmig	4,5 s
Nieten	NA1	Ausfügen	Stahl, Alu	punktförmig	5,5 s

Tabelle 32: Ausschnitt Prozessprioritätsmatrix

	EH	ES1	EL1	FG	SG1	CG1	FA	KE1	SA1	CA1	AH	EN1
EH				EH			EH				EH	
ES1			0		0	0		ES1	0	0		0
EL1		0			EL1	EL1		EL1	EL1	EL1		EL1
FG	EH						FG				FG	
SG1		0	EL1			0		KE1	SG1	SG1		SG1
CG1		0	EL1		0			KE1	CG1	CG1		CG1
FA	EH			FG							FA	
KE1		0	EL1		KE1	KE1			KE1	KE1		KE1
SA1		0	EL1		SG1	CG1		KE1		0		SA1
CA1		0	EL1		SG1	CG1		KE1	0			CA1
AH	EH			FG			FA					
EN1		0	EL1		SG1	SG1		KE1	SA1	SA1		

Legende:

EH	Eingangshandling	FA	Ausfügen
ES	Einsammeln	KE1	Kleiben
EL	Einlegen	SA1	Ausschweißen
FG	Geometriefügen	CA1	Clinchen Ausfügen
SG1	Geometrieschweißen	AH	Ausgangshandling
CG1	Clinchen Geometrie	EN1	Entnehmen

A2 Algorithmenexperimente

Anzahl expandierter Knoten in Abhängigkeit zu Taktzeit und Anzahl Schweißpunkte

Tabelle A2.1: Algorithmenexperimente Schweißen, Branch and Bound

Taktzeit [s] \ Schweißpunkte	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
45	26	86	293	524	1714	5776	19776	66747	121929	403479	1330921
50	26	48	158	293	942	1714	5776	19776	36403	121929	222032
55	10	48	86	158	524	942	3117	5776	10693	36403	66747
60	10	26	48	158	293	524	942	3133	5776	10693	19776
75	5	10	26	48	86	158	293	524	942	1714	3133
100	5	10	10	26	46	48	82	152	158	293	514

Anzahl expandierter Knoten in Abhängigkeit zu Taktzeit und Anzahl Schweißpunkte

Tabelle A2.2: Algorithmenexperimente Schweißen, vollständige Permutation:

Taktzeit [s] \ Schweißpunkte	50	75	100	125	150	175	200
45	1,84 * 10 ²	8,33E+02	3,74E+03	1,65E+04	7,36E+04	3,23E+05	1,44E+06
75	4,30E+01	9,90E+01	2,11E+02	4,01E+02	7,82E+02	1,54E+03	3,08E+03

Taktzeit [s] \ Schweißpunkte	225	250	275	300
45	4,42E+06	1,97E+07	n.a.	n.a.
75	6,22E+03	1,29E+04	2,65E+04	5,44E+04

Anzahl expandierter Knoten bei zwei Verfahren und Taktzeit: 50 s

Tabelle A2.3: Algorithmenexperimente zwei Verfahren, Branch and Bound

Verteilung Fügeelemente [%]	Fügeverfahren 1	Fügeverfahren 2	Anzahl Kombinationen ohne Schranken
0	0	150	6830005
5	8	142	19569315
10	15	135	15864956
15	23	127	11294754
20	30	120	12895895
25	38	112	10043444
30	45	105	8785024
35	53	97	7599312
40	60	90	6255879
45	68	82	6196887
50	75	75	5010902
55	82	68	4567662
60	90	60	4031520
65	97	53	3178415
70	105	45	2593707
75	112	38	1931570
80	120	30	1113552
85	127	23	652268
90	135	15	269231

Anzahl expandierter Knoten bei zwei Verfahren und Taktzeit: 75 s

Tabelle A2.4 Algorithmenexperimente zwei Verfahren, Branch and Bound

Verteilung Fügeelemente [%]	Fügeverfahren 1	Fügeverfahren 2	Anzahl Kombinationen ohne Schranken
0	0	150	38541
5	8	142	45135
10	15	135	28878
15	23	127	21267
20	30	120	34768
25	38	112	20631
30	45	105	16723
35	53	97	23963
40	60	90	16108
45	68	82	14585
50	75	75	18539
55	82	68	12696
60	90	60	11469
65	97	53	12445
70	105	45	7870
75	112	38	7543
80	120	30	5920
85	127	23	3231
90	135	15	2585

A3 Expertenworkshops und Detailbewertungen

Tabelle A3.1: Expertengruppe für Evaluation der Systemintegration

Kürzel	Position/ Fachexpertise	Firmenzugehörigkeit	Arbeits Erfahrung: IT/Digitale Fabrik	Geschlecht
Experte 1	Experte Softwareentwicklung/ Schnittstellenarchitektur und -entwicklung	Softwareunternehmen	>10 Jahre	Männlich
Experte 2	Experte IT Digitale Fabrik/ Gesamtarchitektur und Software-System Design	Automotive OEM	<5 Jahre	Männlich
Experte 3	Experte Methodenentwicklung Digitale Fabrik/ Requirements Management	Automotive OEM	>10 Jahre	Weiblich
Experte 4	Experte Methodenentwicklung Digitale Fabrik/ Software System Design	Tier 1: Anlagenbauer	>10 Jahre	Weiblich
Experte 5	Solution Architect Digitale Fabrik/ Gesamtarchitektur	Beratungsunternehmen	>10 Jahre	Männlich

Tabelle A3.2: Expertengruppe für Evaluation der produktionsspez. Anforderungen:

Kürzel	Position/ Fachexpertise	Firmenzugehörigkeit	Erfahrung	Geschlecht
Experte 1	Planungsexperte Szenario 1/ Konzeption Anlagen Karosseriebau	Automotive OEM	<5 Jahre	Männlich
Experte 2	Planungsexperte Szenario 2/ Optimierung von Produktionsanlagen	Automotive OEM	>10 Jahre	Männlich
Experte 3	Leiter Digitale Fabrik/ Strategie Digitale Planungsmethoden	Automotive OEM	>10 Jahre	Männlich
Experte 4	Leiter Digitale Anlagenplanung/ Digitalisierung Anlagenplanung	Automotive OEM	>10 Jahre	Männlich
Experte 5	Methodenentwickler Digitale Fabrik/ Planungsautomatisierung	Automotive OEM	>10 Jahre	Weiblich
Experte 6	Experte Engineering/ Produktdatenanalyse & Betriebsmittelkonstruktion	Tier 1 Anlagenbauer	>10 Jahre	Weiblich



Abbildung 65: Stationäres Fügen eines großen Karosseriezusammenbaus⁹⁵

Die folgende Abbildung 66 zeigt eine orangene Zone, in welcher der Konstrukteur die Aufnahmestelle für einen Stift eines Greifers/Vorrichtung vorsehen soll, eine sogenannte Frozen-Zone. Wie in der Abbildung allerdings ersichtlich ist, ist die Aufnahmestelle in diesem Konstruktionsstand außerhalb der Frozen-Zone vorgesehen. Ist eine abweichende Konstruktion für dieses Bauteil nicht möglich, so muss eine individuelle Greifer-/Vorrichtungskonstruktion in Betracht gezogen werden.

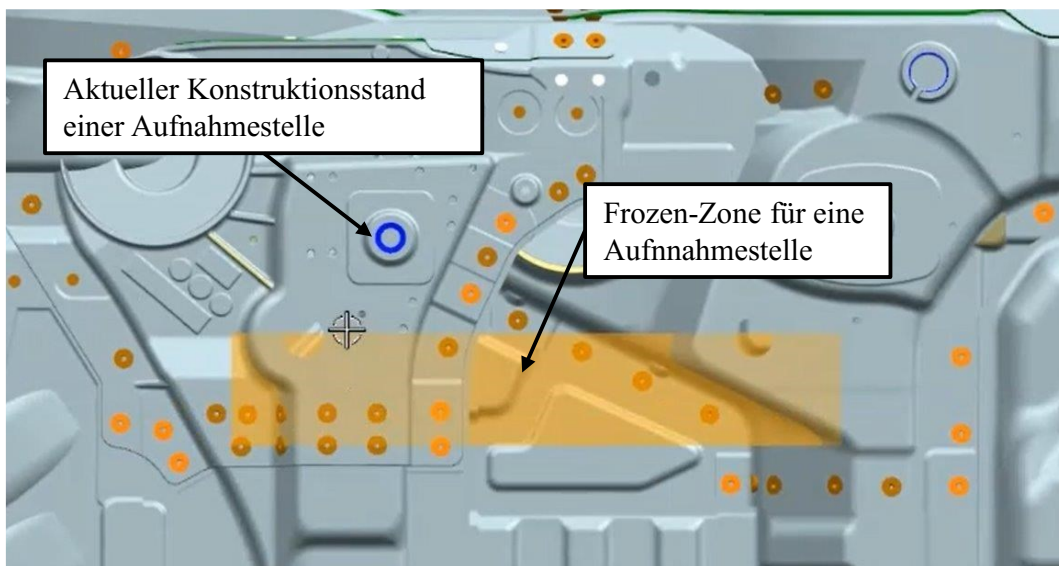


Abbildung 66: Frozen Zone einer Aufnahmestelle Zusammenbau⁹⁶

⁹⁵ Eigene Abbildung

⁹⁶ Eigene Abbildung

LITERATURVERZEICHNIS

- ABB (Hg.) (2020): Case Study: Waschmaschinenfertigung, Handhabung, Montage, Klebe- und Fügeprozesse. ABB, zuletzt geprüft am 12.08.2021; https://library.e.abb.com/public/fbd07fa0565944abb3e45aec255fd213/Referenz_Miele_web.pdf.
- Ağpak, Kürşad; Gökçen, Hadi (2005): Assembly line balancing: Two resource constrained cases. In: *International Journal of Production Economics* 96 (1), S. 129–140.
- Akturk, Selim; Tula, Adnan (2011): Design of a fully automated robotic spot-welding line. In: Proceedings of the 8th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Noordwijkerhout, S. 387–392.
- Amelingmeyer, Jenny (2004): Wissensmanagement. Analyse und Gestaltung der Wissensbasis von Unternehmen. Auflage. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag (Strategisches Kompetenz-Management).
- Amen, Matthias (2000): An exact method for cost-oriented assembly line balancing. In: *International Journal of Production Economics* 64 (1-3), S. 187–195. DOI: 10.1016/S0925-5273(99)00057-2.
- Andreas Jäger (1990): Systematische Planung komplexer Produktionssysteme. Dissertation. Technische Universität München, München. Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.
- Arbeitszeitgesetz (ArbZG) (2014). 1. Auflage 2014, Stand: 16. Juli 2014. Merseburg: G. Recht.
- Ausiello, Giorgio (2003): Complexity and approximation. Combinatorial optimization problems and their approximability properties. Berlin: Springer.
- Bauer, Frank (2015): Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung. Paderborn.
- Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten; Vogel-Heuser, Birgit (Hg.) (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg (SpringerLink).
- Bautista, Joaquín; Pereira, Jordi (2007): Ant algorithms for a time and space constrained assembly line balancing problem. In: *European Journal of Operational Research* 177 (3), S. 2016–2032. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.12.017.
- Begoña Toledo Muñoz, M.; Spors, Karin; Bracht, Uwe; Schimmmler, Manfred (2015): Agentenbasierte Modellierung und Analyse von Verbindungen im Produktentstehungsprozess. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* (6), 319-326.
- Beierle, Christoph; Kern-Isberner, Gabriele (2008): Methoden wissensbasierter Systeme. Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen. 4., verb. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner / GWV Fachverlage (Vieweg Studium).

- Birkert, Arndt Rüdiger; Haage, Stefan; Straub, Markus (2013): Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile. Auslegung von Ziehanlagen. Berlin: Springer Berlin.
- Blessing, Lucienne T.M.; Chakrabarti, Amaresh (2009): DRM, a Design Research Methodology. London: Springer London.
- Borba, Leonardo; Ritt, Marcus; Miralles, Cristóbal (2018): Exact and heuristic methods for solving the Robotic Assembly Line Balancing Problem. In: *European Journal of Operational Research*, S. 1–11. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.03.011.
- Bornschlegl, Martin (2016): Methods-Energy Measurement. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- Boysen, Nils (2005): Variantenfließfertigung. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag (Betriebswirtschaftliche Forschung zur Unternehmensführung, 49).
- Boysen, Nils; Flidner, Malte (2008): A versatile algorithm for assembly line balancing. In: *European Journal of Operational Research* 184 (1), S. 39–56. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.11.006.
- Boysen, Nils; Flidner, Malte; Scholl, Armin (2007): A classification of assembly line balancing problems. In: *European Journal of Operational Research* 183 (2), S. 674–693. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.10.010.
- Bracht, Uwe; Geckler, Dieter; Wenzel, Sigrid (2011): Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. Berlin: Springer (VDI-Buch).
- Brandt-Pook, Hans; Kollmeier, Rainer (2015): Softwareentwicklung kompakt und verständlich. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Brandtstädt, Andreas (1994): Graphen und Algorithmen. Stuttgart: Teubner Verlag Stuttgart.
- Brockmeyer, Henrich (2010): Rechnergestützte Methoden zur frühzeitigen Produktbeeinflussung und Produktabsicherung im Karosseriebau. Aachen: Shaker (Berichte aus dem Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik, 17).
- Bukchin, Joseph; Rubinovitz, Jacob (2003): A weighted approach for assembly line design with station paralleling and equipment selection. In: *IIE Transactions* (35), S. 73–85.
- Bukchin, Joseph; Tzur, Michal (2000): Design of flexible assembly line to minimize equipment cost. In: *IIE Transactions* 32 (7), S. 585–598. DOI: 10.1080/07408170008967418.
- Bukchin, Yossi; Rabinowitch, Ithai (2006): A branch-and-bound based solution approach for the mixed-model assembly line-balancing problem for minimizing stations and task duplication costs. In: *European Journal of Operational Research* 174 (1), S. 492–508. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.01.055.
- Bullinger, Hans-Jörg (1986): Systematische Montageplanung. Handbuch für die Praxis. München: Hanser.
- Burr, Holger (2008): Informationsmanagement an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktionsplanung im Karosserierohbau. Dissertation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken. Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD.

- Chen, Xinghao; Bushnell, Michael (1996): Efficient Branch and Bound Search with Application to Computer-Aided Design. Norwell: Kluwer Academix Publishers.
- Claus, Volker; Schwill, Andreas (2003): Duden Informatik. Ein Fachlexikon für Studium und Praxis. Originalausg., 3. Aufl., [Taschenbuchausg.]. Mannheim: Dudenverl.
- Colledani, M.; Franchini, F.; Micchetti, F.; Ratti, A.; Taurisano, A. (2015): A software platform for the multi-objective early-stage design of automotive assembly lines. In: *IFAC-PapersOnLine* 48 (3), S. 2287–2292. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.428.
- Colledani, Marcello; Gyulai, Dávid; Monostori, László; Urgo, Marcello; Unglert, Johannes; van Houten, Fred (2016): Design and management of reconfigurable assembly lines in the automotive industry. In: *CIRP Annals* 65 (1), S. 441–446. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.123.
- Dangelmaier, Wilhelm (2001): Fertigungsplanung. Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung Grundlagen, Algorithmen und Beispiele. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch).
- Dangelmaier, Wilhelm (2003): Produktion und Information. System und Modell. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch).
- Daoud, Slim; Amodeo, Lionel; Yalaoui, Farouk; Chehade, Hicham; Duperray, Philippe (2012): New mathematical model to solve robotic assembly lines balancing. In: *IFAC Proceedings Volumes* 45 (6), S. 1353–1358. DOI: 10.3182/20120523-3-RO-2023.00183.
- Daoud, Slim; Chehade, Hicham; Yalaoui, Farouk; Amodeo, Lionel (2014): Solving a robotic assembly line balancing problem using efficient hybrid methods. In: *J Heuristics* 20 (3), S. 235–259. DOI: 10.1007/s10732-014-9239-0.
- DIN 8593-0: Deutsches Institut für Normung (2003): Fertigungsverfahren Fügen. Allgemeins, Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 8580-0: Deutsches Institut für Normung (2003): Fertigungsverfahren. Begriffe, Einleitung. Berlin: Beuth Verlag.
- Dolgui, Alexandre; Gafarov, Evgeny (2017): Some new ideas for assembly line balancing research. In: *IFAC-PapersOnLine* 50 (1), S. 2255–2259. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.189.
- Domschke, Wolfgang; Drexl, Andreas; Klein, Robert; Scholl, Armin (2015): Einführung in Operations Research. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Eigner, Martin (2012): Informationstechnologie für Ingenieure. Berlin: Springer.
- Ertel, Wolfgang (2009): Grundkurs künstliche Intelligenz. Eine praxisorientierte Einführung. 2., überarb. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Computational intelligence).
- Eversheim, Walter (2002): Organisation in der Produktionstechnik 3. Arbeitsvorbereitung. 4., bearbeitete und korrigierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag (VDI-Buch).
- Eversheim, Walter; Schuh, Günther (1999): Produktion und Management 3. Gestaltung von Produktionssystemen. Berlin, Heidelberg: Springer.

-
- Fleszar, Krzysztof; Hindi, Khalil S. (2003): An enumerative heuristic and reduction methods for the assembly line balancing problem. In: *European Journal of Operational Research* 145 (3), S. 606–620.
- Fonseca, Daniel J.; Elam, Matthew; Karr, Charles L.; Guest, C. L. (2005): A fuzzy logic approach to assembly line. In: *Mathware & soft computing*, 2005, vol. 12, núm. 1.
- Fritsche, R.; Neugebauer, R.; Walzl, H.; Pfeifer, M. (2012): Intelligenter Karosseriebau. Ressourceneffizienter Anlagenanlauf im Karosseriebau durch automatisch justierbare Vorrichtungen. In: *Werkstatttechnik Online* 2012 (10).
- Gao, Jie; Sun, Linyan; Wang, Lihua; Gen, Mitsuo (2009): An efficient approach for type II robotic assembly line balancing problems. In: *Computers & Industrial Engineering* 56 (3), S. 1065–1080. DOI: 10.1016/j.cie.2008.09.027.
- Ghosh, Soumen; Gagnon, Robter (1989): A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. In: *International Journal of Production Research* 27 (4), S. 637–670. DOI: 10.1080/00207548908942574.
- Grötschel, Martin (2015): Einführung in die Lineare und Kombinatorische Optimierung. Skript. Technische Universität Berlin, Berlin.
- Grundig, Claus-Gerold (2015): Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. 5., aktualisierte Aufl. München: Hanser.
- Günther, Hans-Otto; Tempelmeier, Horst (2007): Produktion und Logistik. 7., überarb. Aufl. Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Hagemann, Simon; Stark, Rainer (2018): Automated Body-in-White Production System Design. Data-Based Generation of Production System Configurations. In: Proceedings of the 4th International Conference on Frontiers of Educational Technologies. New York NY: ACM, S. 192–196.
- Hagemann, Simon; Stark, Rainer (2020): An optimal algorithm for the robotic assembly system design problem: An industrial case study. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 31, S. 500–513. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.08.002.
- Hagemann, Simon; Sunnetcioglu, Atakan; Fahse, Tobias; Stark, Rainer: Neural Network Hyperparameter Optimization for the Assisted Selection of Assembly Equipment. In: 2019 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT): IEEE, S. 1–7.
- Hagemann, Simon; Sunnetcioglu, Atakan; Stark, Rainer (2019): Hybrid Artificial Intelligence System for the Design of Highly-Automated Production Systems. In: *Procedia Manufacturing* 28, S. 160–166. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.12.026.
- Haken, Karl-Ludwig (2015): Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik. 1., aktualisierte Auflage. München: Hanser, Carl.
- Hartmann, Dietrich; Lehner, Karlheinz (1990): Technische Expertensysteme. Grundlagen, Programmiersprachen, Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Henning, Frank; Moeller, Elvira (2011): Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung. München: Hanser.

- Henning, Rudolf (2006): Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie. Dissertation. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik.
- Herlyn, Wilmjakob (2012): PPS im Automobilbau. Produktionsprogrammplanung und -steuerung von Fahrzeugen und Aggregaten. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Herrmann, Jürgen (1997): Maschinelles Lernen und Wissensbasierte Systeme. Systematische Einführung mit praxisorientierten Fallstudien. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Hu, S. J.; Ko, J.; Weyand, L.; ElMaraghy, H. A.; Lien, T. K.; Koren, Y. et al. (2011): Assembly system design and operations for product variety. In: *CIRP Annals* 60 (2), S. 715–733. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.05.004.
- Jänig, Christian (2004): Wissensmanagement. Die Antwort auf die Herausforderungen der Globalisierung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Jasperneite, Jürgen; Niggemann, Oliver (2012): Systemkomplexität in der Automation beherrschen. In: *atp edition*, S. 36–44.
- Jonas, Christian (2000): Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen. München: Utz (Forschungsberichte IWB, Bd. 145).
- Karabatı, Selçuk; Sayın, Serpil (2003): Assembly line balancing in a mixed-model sequencing environment with synchronous transfers. In: *European Journal of Operational Research* 149 (2), S. 417–429.
- Kiefer, Jens (2007): Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosseriebau. Dissertation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken. Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM.
- Kiefer, Jens; Breckle, Theresa; Stetter, Ralf; Manns, Martin (2018): Digital assembly planning using graph-based design languages. In: *Procedia CIRP* 72, S. 802–807. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.063.
- Kim, H.; Park, S. (1995): A strong cutting plane algorithm for the robotic assembly line balancing problem. In: *International Journal of Production Research* 33 (8), S. 2311–2323. DOI: 10.1080/00207549508904817.
- Klauke, Sabine (2002): Methoden und Datenmodell der "Offenen Virtuellen Fabrik" zur Optimierung simultaner Produktionsprozesse. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren, 360).
- Koch, Thorsten; Ralphs, Ted; Shinano, Yuji (2012): Could we use a million cores to solve an integer program? In: *Math Meth Oper Res* 76 (1), S. 67–93. DOI: 10.1007/s00186-012-0390-9.
- Koren, Yoram; Shpitalni, Moshe (2010): Design of reconfigurable manufacturing systems. In: *Journal of Manufacturing Systems* 29 (4), S. 130–141. DOI: 10.1016/j.jmsy.2011.01.001.
- Korte, Bernhard; Vygen, Jens (2012): Kombinatorische Optimierung. Theorie und Algorithmen. 2. Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg: Springer.

-
- Kühn, Wolfgang (2006): Digitale Fabrik. Fabriksimulation für Produktionsplaner. München: Hanser.
- Kurbel, Karl (1992): Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen. Berlin: Springer.
- Kusiak, Andrew (1987): The production equipment requirements problem. In: *International Journal of Production Research* 25 (3), S. 319–325. DOI: 10.1080/00207548708919843.
- Kwasny, Stan C.; Faisal, Kanaan A. (1990): Overcoming Limitations of Rule-Based Systems: An Example of a Hybrid Deterministic Parser. In: Georg Dorffner (Hg.): *Konnektivismus in Artificial Intelligence und Kognitionsforschung*. 6. Österreichische Artificial-Intelligence-Tagung (KONNAI). Berlin, Heidelberg: Springer (252).
- Lambertz, Arne (2009): Technisch-wirtschaftliche Bewertung von Flexibilität in Rohbaulnien. Dissertation. Technische Universität Berlin. Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb.
- Lapierre, Sophie D.; Ruiz, Angel; Soriano, Patrick (2006): Balancing assembly lines with tabu search. In: *European Journal of Operational Research* 168 (3), S. 826–837.
- Lermen, Patrick (1992): Hierarchische Produktionsplanung und KANBAN. Wiesbaden: Gabler Verlag (Neue betriebswirtschaftliche Forschung, 377).
- Levitin, Gregory; Rubinovitz, Jacob; Shnits, Boris (2006): A genetic algorithm for robotic assembly line balancing. In: *European Journal of Operational Research* 168 (3), S. 811–825. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.07.030.
- Li, Sha; Wang, Hui; Hu, S. Jack; Lin, Yhu-Tin; Abell, Jeffrey A. (2011): Automatic generation of assembly system configuration with equipment selection for automotive battery manufacturing. In: *Journal of Manufacturing Systems* 30 (4), S. 188–195. DOI: 10.1016/j.jmsy.2011.07.009.
- Li, Zixiang; Tang, Qiuhua; Zhang, LiPing (2016): Minimizing energy consumption and cycle time in two-sided robotic assembly line systems using restarted simulated annealing algorithm. In: *Journal of Cleaner Production* 135, S. 508–522.
- Loferer, Michael (2002): Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen. Dissertation. München: Utz (162).
- Lopes, Thiago Cantos; Sikora, C.G.S.; Molina, Rafael Gobbi; Schibelbain, Daniel; Rodrigues, L.C.A.; Magatão, Leandro (2017): Balancing a robotic spot welding manufacturing line: An industrial case study. In: *European Journal of Operational Research* 263 (3), S. 1033–1048. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.06.001.
- Lotter, Bruno (2006): Die Primär-Sekundär-Analyse. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): *Montage in der industriellen Produktion*. Berlin: Springer, S. 59–92.
- Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hg.) (2006): *Montage in der industriellen Produktion*. Berlin: Springer.
- Mas, Fernando; Ríos, José; Gómez, Alejandro; Hernández, Juan Carlos (2015): Knowledge-based application to define aircraft final assembly lines at the industrialisation conceptual

- design phase. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 29 (6), S. 677–691. DOI: 10.1080/0951192X.2015.1068453.
- Matt, D. T. (2008): Template based production system design. In: *Journal of Manufacturing Technology Management* 19 (7), S. 783–797. DOI: 10.1108/17410380810898741.
- Mekonnen Asmare Fentahun; Mahmut Ahsen Savaş (2018): Materials Used in Automotive Manufacture and Material Selection Using Ashby Charts. In: *International Journal of Materials Engineering* 2018, 8(3): 40-54. DOI: 10.5923/j.ijme.20180803.02.
- Merker, Jürgen (1998): Heuristiken in der Layoutplanung. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Michalos, G.; Fysikopoulos, A.; Makris, S.; Mourtzis, D.; Chryssolouris, G. (2015): Multi criteria assembly line design and configuration – An automotive case study. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 9, S. 69–87. DOI: 10.1016/j.cirpj.2015.01.002.
- Michalos, George; Makris, Sotiris; Mourtzis, Dimitris (2012): An intelligent search algorithm-based method to derive assembly line design alternatives. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 2012 (3), S. 211–229.
- Michels, Adalberto Sato; Lopes, Thiago Cantos; Sikora, Celso Gustavo Stall; Magatão, Leandro (2018): The Robotic Assembly Line Design (RALD) problem: Model and case studies with practical extensions. In: *Computers and Industrial Engineering*, Bd. 120, S. 320–333.
- Michniewicz, Joachim; Hörmann, Markus; Erdogan, Hüseyin; Meyer, Thomas; Riegel, Jörg; Schwentner, Nicola et al. (2017): Automatisierte digitale Anlagenplanung. Methode für die automatisierte Planung von Montageanlagen auf Basis digitaler Produktdaten. In: *wt Werkstattstechnik online* (9), S. 582–589.
- Milberg, Joachim; Reinhart, Gunther; Spath, Dieter; Weck, Manfred; Seliger, Günter; Eversheim, Walter et al. (1999): Gestaltung von Produktionssystemen. In: *Produktion und Management* 3: Springer, S. 118–244.
- Mukund Nilakantan, J.; Ponnambalam, S.G. (2016): Robotic U-shaped assembly line balancing using particle swarm optimization. In: *Engineering Optimization* 48 (2), S. 231–252. DOI: 10.1080/0305215X.2014.998664.
- Müller, Christoph (2018): Zur redundanten Konfiguration automatisierter Flusssysteme. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.
- Naveen Kumar & Dalgobind Mahto (2013): Assembly Line Balancing: A Review of Developments and Trends in Approach to Industrial Application. In: *Global Journal of Researches in Engineering and Industrial Engineering*, S. 1–23.
- Nielsen, Johan (2003): Information Modeling of Manufacturing Processes: Information Requirements for Process Planning in a Concurrent Engineering Environment. Dissertation. Royal Institute of Technology, Stockholm. Production Engineering.

- Nilakantan, J. Mukund; Ponnambalam, S. G. (2012): An efficient PSO for type II robotic assembly line balancing problem. In: *8th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*.
- Nilakantan, J. Mukund; Ponnambalam, S. G.; Jawahar, N.; Kanagaraj, Ganesan (2015): Bio-inspired search algorithms to solve robotic assembly line balancing problems. In: *Neural Computing and Applications* 26 (6), S. 1379–1393.
- Pastor, R.; Andrés, C.; Duran, A.; Pérez, M. (2002): Tabu search algorithms for an industrial multi-product and multi-objective assembly line balancing problem, with reduction of the task dispersion. In: *Journal of the Operational Research Society* 53 (12), S. 1317–1323. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2601457.
- Pawellek, Günther (2014): Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- Pellegrinelli, Stefania; Pedrocchi, Nicola; Molinari-Tosatti, Lorenzo; Fischer, Anath; Tolio, Tullio (2014): Multi-robot Spot-welding Cell Design. Problem Formalization and Proposed Architecture. In: *Procedia CIRP* 21, S. 324–329. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.164.
- Pfohl, Hans-Christian: Planung und Kontrolle. Darmstadt Technical University, Department of Business Administration ...
- Raimund Menges (2005): Maßstab für die Fertigung im 21. Jahrhundert. Alle Phasen des Produktlebenszyklus in die Unternehmensstrategie einbezogen. In: *Intelligenter Produzieren* 2005 (1), S. 14–16.
- Ralf Cuiper (2000): Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen. Dissertation. Technische Universität München, München.
- REFA Verband (1990): Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. 2. Aufl., 6. - 10. Tsd. München: Hanser (Methodenlehre der Betriebsorganisation, REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation).
- Rekiek, B.; Lit, P. de; Delchambre, A. (2002): Hybrid assembly line design and user's preferences. In: *International Journal of Production Research* 40 (5), S. 1095–1111. DOI: 10.1080/00207540110116264.
- Rekiek, Brahim; Delchambre, A. (2006): Assembly line design. The balancing of mixed-model hybrid assembly lines with genetic algorithms. London: Springer (Springer series in advanced manufacturing).
- Ripon, Kazi Shah Nawaz; Glette, Kyrre; Khan, Kashif Nizam; Hovin, Mats; Torresen, Jim (2013): Adaptive variable neighborhood search for solving multi-objective facility layout problems with unequal area facilities. In: *Swarm and Evolutionary Computation* 8, S. 1–12. DOI: 10.1016/j.swevo.2012.07.003.
- Roubanov, Daniil (2016): Durchgehende IT gestützte Methode für eine effiziente Zusammenarbeit zwischen der interdisziplinären Produktentwicklung und Montageplanung. Dissertation. Als Manuskript gedruckt (Schriftenreihe VPE, Band 16).

- Rubinovitz, j.; Bukchin, J. (1991): Design and balancing of robotic assembly lines. In: Proceedings of the Fourth World Conference on Robotics Research.
- Rubinovitz, Jacob; Bukchin, Joseph; Lenz, Ehud (1993): RALB – A Heuristic Algorithm for Design and Balancing of Robotic Assembly Lines. In: *CIRP Annals* 42 (1), S. 497–500.
- Russell, Stuart J.; Norvig, Peter (2012): Künstliche Intelligenz. Ein moderner Ansatz. 3., aktualisierte Aufl. München: Pearson (Always learning).
- Sabel, David (2013): Einführung in die Methoden der Künstlichen Intelligenz. In: *Goethe-Universität Frankfurt am Main*.
- Salveson, Melvin E. (1955): The assembly line balancing problem. In: *The Journal of Industrial Engineering*, S. 18–25.
- Schenk, Michael; Wirth, Siegfried (2004): Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Schleipen, Miriam; Drath, Rainer (2009): Three-view-concept for modeling process or manufacturing plants with AutomationML. In: IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation. Palma de Mallorca, Spain. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–4.
- Schmidt, Günter (2002): Prozeßmanagement. Modelle und Methoden. Zweite verbesserte Auflage. Berlin: Springer.
- Schmigalla, Hans (1995): Fabrikplanung. Begriffe und Zusammenhänge. 1. Aufl. München: Hanser (REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation).
- Schneeweiß, Christoph (1989): Einführung in die Produktionswirtschaft. Dritte, revidierte Auflage. Berlin: Springer (Heidelberger Taschenbücher, 244).
- Schnupp, Peter; Leibrandt, Ute (1986): Expertensysteme. Nicht nur für Informatiker. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer Compass).
- Schöler, Thorsten; Maibaum, Johannes; Fischer, Thomas (2019): Medientechnisches Wissen. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg (De Gruyter Studium).
- Scholl, Armin (1999): Balancing and Sequencing of Assembly Lines. Heidelberg: Springer.
- Schreier, Heiner (2013): Diskrete Optimierung. Manuskript. TU Bergakademie Freiberg, Freiberg. Fakultät für Mathematik und Informatik.
- Schultz, Jens (1999): Ausgewählte Methoden der Ablaufplanung im Vergleich. Wiesbaden Germany: Springer Fachmedien.
- Sihn, Wilfried; Sunk, Alexander; Nemeth, Tanja; Kuhlant, Peter; Matyas, Kurt (2016): Produktion und Qualität. Organisation, Management, Prozesse. München: Hanser (Praxisreihe Qualitätswissen).
- Simaria, Ana Sofia; Vilarinho, Pedro M. (2004): A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II. In: *Computers & Industrial Engineering* 47 (4), S. 391–407.

- Sivasankaran, P.; Shahabudeen, P. (2014): Literature review of assembly line balancing problems. In: *Int J Adv Manuf Technol* 73 (9-12), S. 1665–1694. DOI: 10.1007/s00170-014-5944-y.
- Spur, Günter; Schöppner, Volker; Feldmann, Klaus (2013): Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. München: Hanser.
- Stanev Stilian (1979): Methodik zur produktionsorientierten Produktanalyse für die Wiederverwendung von Produktionssystemen 2REUSE. Konzept, Informationsmodell und Validierung am besonderen Beispiel des Karosserierohbaus in der Automobilindustrie. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Stark, Rainer; Gerhard, Thomas; Deuse, Jochen (2018): Artificial Intelligence in Product and Manufacturing Engineering. new power to assist and enhance Human Intelligence. prostep. Munich, 19.04.2018.
- Stark, Rainer; Kind, Simon; Neumeyer, Sebastian (2017): Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design. In: *CIRP Annals* 66 (1), S. 169–172. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.045.
- Stark, Rainer; Wrasse, Kevin; Brandenburg, Elisabeth (2016): Promotionsleitfaden. Technische Universität Berlin.
- Statista (Hg.) (2019): Statistiken zu Industrierobotern. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/themen/2440/industrieroboter-weltweit/>, zuletzt geprüft am 11.12.2020.
- Stefan Hesse; Viktorio Malisa (2016): Taschenbuch Robotik - Montage - Handhabung. München: C. Hanser.
- Steger, Angelika (2007): Diskrete Strukturen. Band 1: Kombinatorik, Graphentheorie, Algebra. 2. Auflage. Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Styczynski, Zbigniew A.; Rudion, Krzysztof; Naumann, André (2017): Einführung in Expertensysteme. Grundlagen, Anwendungen und Beispiele aus der elektrischen Energieversorgung. Berlin: Springer.
- Thaler, Klaus (1993): Regelbasiertes Verfahren zur Montageablaufplanung in der Serienfertigung. Stuttgart: Springer.
- Thomopoulos, Nicholas T. (2014): Assembly Line Planning and Control. Chicago: Springer.
- VDI (2008): VDI 4499 Blatt 1: Digitale Fabrik, Grundlagen (ICS 03.100.50, 35.240.50).
- VDI (2011): VDI 4499 Blatt 2: Digitaler Fabrikbetrieb (03.100.50, 35.240.50).
- VDI Wissensforum; Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik; Automation; Tagung Landtechnik (2018): 19. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik. Seamless Convergence of Automation & IT : Automation : Baden-Baden, 03. und 04. Juli 2018. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 2330, CD-ROM).
- VDI-Richtlinie VDI 2223, 2004: VDI: Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Berlin: Beuth Verlag.

- VDI 2860: Verein deutscher Ingenieure (1990): Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2011: Verein deutscher Ingenieure (2011): VDI 5200 - Fabrikplanung. Planungsvorgehen. Berlin: Beuth Verlag. ICS-Notation: 03.100.99.
- Walla, Waldemar (2015): Standard- und Modulbasierte digitale Rohbau-prozesskette: Frühzeitige Produktbeeinflussung bezüglich Produktionsanforderungen im Karosserierohbau der Automobilindustrie. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Webbing, Robert; Hu, Jack (2005): Automated Generation of Assembly System-Design Solutions. In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 2005 (2), S. 32–39.
- Weidner, Robert Sebastian (2014): Wissenbasierte Planung und Beurteilung von Montagesysteme in der Ladungsfahrtindustrie. Dissertation, Hamburg.
- Wemhöner, Nils (2005): Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, Aachen. Institut für Produktionstechnologie.
- Werners, Brigitte (2013): Grundlagen des Operations Research. Mit Aufgaben und Lösungen. 3., überarb. Aufl. 2013. Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Westkämper, Engelbert; Spath, Dieter; Constantinescu, Carmen (2013): Digitale Produktion. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Yoosefelahi, A.; Aminnayeri, M.; Mosadegh, H.; Ardakani, H. Davari (2012): Type II robotic assembly line balancing problem: An evolution strategies algorithm for a multi-objective model. In: *Journal of Manufacturing Systems*, Bd. 31, S. 139–151.
- Zelewski, Stephan (1989): Komplexitätstheorie. Als Instrument zur Klassifizierung und Beurteilung von Problemen des Operations Research. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag.