

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik

Automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung in der Montage

Joachim Jan Michniewicz

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Die Dissertation wurde am 03.07.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 13.02.2019 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, den Leitern des *iwb*, für die wohlwollende Förderung, die großzügige Unterstützung meiner Arbeit und die Möglichkeit zur Promotion. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, bedanke ich mich recht herzlich für die Übernahme des Korreferats und die aufmerksame Durchsicht meiner Arbeit und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, dem Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kollegen, die durch ihr Engagement, ihre Kreativität und den Spaß an der Sache zu einer prägenden und erkenntnisreichen Zeit beitrugen. Mein ausdrücklicher Dank gilt Dr.-Ing. Julian Backhaus, Dr. Stefan Boschert, Veit Hammerstingl und Prof. Dr.-Ing. Peter Stich für die wertvollen Hinweise und die gründliche Durchsicht meiner Arbeit. Außerdem danke ich meinen Bürokollegen Dino Knoll, Jakob Kurfer, Christopher Lock und Dr.-Ing. Michael Niehues für die stets angenehme Arbeitsatmosphäre und den wertvollen Austausch in verschiedensten Belangen. Darüber hinaus möchte ich mich ausdrücklich bei allen Studierenden bedanken, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben.

Ein enormer Dank richtet sich auch an meine Eltern, die meine Ausbildung ermöglicht und mich immer bedingungslos unterstützt haben. Schließlich gilt mein besonderer Dank Damaris Schrödter für die liebevolle Unterstützung, die vielen wunderbaren Momente und ihr immerwährendes Verständnis für die Arbeit an der Dissertation.

München, 16.04.2019

Joachim Jan Michniewicz

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	VI
Formelzeichenverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Gegenwärtige Herausforderungen für die Arbeitsplanung in der Montage	1
1.2 Zielsetzung und Betrachtungshorizont der Arbeit	4
1.3 Aufbau und wissenschaftssystematische Einordnung	6
2 Grundlagen und Ableitung von Anforderungen	7
2.1 Einleitung	7
2.2 Begriffsdefinitionen	7
2.3 Montage	10
2.3.1 Funktionen der Montage	10
2.3.2 Produktstruktur in der Montage	12
2.3.3 Montagegerechte Produktgestaltung	14
2.3.4 Ressourcen in der Montage	14
2.3.5 Hierarchische Struktur von Montagesystemen	20
2.3.6 Abgeleitete Anforderungen	21
2.4 Veränderungsfähigkeit im Kontext der Montage	21
2.4.1 Ebenen und Klassen der Veränderungsfähigkeit	22
2.4.2 Arten der Flexibilität	23
2.4.3 Abgeleitete Anforderungen	24
2.5 Konstruktion und Arbeitsplanung	24
2.5.1 Begriffsdefinitionen	24
2.5.2 Tätigkeiten und Ergebnisse der Arbeitsablaufplanung	27
2.5.3 Abgeleitete Anforderungen	29
2.6 Austaktung und Takt	30
2.6.1 Begriffsdefinitionen	30

2.6.2	Einordnung in Klassifizierungskriterien der Austaktung	31
2.6.3	Abgeleitete Anforderungen	33
2.7	Digitale Fabrik in der Konstruktion und Arbeitsablaufplanung	34
2.7.1	Begriffsdefinitionen	34
2.7.2	Datenmodelle für Produkt, Prozess und Ressource	35
2.7.3	Computer Aided Design	38
2.7.4	Computer Aided Engineering	39
2.7.5	Computer Aided Process Planning	41
2.7.6	Abgeleitete Anforderungen	42
2.8	Aufgabenorientierte Programmiersysteme	42
2.8.1	Begriffsdefinitionen	42
2.8.2	Struktur aufgabenorientierter Programmiersysteme	43
2.8.3	Abgeleitete Anforderungen	44
2.9	Gegenwärtige Digitalisierungskonzepte in der Produktion	45
2.9.1	Plug&Produce	45
2.9.2	Cyber-Physische Systeme	46
2.9.3	Digitaler Zwilling	46
2.9.4	Abgeleitete Anforderungen	47
2.10	Zusammenfassung und Ableitung von Bewertungskriterien	48
3	Stand der Wissenschaft und Technik	51
3.1	Assembly Sequence Planning	51
3.1.1	Einleitung	51
3.1.2	Modellierung von Montagereihenfolgen	53
3.1.3	Assembly Sequence Planning basierend auf 3D-CAD-Produkt- daten	56
3.1.4	Assembly Sequence Planning in Kombination mit automatisierter Ressourcenauswahl	61
3.1.5	Assembly Sequence Planning zur aufgabenorientierten Programmierung von Robotersystemen	63

3.2	Austaktung	65
3.2.1	Austaktung unter Berücksichtigung von Stations-Eigenschaften	67
3.2.2	Austaktung in Kombination mit Assembly Sequence Planning	69
3.2.3	Fazit	69
3.3	Skillbasierte Automatisierung der Planung in der Montage	70
3.3.1	Automatisierung in der Montagesystemplanung	70
3.3.2	Automatisierung in der Arbeitsablaufplanung	73
3.3.3	Produktbasierte Produktionssteuerung	79
3.3.4	Fazit	80
3.4	Zusammenfassung des Standes der Technik und Ableitung des Handlungsbedarfes	80
4	Entwicklung eines Systems zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung	83
4.1	Überblick über das Gesamtkonzept	83
4.2	Skillbasiertes Informationsmodell zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung	86
4.2.1	Einleitung	86
4.2.2	Einführung von Funktionsprimitiva	86
4.2.3	Einführung von Tasks	91
4.3	Modellierung und Methoden in der Ressourcendomäne	95
4.3.1	Digitale Modellierung von Ressourcen	96
4.3.2	Fähigkeitenmodell des Montagesystems	98
4.3.3	Analysemethoden zur Generierung des Fähigkeitenmodells	101
4.4	Modellierung und Methoden in der Produktdomäne	102
4.4.1	Auswahl eines Ansatzes zur Modellierung von Montagereihenfolgen	103
4.4.2	Aufgabenmodell des Produktes	104
4.4.3	Strukturierung des Aufgabenmodells des Produktes	106
4.4.4	Analysemethode zur Generierung des Aufgabenmodells aus Produkt-Daten	109

4.5	Synthesemethode zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung	119
4.5.1	Qualitativer und quantitativer Abgleich der Anforderungen und Fähigkeiten	121
4.5.2	Austaktung	125
4.5.3	Automatische Simulation der Arbeitspläne	136
4.5.4	Berücksichtigung von Förderhilfsmitteln	142
4.5.5	Wirtschaftliche Bewertung der Arbeitspläne	143
4.6	Zusammenfassung	145
5	Umsetzung und Erprobung	147
5.1	Softwaretechnische Umsetzung	147
5.1.1	Implementierung des Planungssystems	147
5.1.2	Benutzeroberflächen	149
5.2	Anwendung in Referenzszenarien	151
5.2.1	Referenzszenario 1 - „Einführung einer neuen Produktvariante“	152
5.2.2	Referenzszenario 2 - „Planung einer Montagereihenfolge für eine Montagelinie“	157
5.3	Zusammenfassung	161
6	Technische und wirtschaftliche Bewertung	163
6.1	Methodische und technische Bewertung	163
6.2	Wirtschaftliche Bewertung	166
7	Zusammenfassung und Ausblick	171
8	Literaturverzeichnis	173
9	Anhang	203
9.1	Visualisierungen der Bedienoberflächen des Planungssystems	203
9.1.1	Einleitung	203
9.1.2	Funktionen der Bedienoberflächen	204
9.1.3	Bedienoberfläche für die automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung	208
9.1.4	Referenzszenario 1 - „Einführung einer neuen Produktvariante“	210

9.1.5	Referenzszenario 2 - „Planung einer Montagereihenfolge für eine Montagelinie“	214
9.2	Liste betreuter Studienarbeiten	216

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
Abb.	Abbildung
AFP	Anforderungs-Funktionsprimitivum
ALB	Assembly Line Balancing (Austaktung)
ALTFP	Alternativen-Funktionsprimitivum
AML	AutomationML
APFP	Arbeitsplan-Funktionsprimitivum
API	Application Programming Interface
APP	Assembly Path Planning
ASP	Assembly Sequence Planning
AWF	Arbeitsgemeinschaft für wirtschaftliche Fertigung
BG	Baugruppe
BS	Bereitstellungs-Vorgang
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAEX	Computer Aided Engineering Exchange
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAPP	Computer Aided Process Planning
CIRP	Internationale Akademie für Produktionstechnik (französisch: College International pour la Recherche en Productique)
CPS	Cyber-Physisches System

Abkürzung	Bedeutung
CPD	Cyber-Physical Device (Cyber-Physisches Betriebsmittel)
CPP	Cyber-Physical Product (Cyber-Physisches Produkt)
CPPS	Cyber-Physisches Produktionssystem
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOF	Degree of Freedom
EBG	Endbaugruppe
EN	europäische Norm
eMVG	erweiterter Montagevorranggraph
engl.	englisch
eOTD	ECCMA Open Technical Dictionary
FFP	Fähigkeits-Funktionsprimitivum
FP	Funktionsprimitivum
GP	Greifpunkt
ID	Identifikationsnummer
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
IT	Informationstechnik
ISO	Internationale Organisation für Normung (engl.: International Organization for Standardization)
JT	Jupiter Tessellation
KOS	Koordinatensystem
KV	Kollisionsvektor
MTM	Methods-Time Measurement
NDGB	Non Directional Blocking Graph

Abkürzung	Bedeutung
NC	numerische Steuerung (englisch: Numerical Control)
PC	Personal Computer
PDF	Portable Document Format
PDM	Product Data Management
PLM	Product Lifecycle Management
PPR	Produkt, Prozess und Ressource
PS	Siemens Tecnomatix Process Simulate
PT	Primär-Task
PV	Primärvorgang
RC	Robotersteuerung (englisch: Robot Control)
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
RF	Reihenfolge
RG	Resource-Graph
RG-K	Resource-Graph-Knoten
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SBG	Startbaugruppe
SFB	Sonderforschungsbereich
SFC	Sequential Function Chart
SG	Station-Graph
SG-K	Station-Graph-Knoten
ST	Sekundär-Task
SV	Sekundärvorgang
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
TCP	Tool Center Point

Abkürzung	Bedeutung
TCV	Siemens Teamcenter Visualization
TS	Transportvorgang
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
VM	Vormontage
VWF	Vibrationswendelförderer
WLAN	Wireless Local Area Network
XML	Extensible Markup Language
ZF	Zuführung

Formelzeichenverzeichnis

Variable	Einheit	Bedeutung
$A_{Skill-Bib}$	€/Jahr	jährliche Kosten zur Aktualisierung der Skill-Bibliothek
$A_{Ress-Bib}$	€/Jahr	jährliche Kosten zur Aktualisierung der Ressourcen-Bibliothek
AB	Jahre	Abschreibungszeitraum
AF		Abzinsfaktor
e	%	zeitliche Einsparungen durch automatisches simulationsgestütztes Planungssystem
E	€/Jahr	Summe jährlicher Einsparungen
I	€	Invest
K	€/Jahr	Summe jährlicher Kosten
KV		Kollisionsvektor
M_{RF}		Priorisierungsmatrix
n		Anzahl an Einzelteilen eines Produktes
$n_{Arbeitsplaner}$		Anzahl an Arbeitsplanern
N_{DV}		Anzahl an Demontageversuchen von Baugruppen bei der Analyse eines Produktes
$S_{Arbeitsplaner}$	€/h	Stundensatz des Arbeitsplaners
$t_{Arbeitsplanung}$	h/Jahr	Dauer der klassischen Arbeitsplanung pro Jahr
t_{PV}	s	Primärvorgangsdauer
t_{SV}	s	Sekundärvorgangsdauer
W	%	Wartungskosten anteilig am Invest
W_j	€/Jahr	jährliche Wartungskosten
Z	%	kalkulatorische Zinsen

1 Einleitung

1.1 Gegenwärtige Herausforderungen für die Arbeitsplanung in der Montage

Die produzierende Industrie ist gegenwärtig unterschiedlichen globalen Trends ausgesetzt. Die zunehmende Marksättigung sowie ein Überangebot an Waren zwingt Unternehmen dazu, ihr Leistungsangebot auszubauen und gegenüber der Konkurrenz zu differenzieren (RÖHRIG 2002, WESTKÄMPER 2006). Die steigende Individualisierung von Produkten bewirkt eine immer höhere Variantenvielfalt und sinkende Losgrößen (LINDEMANN ET AL. 2006, ABELE & REINHART 2011, LOTTER & WIENDAHL 2012). Darüber hinaus nehmen die Komplexität der Produkte und die Häufigkeit von kundenseitig gewünschten Produktänderungen zu (LINDEMANN ET AL. 2006). Aufgrund der zunehmenden Dynamik der globalen Märkte sind die Unternehmen immer schwerer zu prognostizierenden Produktlebenszyklen und schwankenden Absatzzahlen ausgesetzt (ABELE ET AL. 2006, MILBERG & MÖLLER 2008). Einführungszeiten von Produkten verkürzen sich immer weiter (JODLBAUER 2008). Voraussetzung für das Bestehen am Markt sind folglich Produktionssysteme, welche schnell und aufwandsarm an veränderte Anforderungen anpassbar sind (WIENDAHL 2002, NYHIUS ET AL. 2008).

Besonders betroffen hiervon ist die Montage als Ort der Variantenbildung, die als letzter wertschöpfender Schritt vor Auslieferung des Produktes von sämtlichen vorgelagerten Produktionsbereichen beeinflusst wird und unterschiedliche Arbeitsschritte für jede Produktvariante notwendig macht (LOTTER & WIENDAHL 2012, WIESBECK 2014). Die Montage muss folglich flexibel sein (JONAS 2000, S.6). Gleichzeitig sollen Montagesysteme bei Produktänderungen möglichst unverändert weiterverwendet werden können (EVERSHEIM 2002, LOTTER & WIENDAHL 2012).

Eine zentrale Herausforderung bei der Planung der Montage eines neuen Produktes durch ein bestehendes Montagesystem liegt in der Menge und Komplexität der zu treffenden Entscheidungen im vorhandenen Lösungsraum möglicher Planungsalternativen (JONAS 2000, EVERSHEIM 2002). Als Beispiele seien hier genannt: die große Menge theoretisch möglicher Montagereihenfolgen (HOMEM DE MELLO & LEE 1991), alternative Vorgänge zur Montage der einzelnen Bauteile des Produktes (LOTTER & WIENDAHL 2012, S.32), unterschiedliche mögliche Zuordnungen der Montagevorgänge zu den Stationen des Produktionssystems und unterschiedliche mögliche Materialflüsse durch das Produktionssystem (BOYSEN ET AL. 2007). (SETHI & SETHI 1990, WIENDAHL 2002, ELMARAGHY 2009)

Der Lösungsraum wird zusätzlich durch die Möglichkeit einer *Rekonfiguration* von Betriebsmitteln im Montagesystem erweitert (ELMARAGHY 2009), die durch unterschiedliche Ansätze weiter vereinfacht wird. Beispielhaft seien hier genannt: *Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS)* zur Steigerung der Modularität und Kompatibilität in Produktionssystemen (DASCHENKO 2006), *Plug&Produce* zur Vereinfachung der Rekonfiguration von Ressourcen (ARAI ET AL. 2000, KRUG 2012) sowie der Einsatz *Cyber-Physischer Systeme*, welche die Fähigkeit zur automatischen Vernetzung und Kollaboration besitzen (ACATECH 2011, MONOSTORI ET AL. 2016). Neue Anlagen sollen nicht mehr komplett neu entwickelt, sondern aus bestehenden Elementen flexibel konfiguriert werden (LITTO ET AL. 2004).

Die Planungsphase, die im soeben aufgespannten Lösungsraum unter Einhaltung monetärer, temporärer und qualitativer Kriterien zu einem bestmöglichen Ergebnis kommen soll, wird als *Arbeitsplanung bezeichnet*. Sie umfasst alle einmalig durchzuführenden Planungsmaßnahmen zur wirtschaftlichen Herstellung eines Erzeugnisses. Sie legt fest, „(...) was, wie, womit hergestellt werden soll“ (EVERSHEIM 2002, S. 3). Im Gegensatz zu den Methoden zur *Montagesystemplanung* nach BULLINGER (1986), REFA (1990 und LOTTER & WIENDAHL (2012), bei der die Planung eines neuen Montagesystems im Fokus steht, wird bei der Arbeitsplanung bereits von einem bestehenden Montagesystem ausgegangen.

Zentrales Ergebnis der Arbeitsplanung im Kontext der Montage ist der *Arbeitsplan* (ARNDT 2017). Dieser wird anhand der *Produktdokumentation* aus der vorgelagerten *Konstruktion* sowie anhand der Informationen über Struktur und Eigenschaften des Montagesystems erstellt. Der Arbeitsplan legt die Sequenz der Montagevorgänge fest, ordnet diese geeigneten Stationen und Ressourcen im Montagesystem zu und enthält vollständige, detaillierte Vorgangsbeschreibungen. Die Aufteilung der durchzuführenden Montagevorgänge auf mehrere Stationen eines Montagesystems entspricht dabei dem Planungsfall der *Austaktung* (BECKER & SCHOLL 2006, BOYSEN ET AL. 2007). Der Arbeitsplan dient der nachgelagerten *Arbeitssteuerung* als Grundlage zur Abwicklung der Aufträge. Die Arbeitsplanung berät zudem die Konstruktion hinsichtlich der Produktgestalt unter Berücksichtigung der Einschränkungen des bestehenden Montagesystems. Weitere Ergebnisse der Arbeitsplanung sind der *Steuerungscode* für die Ressourcen, Vorgaben hinsichtlich notwendiger Änderungen am Montagesystem sowie Kalkulationen, die sicherstellen, dass wirtschaftliche Vorgaben eingehalten werden. Die Schnittstellen zwischen den Phasen sind in Abb. 1 dargestellt. Um einen möglichst frühen Markteintritt (engl.: *time-to-market*) bzw. eine Minimierung der Auftragsdurchlaufzeit (engl.: *time-to-customer*) zu ermöglichen, muss die Einführung neuer Produktvarianten möglichst aufwandsarm gestaltet sein. Folglich ist eine Reduktion der Dauer der Arbeitsplanung erwünscht. (LINNER 1993, EVERSHEIM 2002)

Die Arbeitsplanung hat aufgrund ihrer Rolle als Bindeglied zwischen Konstruktion, Arbeitssteuerung und Montage eine Schlüsselfunktion zur Nutzbarmachung des vorgestellten Lösungsraumes möglicher Planungsalternativen. Dabei nimmt ihre Häufigkeit aufgrund der steigenden Variantenvielfalt sowie aufgrund der immer kürzeren Produktlebenszyklen zu. Demgegenüber kommt es aufgrund der fehlenden Kenntnis der Konstrukteure hinsichtlich der Folgen ihrer Design-Entscheidungen auf die Montagevorgänge in einem Produktionssystem zu vielen iterativen Anpassungen des Produktes durch aufwändige und fehleranfällige Abstimmungen zwischen der Konstruktion und der Arbeitsplanung (KAMRANI & NASR 2010).

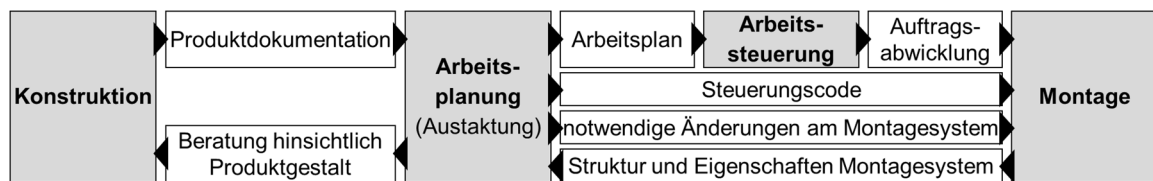


Abbildung 1: Einordnung der Arbeitsplanung in Anlehnung an (EVERSHEIM 2002).

Bei der Konstruktion und Arbeitsplanung kommen verbreitet digitale Methoden, Modelle und Werkzeuge zum Einsatz. *Computer-Aided-Design (CAD)* Werkzeuge werden in der Konstruktion zur Erstellung räumlicher *3D-CAD-Modelle* von Einzelteilen und zu montierenden Produkten verwendet. Die Entwicklung von Ressourcen erfolgt gegenwärtig üblicherweise ebenfalls mit Hilfe von CAD-Werkzeugen. Zur Planung der Struktur von Montagesystemen werden die CAD-Modelle der ausgewählten Ressourcen in einem digitalen *Umweltmodell* zusammengeführt und angeordnet. *Computer-Aided-Engineering (CAE)* Werkzeuge erlauben u.a. Prozess-, Struktur- und Funktionsanalysen zur frühzeitigen Beseitigung von Fehlern. Beispielhaft für CAE sei die *Kinematiksimulation* zur Sicherstellung der Kollisionsfreiheit und Erreichbarkeit genannt, die während der Arbeitsplanung in der Montage Anwendung findet (BRACHT ET AL. 2011, S. 117). Voraussetzung hierfür sind dreidimensionale Modelle der Ressourcen mitsamt Geometrie- und Verhaltensmodellen aus einer *Maschinenbibliothek* (VDI-RICHTLINIE 4499) sowie ein dreidimensionales Modell des Produktes. Die Erhöhung der *Durchgängigkeit* beim Einsatz digitaler Modelle und Werkzeuge in allen Phasen der Planung, etwa durch Reduktion von Modellierungsaufwänden und Vermeidung von fehlender Übertragbarkeit der Modelle zwischen den Werkzeugen, bietet folglich ein hohes Potential zur Effizienzsteigerung. (VAJNA ET AL. 2009, DRAHT 2010, BRACHT ET AL. 2011)

Voraussetzung für die Automatisierung der Arbeitsplanung und Austaktung sind digitale Modelle zur Beschreibung des Produktes mitsamt seiner geforderten Montagevorgänge sowie zur Beschreibung des Montagesystems mit seinen

individuellen Funktionen und Restriktionen (BOYSEN ET AL. 2007, REINHART ET AL. 2017). Ein in der Forschung verbreiteter Ansatz ist dabei die Verwendung abstrakter Beschreibungen von Vorgängen in Form von sogenannten Fähigkeiten, Tasks bzw. Skills. *Skills* werden im Folgenden definiert als herstellerunabhängige, semantische und funktionsorientierte Beschreibungen der Prozesse, die zur Herstellung eines Produktes durchgeführt werden müssen bzw. von Ressourcen durchgeführt werden können (vgl. BENDEL (2010), KLUGE (2011), PFROMMER ET AL. (2015), BACKHAUS (2016), REINHART ET AL. (2017)). Skills werden angewendet, um automatisch Ressourcen für geforderte Montagevorgänge auszuwählen (vgl. z. B. DEUTSCHLÄNDER (1989) und KEDDIS ET AL. (2015)) sowie um Sequenzen von Montagevorgängen zu verketteten Stationen eines Montagesystems im Falle der Austaktung zuzuordnen (vgl. BOYSEN ET AL. (2007) und BECKER & SCHOLL (2006)). Des Weiteren erlauben Skills eine Reduktion der Aufwände bei der Programmierung von Montagesystemen. Durch die Abstraktion der Aufgabenbeschreibung auf die Ebene von Vorgängen wird kein Expertenwissen bezüglich des Montagesystems verlangt und zur Nutzung einer Ressource müssen nicht ihre spezifischen Programmierbefehle verwendet werden (NAUMANN ET AL. 2007, THOMAS & WAHL 2010, BACKHAUS 2016). Diese Art der Programmierung wird der *aufgabenorientierten Programmierung* zugeordnet (WECK & BRECHER 2006). Das Konzept der Skills ist nicht abschließend definiert und verlangt eine weitergehende Modellierung von Vorgängen und Ressourcen zur Erlangung einer industriellen Reife (MAFFEI ET AL. 2011).

1.2 Zielsetzung und Betrachtungshorizont der Arbeit

Ausgehend von den im vorherigen Abschnitt hergeleiteten Herausforderungen soll im Rahmen dieser Arbeit ein Planungssystem entwickelt werden, das die Arbeitsplanung in der Montage simulationsgestützt automatisiert. Sämtliche geforderte Ergebnisse der Arbeitsplanung, die in Abschnitt 1.1 eingeführt wurden, sollen dabei generiert und dem Nutzer zur Verfügung gestellt werden.

Voraussetzung hierfür ist die Entwicklung eines *skillbasierten Informationsmodells*, das sowohl die vom zu montierenden Produkt *geforderten Montagevorgänge* als auch die von einem Montagesystem *durchführbaren Montagevorgänge* abbildet. Es muss eine *Synthesemethode* entwickelt werden, die aufbauend auf dem Informationsmodell die vom Produkt geforderten Montagevorgänge geeigneten Stationen und Ressourcen innerhalb eines Montagesystems zuordnet. Die Methode muss folglich eine durchgängige automatisierte Synthese der digitalen Modelle des Produktes und des Montagesystems durchführen. Als Ergebnis soll ein vollständiger, simulativ abgesicherter und monetär bewerteter digitaler Arbeitsplan erzielt werden.

Zur Vermeidung von Modellierungsaufwänden sollen als Eingangsdaten für das Planungssystem die gegenwärtig in Industrieunternehmen verbreiteten und möglichst unveränderten digitalen Modelle von zu montierenden Produkten, Montagesystemen und Ressourcen verwendet werden. Daher müssen Analysemethoden entwickelt werden, welche die vorhandenen Modelle in das skillbasierte Informationsmodell überführen. Der Schwerpunkt liegt auf 3D-CAD-Modellen, deren Anwendung in vielen Branchen alltäglich ist (VAJNA ET AL. 2009).

Folglich muss eine *Analysemethode* entwickelt werden, die die durchzuführenden Montagevorgänge aus dem 3D-CAD-Modell des zu montierenden Produktes aus der Konstruktion automatisiert ableitet und in einem skillbasierten *Aufgabenmodell* abbildet. Dabei sollen Ansätze des *Assembly Sequence Planning* (HOMEM DE MELLO & LEE 1991) zur Anwendung kommen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird als weitere Eingangsinformation des zu entwickelnden Planungssystems von einem bestehenden digitalen Umweltmodell des Montagesystems ausgegangen, das Informationen bezüglich der Geometrie und Positionierung der Ressourcen enthält. Es soll eine *Analysemethode* entwickelt werden, die das digitale Umweltmodell automatisiert in ein skillbasiertes *Fähigkeitenmodell* überführt, das die durchführbaren Montagevorgänge und Restriktionen des Montagesystems abbildet. Mögliche Rekonfigurationen der Ressourcen und valide Materialflüsse sollen Berücksichtigung finden. Voraussetzung hierfür ist eine Maschinenbibliothek, welche digitale Modelle der bei der Planung zu berücksichtigenden Ressourcen bereitstellt. Das zu entwickelnde digitale Ressourcenmodell muss mit dem skillbasierten Informationsmodell kompatibel sein.

Des Weiteren soll die Planung automatisiert in einer Kinematiksimulation abgesichert werden, um die Durchführbarkeit der Montagevorgänge sicherzustellen. Die Ressourcen im Umweltmodell des Montagesystems sollen dabei anhand des Aufgabenmodells des Produktes aufgabenorientiert programmiert werden (WECK & BRECHER 2006). Dabei sollen ebenfalls die abstrakten Vorgangsbeschreibungen in Form von Skills Anwendung finden (vgl. THOMAS & WAHL (2010), STENMARK & MALEC (2015), BACKHAUS (2016)). Zur simulativen Absicherung sollen die Modelle von Produkt und Montagesystem automatisiert integriert werden. Der Betrachtungshorizont der Simulation beschränkt sich auf steife Bauteile. Physikalische Effekte wie Gravitation und Reibung werden vernachlässigt.

Die automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung soll als Informationsquelle zur Generierung von Handlungsempfehlungen hinsichtlich notwendiger Änderungen am Produkt beziehungsweise am Montagesystem für die vor- und nachgelagerten Planungsphasen dienen. Folglich sollen durch die Synthese der Modelle Handlungsempfehlungen für die Produktentwicklung hinsichtlich der Produktgestalt

sowie für die Arbeitsplanung bezüglich der zu entwickelnden Ressourcen und Rekonfigurationen des Montagesystems automatisiert generiert werden.

Das Planungssystem soll zur Arbeitsplanung in hybriden Montagesystemen (LOTTER & WIENDAHL 2012) geeignet sein. Die Lösungsräume von Planungsalternativen sollen möglichst vollständig berücksichtigt und objektiv bewertet werden. Die Analyse- und Synthesemethoden sollen zur Erhöhung der Planungsqualität und -effizienz die Berücksichtigung des Expertenwissens des Nutzers erlauben.

In der vorliegenden Arbeit wird demnach ein Planungssystem entwickelt, welches die automatische Arbeitsplanung anhand von industriellen Produkt- und Montagesystemdaten realisiert. Voraussetzungen sind ein skillbasiertes Informationsmodell, die Entwicklung geeigneter Analysemethoden zur Generierung des Anforderungsmodells des Produktes und des Fähigkeitenmodells des Montagesystems sowie eine durchgängige Synthesemethode zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung und Austaktung. Das System wird prototypisch umgesetzt und erprobt.

1.3 Aufbau und wissenschaftssystematische Einordnung

Die vorliegende Arbeit kann in der Wissenschaftssystematik nach ULRICH & HEHL (1976) den angewandten Handlungswissenschaften zugeordnet werden, die Teil der Realwissenschaften sind. Das forschungsmethodische Vorgehen orientiert sich an der Strategie anwendungsorientierter Forschung nach ULRICH (1981). Ergebnis der konstruktiven Dissertation ist eine Methodik für die automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung in der Montage.

Im nachfolgenden Kapitel 2 erfolgt eine Definition der relevantesten Begriffe, die im Rahmen dieser Arbeit Verwendung finden. Es folgt eine deskriptive Erfassung und Typisierung praxisrelevanter Grundlagen, aus denen deduktiv Anforderungen an das zu entwickelnde Planungssystem abgeleitet und zusammengefasst werden. Die Anforderungen dienen in Kapitel 3 „Stand der Wissenschaft und Technik“ der Analyse und Bewertung problemrelevanter Theorien und Hypothesen. Ausgehend von dieser Bewertung wird ein detaillierter Handlungsbedarf abgeleitet. In Kapitel 4 werden Modelle, Methoden und Regeln des Planungssystems zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung abgeleitet. Dabei wird ein synthetischer und kreativer Ansatz verfolgt. Kapitel 5 beschreibt die softwaretechnische Umsetzung sowie die empirische und induktive Erprobung einer prototypischen Umsetzung in Referenzszenarien mit dem Ziel der Prüfung der Modelle, Methoden und Regeln im Anwendungszusammenhang. Eine technische und wirtschaftliche Bewertung des Planungssystems zur Beratung der Praxis erfolgt in Kapitel 6. Die abschließende Zusammenfassung und der Ausblick befinden sich in Kapitel 7.

2 Grundlagen und Ableitung von Anforderungen

2.1 Einleitung

In diesem Kapitel sollen die Grundlagen der Arbeit erörtert und daraus zielgerichtet Anforderungen an das zu entwickelnde Planungssystem abgeleitet werden. Im Hinblick auf die übergreifende Zielsetzung der Arbeit erfolgt in Abschnitt 2.2 zunächst eine Begriffsdefinition.

Abschnitt 2.3 definiert und kategorisiert die Bestandteile der Montage in Hinblick auf Funktionen der Montage sowie die Struktur von Produkten und Montagesystemen. In Abschnitt 2.4 erfolgt eine Klassifizierung der Veränderungsfähigkeit im Kontext der zuvor definierten Bestandteile und Strukturen in der Montage. Im darauffolgenden Abschnitt 2.5 werden die Vorgänge in der Konstruktion und der Arbeitsplanung im Detail vorgestellt und zeitlich untergliedert. Relevante Begriffsdefinitionen und Kategorisierungen aus dem Bereich der Austaktung werden in Abschnitt 2.6 vorgestellt. Digitale Modelle, Methoden und Werkzeuge, die im Zusammenhang mit der digitalen Fabrik stehen, werden in Abschnitt 2.7 betrachtet. Ausgehend davon definiert Abschnitt 2.8 die Bestandteile aufgabenorientierter Programmiersysteme, die gemäß der Zielsetzung zur Automatisierung der simulationsgestützten Absicherung verwendet werden sollen. Abschnitt 2.9 widmet sich gegenwärtigen Digitalisierungs-konzepten im Kontext von *Industrie 4.0* wie Plug&Produce, Cyber-Physischen Systemen sowie dem Digitalen Zwilling (vgl. ACATECH (2011), BAUERNHANS ET AL. (2016), REINHART (2017)) und ordnet die vorliegende Arbeit in diese ein.

Am Ende jedes Abschnitts werden Anforderungen für jedes Themenfeld abgeleitet, die bei der Entwicklung eines Systems zur automatisierten simulationsgestützten Arbeitsplanung erfüllt werden müssen. Diese Anforderungen werden in Abschnitt 2.10 in Form von Bewertungskriterien zusammengefasst. Sie dienen in Kapitel 3 dazu, den Stand der Wissenschaft und Technik zu bewerten.

2.2 Begriffsdefinitionen

Die *Montage* ist nach WARNECKE ET AL. (1975) definiert als der Zusammenbau von Einzelteilen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt wurden, zu einem Produkt höherer Komplexität mit vorgegebenen Funktionen in einer bestimmten Zeit. Die Montage ist der letzte wertschöpfende Schritt vor der Auslieferung des Produktes (LOTTER 2012).

Als *Montagevorgänge* werden in Anlehnung an LOTTER & WIENDAHL (2012, S. 49) alle Aufwendungen an Zeit, Energie, Informationen und Teilen, die zur Durchführung der Montage nötig sind, definiert. Ein Montagevorgang kann in *Teilvorgänge* aufgeteilt werden (CUIPER 2000, S. 63).

Einrichtungen, die zur Durchführung von Montageaufgaben dienen, werden übergeordnet *Montageanlagen* oder synonym *Montagesysteme* genannt (JONAS 2000). Sie setzen sich aus miteinander verketteten Montagestationen zusammen, die ihrerseits aus Ressourcen aufgebaut sind (CIRP 2011).

Kontakt wird definiert als die physische Berührung zweier Körper, die im Rahmen der Montage valide ist. Eine *Kollision* hingegen wird im Rahmen dieser Arbeit als ein Kontakt oder eine Überschneidung zwischen Körpern definiert, die einen fehlerhaften Montagevorgang zur Folge hat (vgl. JIMÉNEZ (2013), JONES ET AL. (1998)).

Konstruktion ist die Gesamtheit aller Tätigkeiten mit denen ausgehend von einer Aufgabenstellung die zur Herstellung und Nutzung eines Produktes notwendigen Informationen erarbeitet werden (VDI-RICHTLINIE 2210). Das Ergebnis ist die Produktdokumentation, welche den Ausgangspunkt für die Auswahl der Fertigungstechnologien, Ressourcen und Arbeitsfolgen bildet (VAJNA ET AL. 2009).

Die *Arbeitsablaufplanung* umfasst alle einmalig auftretenden Schritte zur Planung und Absicherung von Prozessen zur Montage von Produkten unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit. Ziel ist die Auswahl zur Herstellung benötigter Technologien sowie erforderlicher Ressourcen mitsamt einer optimalen Abfolge der Montagevorgänge. Ein Ergebnis ist der Arbeitsplan. (EVERSHEIM 2002)

Ein *Arbeitsplan* beschreibt alle zur Herstellung eines Produktes notwendigen Vorgänge mitsamt der Vorgangsfolge und -dauer. Außerdem umfasst er die Arbeitsplatzzuordnung unter Berücksichtigung der dafür notwendigen Ressourcen und der zur Durchführung des Vorgangs notwendigen Informationen. (EVERSHEIM 2002, ARNDT 2017)

Ein *System* besteht aus einer Menge von Elementen (Teilsystemen), die Eigenschaften besitzen und durch Beziehungen miteinander verknüpft sind. Das System wird durch eine Systemgrenze von der Umgebung abgegrenzt und steht mit der Umgebung durch Ein- und Ausgangsgrößen in Beziehung. Die Funktion eines Systems kann durch den Unterschied der dem Zweck entsprechenden Ein- und Ausgangsgrößen beschrieben werden. (VDI-RICHTLINIE 2221, EHRENSPIEL 2009)

Eine *Struktur* ist die „(...) wirkmäßige Zuordnung der Elemente eines Systems zueinander“ (LOTTER & WIENDAHL 2012, S. 19).

Ein *Modell* ist ein „physikalisch-mathematisches Abbild eines technischen Bauelements, einer Baugruppe oder eines komplexen Systems“ (VDI-RICHTLINIE 2206, S. 115). *Modellierung* ist die Erstellung des „(...) Modells eines vorhandenen oder zu entwickelnden Systems“ (VDI-RICHTLINIE 2206, S. 117).

Ein *Informationsmodell* ist definiert als eine abstrakte Abbildung von Objekten mitsamt ihren Eigenschaften und Beziehungen zueinander für eine bestimmte Domäne. Des Weiteren beinhalten Informationsmodelle Operationen, die mit den Objekten durchgeführt werden können. (LEE 1999)

Simulation ist ein „Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (VDI-RICHTLINIE 3633, S. 16).

Der Begriff *Digitalisierung* bezeichnet die Überführung von analogen Informationen in eine digitale, vom Rechner verarbeitbare Speicherform sowie die Übertragung bisher von Menschen durchgeführter Aufgaben an den Rechner bzw. an eine geeignete Software (BRACHT ET AL. 2011, S. 375). Digitalisierung umfasst die Aufnahme, Übertragung und Verarbeitung von Daten (WITTPAHL 2017, SAMULAT 2017).

Eine *Anforderung* ist im Kontext dieser Arbeit nach IEEE 610.12 eine Bedingung, die ein System aufweisen muss (vgl. POHL 2008) bzw. ein Anspruch an dessen Leistungsfähigkeit (WAHRIG & WAHRIG-BURFEIND 2002). Im Rahmen dieser Arbeit stellen die zu montierenden Produkte Anforderungen an Montagesysteme sowie an deren Ressourcen.

Als *Fähigkeit* wird das „(...) Vermögen etwas zu tun“ bzw. „(...) die Möglichkeit (...) gewisse Funktionen zu erfüllen (...)“ bezeichnet (DUDEN 2017). Nach KARL (2015) kann es sich dabei um von Montagesystemen und Ressourcen durchführbare Montagevorgänge handeln.

Skills werden im Folgenden definiert als herstellerunabhängige, semantische und funktionsorientierte Beschreibung der Prozesse, die zur Herstellung eines Produktes durchzuführen bzw. die von Ressourcen durchführbar sind (vgl. BENGEL (2010), KLUGE (2011), PFROMMER ET AL. (2015), BACKHAUS (2016), REINHART ET AL. (2017), HAMMERSTINGL & REINHART (2017)).

Graphen sind mathematische Modelle zur Abbildung netzartiger Strukturen (TITTMANN 2011). Ein Graph $G = (V, E)$ wird aus den disjunktiven Mengen an Knoten V und Kanten E gebildet. Für die Menge der Kanten E gilt $E \subseteq [V^2]$. Folglich ist jede Kante $e \in E$ eine 2-elementige Teilmenge von V und gibt eine Verbindung zwischen zwei Knoten $v \in V$ an. Zwei benachbarte Knoten eines Graphen werden

als *adjazent* bezeichnet. Der Weg zwischen zwei Knoten x_0 und x_k wird als nicht leerer Graph $P = (V, E)$ beschrieben:

$$V = \{x_0, x_1, \dots, x_k\} \quad E = \{(x_0, x_1), (x_1, x_2), \dots, (x_{k-1}, x_k)\}$$

Die Länge eines Weges in einem Graphen entspricht der Anzahl an Kanten zwischen den beiden Knoten x_0 und x_k (DIESTEL 2010). Es kann zwischen *gerichteten* und *ungerichteten* Graphen unterschieden werden, siehe Abb. 2. In einem ungerichteten Graphen ist keine Reihenfolge zwischen den Knoten definiert. Die Kanten in einem gerichteten Graphen heißen gerichtete Kanten. Sie können nur in jene Richtung durchlaufen werden, die durch einen Pfeil dargestellt wird. Jede Kante hat somit einen Anfangs- und einen Endknoten. *Gewichtete* Graphen erlauben eine Zuordnung einer reellen Zahl zu den Kanten, deren Wert *Kantengewicht* genannt wird. (CORMEN ET AL. 2013) Als *Teilgraph* G' eines Graphen G wird ein Graph bezeichnet, der aus der Teilmenge der Knoten $V' \subseteq V$ und Kanten $E' \subseteq E$ des Graphen G besteht. (DIESTEL 2010)

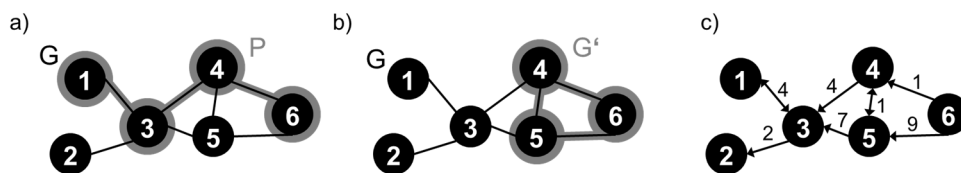


Abbildung 2: a) Ungerichteter Graph G mit Weg P der Länge 3. b) Graph G mit Teilgraph G' . c) Gerichteter, gewichteter Graph mit Kantengewichten.

2.3 Montage

2.3.1 Funktionen der Montage

LOTTER (2012) gliedert die Montage in fünf Funktionen. Kernfunktion der Montage sind die Vorgänge des *Fügens* sowie des *Handhabens*, die in DIN 8593 bzw. in VDI-RICHTLINIE 2860 detailliert beschrieben werden. Die DIN 8593 (S. 3) definiert das Fügen als „das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff.“ Die VDI-RICHTLINIE 2860 (S. 2) definiert Handhaben als „Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Ordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskordinatensystem.“ Zusätzlich werden der Montage die Funktionen des Justierens, des Kontrollierens sowie Sonderoperationen, wie beispielsweise das Auspacken oder Markieren von Bauteilen, zugeordnet. Je

nach Art des Montagevorgangs sind unterschiedliche Abläufe von Funktionen sowie Kombinationen von Funktionen durchzuführen.

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass die VDI-RICHTLINIE 2860 und DIN 8593 unterschiedliche Betrachtungsebenen beschreiben (vgl. BACKHAUS 2016, S. 13). Der Fokus der DIN 8593 liegt auf der Definition des Fügens im Kontext unterschiedlicher Fertigungsverfahren. Es werden Zustandsänderungen von mindestens zwei Bauteilen beschrieben, deren Zusammenhalt auf verschiedene Arten erfolgen kann, beispielsweise durch Einlegen, Schrauben, Klemmen oder Kleben. Die VDI-RICHTLINIE 2860 konzentriert sich auf die Beschreibung von Handhabungsvorgängen, die in Form von elementaren und zusammengesetzten, lösungsneutralen Funktionen beschrieben werden. Die Funktionen werden dabei den fünf übergeordneten Kategorien Speichern, Mengen verändern, Bewegen, Sichern und Kontrollieren zugeordnet. Laut VDI-RICHTLINIE 2860 können sämtliche Handhabungsvorgänge auf folgende sieben *Elementarfunktionen* zurückgeführt werden: Teilen, Vereinigen, Drehen, Verschieben, Sichern, Entsichern und Prüfen. Die VDI-RICHTLINIE 2860 führt zudem Symbole zur Definition der Funktionen ein. Kenngrößen wie Position, Orientierung und Ordnungszustand sind Teil der Funktionsbeschreibung. Die DIN 8593 hingegen beinhaltet nur textuelle Definitionen der Fügevorgänge. Die elementaren Funktionen, die aus der VDI-RICHTLINIE 2860 stammen, können zusammengefasst und zur Beschreibung der komplexeren Fügeverfahren nach DIN 8593 verwendet werden (WIESBECK 2014, BACKHAUS 2016).

Voraussetzung für die Montage ist die *Bereitstellung* der zu montierenden Bauteile in einem Montagesystem (FROMMHERZ & WERLING 1990). Die *Bereitstellung* hat laut REFA 1991 die Aufgabe, „(...) das im Betrieb verfügbare Material für die Verwendung bei der Aufgabendurchführung in der benötigten Art und Menge termingerecht am Bereitstellungsplatz zur Verfügung zu stellen.“ Die Strecke vom Bereitstellungsplatz bis zur Fügeposition, an der das Bauteil räumlich bestimmt zur Verfügung stehen muss, wird *Zuführung* genannt (NYHUIS ET AL. 2012, S. 288).

Zur Beurteilung des wirtschaftlichen Wirkungsgrades von Montagesystemen werden Montagevorgänge in *Primär-* und *Sekundärvorgänge* unterteilt (LOTTER & WIENDAHL 2012, S. 49). Der Begriff *Primärvorgänge (PV)* beschreibt alle Aufwendungen, die der Wertschöpfung während der Montage, also der Vervollständigung des Produktes, dienen. Dabei handelt es sich zum Beispiel um das Einlegen und Einschrauben von Teilen. Der Zusammenbau von Komponenten erfordert dabei *Montagebewegungen*, die mit dem Erreichen der endgültigen relativen Lage der Fügepartner abgeschlossen sind (CUIPER 2000, S. 64). Die räumliche Beschreibung dieser relativen Montagebewegung der Komponenten wird

im folgenden *Montagebahn* genannt. *Sekundärvorgänge* (SV) sind Aufwendungen, die keine Wertschöpfung des Produktes bewirken, aber aufgrund des ausgewählten Montageprinzips notwendig sind, zum Beispiel Transport- oder Handhabungsvorgänge. (LOTTER & WIENDAHL 2012)

2.3.2 Produktstruktur in der Montage

Ein Produkt ist eine Anordnung von *Einzelteilen*, die in Kontakt zueinander stehen und zusammen einen stabilen Körper bilden. Kontakte zwischen Einzelteilen reduzieren ihre Freiheitsgrade (HOMEM DE MELLO & LEE 1991). Einzelteile sind Elemente, die mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt wurden und deren Körper nur durch Zerstörung trennbar sind (LOTTER & WIENDAHL 2012).

Ein Produkt kann in unterschiedliche *Baugruppen* (engl.: Subassembly) gegliedert werden (JONES ET AL. 1998, LOTTER & WIENDAHL 2012). Eine *Baugruppe* ist eine nichtleere Teilmenge, die aus mindestens einem Einzelteil besteht bzw. aus mehreren Einzelteilen, die miteinander in Kontakt stehen. Bei der Bildung von Baugruppen ist zu beachten, dass diese stabil sind. Deren Handhabung kann daher wie die eines Einzelteils betrachtet werden. Im Folgenden werden daher unter dem Begriff Baugruppe Einzelteile wie auch aus Einzelteilen bestehende, stabile Baugruppen zusammengefasst. (vgl. HOMEM DE MELLO & LEE (1991), JONES ET AL. (1998))

Als *Basisbauteil* wird ein Start- oder Grundfügeteil bezeichnet, auf das andere Baugruppen aufgebaut werden, wie beispielsweise Gehäuse von Elektronikkomponenten. Es hat in der Regel die größte Ausdehnung sowie die meisten Fügestellen. Je nach Gestaltung des Basisbauteils kann dieses auch eine Weitergabe des Produktes von Station zu Station ohne zusätzliche Werkstückträger ermöglichen. (HESSE 2012, LOTTER & WIENDAHL 2012)

Eine *Montagereihenfolge* beschreibt eine Sequenz von Fügevorgängen. Eine Montagereihenfolge ist valide, wenn sämtliche Fügevorgänge zum Zusammenbau des Produktes aus Einzelteilen und Baugruppen geometrisch und mechanisch durchführbar und die Baugruppen selbst stabil sind (HOMEM DE MELLO & LEE 1991). Für den Fall, dass das Produkt ausschließlich aus steifen Bauteilen besteht und die Fügevorgänge reversibel sind, kann die Montagereihenfolge aus der Umkehrung einer Demontagereihenfolge gebildet werden (KAUFMANN ET AL. 1996). Bei einer Anzahl von n Bauteilen entspricht die Menge an nötigen Primärvorgängen $n-1$ (HOMEM DE MELLO & LEE 1991). Die Menge der theoretisch möglichen Montagereihenfolgen beträgt - ohne Berücksichtigung von Vormontagen - $(n)!$ und steigt somit fakultativ. Eine Berücksichtigung von Vormontagen erhöht die Menge an theoretisch möglichen Montagereihenfolgen zusätzlich. So beträgt die Anzahl

theoretisch möglicher Unterteilungen eines Produktes mit n Teilen in 2 Unterbaugruppen $2^{n-1}-1$ (THOMAS & WAHL 2010).

Im Folgenden werden für die Beschreibung von Montagereihenfolgen relevante Begriffe definiert. Als *Cluster* werden dabei jene Bauteile eines Produktes bezeichnet, die in einer beliebigen Reihenfolge, jedoch direkt nacheinander gefügt werden müssen, beispielsweise Schrauben zur Fixierung eines Deckels (JONES ET AL. 1998). Ein Fügevorgang ist *monoton*, wenn an dessen Ende alle Bauteile ihre finale Position einnehmen, also nicht zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal bewegt werden müssen (ROMNEY ET AL. 1995). Eine Montagereihenfolge ist *linear*, wenn bei jedem Fügevorgang stets nur ein Einzelteil zum Produkt hinzugefügt wird. Vormontagen werden bei linearen Montagereihenfolgen somit nicht berücksichtigt (ROMNEY ET AL. 1995). Ein Fügevorgang wird als *zweihändig* beschrieben, wenn bei dessen Durchführung genau zwei Baugruppen relativ zueinander bewegt werden (JONES ET AL. 1998). Als *Montagezustand* (engl.: state) wird der aktuelle Zustand einer Baugruppe beziehungsweise des zu montierenden Produktes definiert, der durch die Menge an bereits in ihrer gewünschten Endposition befindlichen Einzelteile beschrieben ist (JONES ET AL. 1998). Der finale Montagezustand entspricht dem vollständig montierten Produkt, dessen sämtliche Einzelteile sich an ihrer Endposition befinden (JIMÉNEZ 2013).

Die Montage einer Menge von Einzelteilen zu einer stabilen Baugruppe, die nicht das Endprodukt darstellt und zu einem späteren Zeitpunkt mit anderen Baugruppen zusammengebaut wird, wird in der Literatur als *Vormontage* bezeichnet. Ergebnis der Vormontage ist die *Vormontagebaugruppe* (LOTTER & WIENDAHL 2012). Die *Endmontage* ist die Zusammenführung der Vormontagebaugruppen sowie von Einzelteilen zum Endprodukt. Im Rahmen dieser Arbeit wird weiter festgelegt, dass Vormontagen nicht das Basisbauteil des Endproduktes enthalten dürfen. (HECHL 1995, FELDMANN ET AL. 2014)

Zusätzlich wird der Begriff der *Modul-Baugruppe* eingeführt. Diese wird als Menge an zusammenhängenden Einzelteilen definiert, deren Montagereihenfolge bis zu einem bestimmten Montagezustand des Produktes unabhängig von Einzelteilen ist, die nicht Teil der Modul-Baugruppe sind. Können zu einem Montagezeitpunkt mehrere Modul-Baugruppen montiert werden, können zwei Arten von Montagereihenfolgen voneinander unterschieden werden: Im Falle einer *parallelen* Montage werden Baugruppen zu unterschiedlichen Modul-Baugruppen hinzugefügt, während bei einer *sequentiellen* Montage erst nach der Fertigstellung einer Modul-Baugruppe weitere Montagevorgänge durchgeführt werden.

Die Strukturierung eines Produktes reduziert die Anzahl möglicher Montagereihenfolgen und kann diverse Ursachen haben. Zwischen den Baugruppen können

sich aus technischen und funktionalen Gründen Vorrangbeziehungen ergeben, die dem Konstrukteur bereits bei der Gestaltung des Produktes bekannt sind und die bei der Planung berücksichtigt werden sollen. Beispielsweise handelt es sich dabei um die Festlegung eines Basisbauteils oder um bestimmte Montagezustände, die aufgrund von Prüfprozessen erreicht werden sollen. Vormontagen können von externen Unternehmen geliefert werden, sodass die Planung der Reihenfolge der Montage ihrer Einzelteile nicht erfolgen muss. Eine Betrachtung sämtlicher valider Montagereihenfolgen ohne Berücksichtigung der Produktstruktur wird daher als nicht zielführend betrachtet. Folglich muss ein Planungssystem zur automatischen Arbeitsplanung die Strukturierung des Produktes ermöglichen, damit das Wissen des Konstrukteurs in die Planung einfließen kann.

2.3.3 Montagegerechte Produktgestaltung

Aufgrund der Auswirkungen der Produktgestalt auf die Montage wurden allgemeine Gestaltungsrichtlinien eingeführt, die unter den Bezeichnungen *montagegerechte Produktgestaltung* sowie *Design for Assembly* (DFA) zusammengefasst werden (BOOTHROYD ET AL. 2010, HESSE 2012). Ziel ist die Erhöhung der Montagefreundlichkeit durch Vereinfachung der Handhabungs- und Fügevorgänge sowie durch die Reduzierung der Produktkomplexität. Die Funktion und die Qualität des Produktes sollen dabei nicht beeinträchtigt werden. Beispielhaft seien einige Gestaltungsrichtlinien genannt (HESSE 2012, JONAS 2000, FELDMANN ET AL. 2014):

- Standardisierung durch Verwendung vereinheitlichter Einzelteile
- einfache Fügeoperationen (z. B. einheitliche und lineare Fügebewegungen)
- einfaches Handhaben, Bereitstellen und Zuführen der Baugruppen
- einheitliche Schnittstellen von Baugruppen
- definiertes Basisteil mit Auflage- und Spannflächen
- Baukastenprinzip, Nest- und Schichtbauweise

Die Gestaltungsregeln fokussieren die Gestalt des Produktes und dessen Baugruppen. Eine Berücksichtigung der expliziten Eigenschaften und Restriktionen eines bestehenden Montagesystems bzw. dessen Betriebsmittel, die zur Montage des Produktes verwendet werden sollen, findet nicht statt.

2.3.4 Ressourcen in der Montage

„Zur Erfüllung der Produktionsaufgaben werden (...) Ressourcen benötigt. Hierbei werden Personal, Betriebsmittel, Gebäude, Kapital und EDV unterschieden“ (EVERSHEIM 1996, S. 3). Im Folgenden werden die direkt an Montagevorgängen

beteiligten Ressourcen, nämlich die Betriebsmittel sowie das im Montagesystem arbeitende Personal, detaillierter betrachtet.

Im Umfeld der Montage werden unterschiedliche Begriffe, wie Betriebsmittel, Produktionsmittel oder Komponente, oft synonym verwendet (LOFERER 2001). CIRP (2011, S. 6) definiert den Begriff Betriebsmittel als „Gesamtheit der Anlagen, Geräte und Einrichtungen (...), die zur betrieblichen Leistungserfüllung dienen, ohne mit ihrer Substanz Eingang in die Erzeugnisse zu finden.“ Montagesysteme bestehen aus unterschiedlichen Ressourcen, die verschiedene Montagevorgänge durchführen können. In dieser Arbeit werden unter dem Begriff Betriebsmittel Geräte und Einrichtungen, die zur Durchführung der Montage eines Produktes notwendig sind, verstanden. In der manuellen Montage werden Montagevorgänge durch den Menschen durchgeführt, der dabei die im Montagesystem verfügbaren Betriebsmittel zur Hilfe nehmen kann (LOTTER & WIENDAHL 2012). Im Folgenden werden die Betriebsmittel sowie das Personal in einer Montagelinie unter dem Begriff *Ressourcen* zusammengefasst.

2.3.4.1 Schnittstellen zwischen Ressourcen

Die Ressourcen in einem Produktionssystem sind miteinander vernetzt und mittels unterschiedlicher Schnittstellen miteinander verbunden. Es existieren vielfältige Normen und Standards zur Beschreibung von Schnittstellen, etwa DIN EN 60130-9 für Steckverbindungen oder DIN EN 1092-1 für Flanschverbindungen. Im Kontext dieser Arbeit wird - ausgehend von einer Untersuchung unterschiedlicher Ressourcen in Montagesystemen sowie basierend auf repräsentativer Literatur (vgl. KERNSCHMIDT ET AL. (2014), VOGEL-HEUSER ET AL. (2014), KARL (2015)) - zwischen folgenden Arten von Schnittstellen differenziert:

Mechanische Schnittstellen stellen Kontakte zwischen den Ressourcen dar und ermöglichen eine Kraftübertragung zwischen diesen. Mechanische Schnittstellen sind oftmals Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit anderer Schnittstellenarten (z. B. fluidische Kontaktierung zweier Betriebsmittel).

Fluidische Schnittstellen erlauben die Übertragung von gasförmigen (pneumatische Schnittstellen) oder flüssigen Medien (hydraulische Schnittstellen). Sie werden zur Erfassung von Zuständen, zum Schalten von Arbeitselementen sowie zur Verrichtung von Arbeit verwendet (CROSER & EBEL 2003). Hydraulische Schnittstellen werden ebenfalls für Antriebs- und Steuerungsaufgaben eingesetzt. (WILL & GEBHARD 2011)

Informationstechnische Schnittstellen erlauben den Austausch von Daten und Informationen. Eine informationstechnische Schnittstelle kann mittels Kabelverbindungen oder kabellos (z. B. WLAN) hergestellt werden. Bei

Kabelverbindungen können die Betriebsmittel über eine Steckverbindung miteinander verbunden sein (vgl. z. B. DIN EN 60130-9). Eine informationstechnische und eine elektrische Schnittstelle sind oftmals miteinander verknüpft.

Elektrische Schnittstellen dienen zur Übertragung von elektrischer Energie. Dies kann ebenfalls über Kabel oder kabellos erfolgen. Die Vielfalt der Anwendungen entspricht der fluidischer Schnittstellen.

Schnittstellen können in *Ausgangs-* und *Eingangs-Schnittstellen* kategorisiert werden (MICHNIEWICZ & REINHART 2015). Eine Voraussetzung für die Durchführbarkeit eines Montagevorgangs ist oftmals die korrekte Verbindung der Eingangs-Schnittstellen einer Ressource an kompatible Ausgangs-Schnittstellen einer anderen Ressource. Ausgangs-Schnittstellen stellen das geforderte Medium zur Verfügung. Beispielsweise ist ein pneumatisch angetriebener Greifer auf eine externe Druckluftzufuhr angewiesen. Ein Industrieroboter ohne Verbindung zu einer Steuerung, die geeignete elektrische und informationstechnische Schnittstellen besitzt, ist nicht funktionsfähig. Ressourcen, die mittels einer kompatiblen Schnittstelle verbundene sind (z. B. Roboter mit Greifer, Mensch mit Werkzeug, Werkzeug mit Steuerung), werden im Folgenden als *kombinierte Ressourcen* bezeichnet.

Des Weiteren können durch die Verbindung von Ressourcen an ihren Schnittstellen komplexere Montagefunktionen entstehen, die über die Funktionalität der individuellen Ressourcen hinausgehen. Beispielhaft sei ein Industrieroboter genannt, der an seinem Flansch mit einem Greifer verbunden ist. Diese kombinierte Ressource kann Baugruppen sichern und bewegen und somit folglich auch handhaben.

2.3.4.2 Funktionale Kategorisierung von Ressourcen

Die Funktionen, welche die Ressourcen durchführen können, bilden die Grundlage ihrer Kategorisierung. Mögliche Gliederungen sind z. B. in der VDI-RICHTLINIE 2860 oder SCHMIDT (1992) zu finden. Die Einordnung dieser Bestandteile in dieser Arbeit lehnt sich an SCHMIDT (1992), LOFERER (2001) und BACKHAUS (2016) an und erweitert diese um den Menschen in der Montage (vgl. Abb. 3).

Bewegungseinrichtungen werden nach VDI-RICHTLINIE 2860 als technische Einrichtungen definiert, die Bewegungsfunktionen durchführen können. Sie dienen dem Bewegen von Baugruppen und Werkzeugen. Beispiele hierfür sind Einlegegeräte, deren Bewegungen nicht ohne mechanischen Eingriff verändert werden können, und Industrieroboter. Zusätzlich wird im Rahmen dieser Arbeit der Mensch den Bewegungseinrichtungen zugeordnet, da er ebenfalls in der Lage ist, Baugruppen und Werkzeuge wie Endeffektoren manuell zu bewegen.

Industrieroboter werden definiert als „universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind“ (VDI-RICHTLINIE 2860, S. 15). Die Aufgabe eines Industrieroboters ist das geeignete Führen eines Endeffektors, der mit der Umgebung in Kontakt tritt, wie z. B. einer Fügeeinheit. Ein Industrieroboter besteht aus einer Aneinanderreihung von Armteilen, die durch Achsen miteinander verbunden sind. Am letzten Armteil befindet sich ein Flansch, an dem Endeffektoren montiert werden können. Ein charakteristischer Punkt am Flansch (in der Regel dessen Mittelpunkt) bzw. am montierten Endeffektor ist der Tool Center Point (TCP). Die Lage des TCP im Raum (Position und Orientierung) wird Pose genannt (DIN EN ISO 8373). Sämtliche Positionen, die durch den TCP erreicht werden können, werden als Arbeitsraum zusammengefasst. Aufgrund ihrer kinematischen Freiheitsgrade, der Vielzahl an möglichen Endeffektoren, Sensoren und Peripheriegeräten besitzen Industrieroboter eine hohe inhärente Flexibilität (MICHNIEWICZ & REINHART 2014). (WEBER 2009, FELDMANN ET AL. 2014)

Das mechanische System des menschlichen Körpers, das Skelett- und Muskelsystem, kann ähnlich wie ein Roboter als Mehrkörpersystem mit kinematischen Freiheitsgraden modelliert werden (BIRYUKOVA ET AL. 2000, MIROSLAW 2016). Der Arbeitsraum, in dem Gegenstände mit der Hand gegriffen und bewegt werden können, wird als Greifraum bezeichnet. Er kann als Halbkugel vereinfacht werden und ist abhängig von den individuellen Körpermaßen (BULLINGER 1994, LOTTER & WIENDAHL 2012). Im Rahmen dieser Arbeit wird der gesamte menschliche Körper, mit Ausnahme der Hände, der Kategorie der Bewegungseinrichtungen zugeordnet.

Bewegungseinrichtungen	Fügeeinheiten	Sensoren	Steuerungen	Bereitstellungssysteme	Verkettungsmittel	Strukturelemente
 Roboter	 Greifer	 Lichtschranke	 Robotersteuerung	 Beladene Platten	 Förderband	 Montagetisch
 Mensch	 Schraubwerkzeug	 Kamera	 Schraubsteuerung	 Magazin	 Werkstückträger	 Umhausung Roboterzelle
	 Hand					

Abbildung 3: Ausgewählte Ressourcen von Montagesystemen in Anlehnung an SCHMIDT (1992), LOFERER (2001) und BACKHAUS (2016).

Fügeeinheiten sichern die zu fügenden Baugruppen und stehen in direktem Kontakt mit diesen. Die menschliche Hand wird im Rahmen dieser Arbeit als manuelle Fügeeinheit definiert. Fügeeinheiten werden von Bewegungseinrichtungen geführt,

mit denen sie mechanisch über einen Flansch bzw. über die Hand eines Menschen in Verbindung stehen. Die menschliche Hand ist über das Handgelenk mit der manuellen Bewegungseinrichtung des menschlichen Körpers verbunden. Die kombinierte Ressource aus Füge- und Bewegungseinheit ermöglicht die Handhabung und das Fügen von Baugruppen. Neben der Befestigung kann ein Flansch über weitere Anschlüsse für zusätzliche Schnittstellen (z. B. fluidisch, elektrisch) verfügen, die eine Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der Fügeeinheit sein können. Falls eine Fügeeinheit nicht dauerhaft mit einer automatischen Bewegungseinrichtung verbunden sein soll, kann im Flansch ein Wechselmodul umgesetzt sein (FELDMANN ET AL. 2014). Beispiele für Fügeeinheiten sind Greifer und Schraubwerkzeuge. Aufgrund der Häufigkeit von Füge- und Schraubvorgängen in der industriellen Montage sollen diese detaillierter betrachtet werden.

Als Greifen wird der Vorgang des form- oder kraftschlüssigen Fixierens eines Objektes bezeichnet. Wesentliche Funktionsträger eines Greifers sind dessen Flansch, das Gehäuse sowie das Haltesystem. Der Flansch stellt die Schnittstelle zwischen Greifer und Bewegungseinrichtung dar. Das Gehäuse bildet den Grundkörper des Greifers und beinhaltet dessen Antrieb sowie dessen Kinematik. Das Haltesystem berührt das Werkstück und leitet die Greifkraft in die zu fixierende Baugruppe. Greifer können je nach ihrem Funktionsprinzip in mechanische, pneumatische, hydraulische, elektrische und adhäsive Greifer unterteilt werden. (FELDMANN ET AL. 2014)

Zunächst sollen die geläufigsten Greifertypen, mechanische und pneumatische Greifer, betrachtet werden. Bei mechanischen Greifern wird das Bauteil durch die Bewegung der Elemente des Haltesystems, auch Finger genannt, fixiert und gelöst. Die menschliche Hand fällt ebenfalls in die Kategorie des mechanischen Greifens. Die Energie für die Bewegung der Finger wird z. B. durch Druckluft oder elektrische Energie bzw. durch Muskelkraft zur Verfügung gestellt. Die menschliche Hand kann aufgrund ihrer kinematischen Freiheitsgrade sowie aufgrund der taktilen Sensibilität als flexibler, präziser Greifer betrachtet werden (LYNETTE & LEDERMANN 2006). Pneumatische Greifer, auch Sauggreifer genannt, erzeugen die Haltekraft durch Bilden eines Vakuums zwischen dem Werkstück und dem Halteelement (BARTENSCHLAGER ET AL. 1998).

Schrauben ist ein elementares Fertigungsverfahren, das durch die DIN 8593 der Hauptgruppe des „Fügens“ sowie der Untergruppe „An- und Einpressen“ zugeordnet wird. Schraubwerkzeuge stehen im direkten Kontakt mit der zu montierenden Schraube. Sie können von Menschen oder von Handhabungseinrichtungen geführt werden. Je nach Art des Antriebs des Schraubwerkzeuges wird eine geeignete Steuerung vorausgesetzt, um die Funktionsfähigkeit sicherzustellen. Zur Erhöhung

des Automatisierungsgrades können Schrauben durch einen Vibrationswendelförderer geordnet bereitgestellt und mittels Druckluft durch einen Schlauch dem Schraubwerkzeug zugeführt werden. (WIEGAND ET AL. 2007, FELDMANN ET AL. 2014)

Sensoren werden nach SCHAUMBURG (1992) als primäre Elemente in einer Messkette definiert, die eine variable Eingangsgröße in ein geeignetes Messsignal umsetzen. Sensoren werden in der Montagetechnik u. a. für die Überwachung und Regelung von Montagevorgängen, zur Kollisionsüberwachung oder zur Qualitätsprüfung eingesetzt (SECKNER 2008). Sensoren können hinsichtlich ihrer Messprinzipien und des gelieferten Informationsgehaltes klassifiziert werden.

Die Aufgabe von *Steuerungen* wie Roboter-, Schraub oder Prozesssteuerungen, ist die Koordination der Betriebsmittel in einem Montagesystem ausgehend vom programmierten Montagevorgang (LOFERER 2001). Die Koordination erfolgt über Ein- und Ausgänge der Steuerungen, die gelesen und beschrieben werden können (KRÜGER ET AL. 2017). Steuerungen sind physisch nicht direkt am Montagevorgang beteiligt (SECKNER 2008, S. 50). Voraussetzung für die Funktionserfüllung der Steuerungen ist deren Kompatibilität mit den verbundenen Betriebsmitteln.

Bereitstellungssysteme wie Magazine, Flachpaletten und Vibrationswendelförderer stellen einzelne Bauteile oder Baugruppen für den Montagevorgang zur Verfügung (LOFERER 2001). Die Art der Bereitstellung hat direkten Einfluss auf die Eignung der Handhabungsgeräte und Endeffektoren (FELDMANN ET AL. 2014). Bereitstellungssysteme müssen an die physikalischen Merkmale der Baugruppen angepasst werden (LOTTER & WIENDAHL 2012).

Verkettungsmittel sind für den Materialfluss zwischen Montagestationen innerhalb eines Montagesystems verantwortlich. Dazu zählen *Fördermittel* wie Band- oder Gurtförderer. Zur Erleichterung des Transports von Baugruppen können zusätzlich *Förderhilfsmittel* wie Werkstückträger eingesetzt werden. Diese bilden eine Plattform für die Montagevorgänge und müssen an die zu transportierende Baugruppe angepasst werden. Positioniervorrichtungen wie Stopper ermöglichen das Anhalten und Positionieren des Produktes bzw. des Förderhilfsmittels auf dem Fördermittel, um eine unbeeinflusste und präzise Durchführung der Montagevorgänge zu erlauben. (SECKNER 2008)

Eine Voraussetzung für den Aufbau von funktionsfähigen Montagesystemen sind *Strukturelemente* wie Montagetische, Gestelle und Platten, die die stabile Anbringung bzw. das Ablegen der Ressourcen ermöglichen. Statische Sicherheitseinrichtungen von Robotersystemen wie Zäune oder Umhausungen werden im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls den Strukturelementen zugeordnet. Strukturelemente definieren

maßgeblich die räumliche Ausdehnung eines Montagesystems. (LOTTER & WIENDAHL 2012, FELDMANN ET AL. 2014)

2.3.5 Hierarchische Struktur von Montagesystemen

Für Anlagen in der Montage gibt es unterschiedliche hierarchische Betrachtungsebenen. Einrichtungen, die zur Durchführung von Montageaufgaben dienen, werden übergeordnet *Montageanlagen* oder synonym *Montagesysteme* genannt (JONAS 2000). Ein Montagesystem ist die Anordnung mehrerer Montagestationen, die lose oder starr miteinander verkettet sind (CIRP 2011). Es kann zwischen manuellen, automatischen und flexibel automatisierbaren Montagesystemen unterschieden werden (HESSE 2012).

Als *Montagestation* wird die kleinste Einheit eines Montagesystems verstanden, die aus Ressourcen bzw. kombinierten Ressourcen aufgebaut ist, die zur Durchführung mindestens eines Montagevorgangs des Zusammensetzens von Baugruppen geeignet sind (CIRP 2011). Manuelle Arbeitsplätze, an denen Werker manuell bzw. unter Zuhilfenahme von Betriebsmitteln Montagevorgänge durchführen, werden den Montagestationen zugeordnet. Als *Konfiguration* wird nach CIRP (2011) das physikalische Layout eines Arbeitsplatzes bzw. einer Station, also die Auswahl und Platzierung der Ressourcen, bezeichnet.

Im Rahmen dieser Arbeit werden in Anlehnung an LOFERER (2001) und KONOLD & REGER (2003) folgende Ressourcen-Arten als notwendige Teile einer für Primärvorgänge geeigneten Station definiert, da sie Voraussetzung für die Durchführbarkeit von Vorgängen wie z. B. Zusammensetzen und Schrauben sind: Bereitstellungs- und Bewegungseinrichtungen, Fügeeinheiten, Steuerungen (für automatische bzw. automatisierte Stationen), Verkettungsmittel sowie Strukturelemente.

Diese Betrachtung kann für manuelle und automatische Zusammensetz- und Schraubstationen weiter detailliert werden. Fügevorgänge erfordern die *Kooperation* von Ressourcen, da im Sinne eines zueinander bewegten Vorgangs beide zu fügenden Baugruppen fixiert und relativ zueinander bewegt werden müssen (JONES ET AL. 1998). Dies ist ebenfalls bei Handhabungsvorgängen der Fall, bei denen eine Baugruppe von einer Ressource an eine andere übergeben wird. (FELDMANN ET AL. 2014)

Der Weg zwischen zwei Stationen eines Produktionssystems, auf dem Produkte bewegt werden, wird *Transportweg* genannt (CIRP 2011). Die Handhabung eines Produktes zwischen zwei Stationen wird im Rahmen dieser Arbeit als *Transportvorgang* bezeichnet. In einer *Montagelinie* werden Montagestationen nach dem Prinzip der Fließmontage (HUCK 1992) nacheinander von einem zu montierenden Produkt bis zu dessen Fertigstellung durchlaufen (CIRP 2011). Die Station, an der

die Bereitstellung des Basisbauteils bzw. des Werkstückträgers erfolgt, wird im Folgenden *Eingangs-Station* genannt. Im Falle eines Montagesystems mit mehreren Nebenlinien existieren mehrere Eingangs-Stationen. Die letzte Station eines Montagesystems, an der die Abnahme des fertigen Produktes bzw. der Baugruppe erfolgt, bildet den Ausgang der Linie und wird in dieser Arbeit *Ausgangs-Station* genannt. Montagelinien sind insbesondere in der Massenfertigung standardisierter Produkte weit verbreitet (BECKER & SCHOLL 2006, LOTTER & WIENDAHL 2012).

Die Bestimmung der Eigenschaften des gesamten Produktionssystems kann nicht durch eine isolierte Betrachtung der Eigenschaften, des Verhaltens und der Fähigkeiten einzelner Stationen bzw. Ressourcen erfolgen. Stattdessen ist eine Synthese der gegenseitigen ebenenübergreifenden Beeinflussung der Elemente notwendig (UEDA ET AL. 2001).

2.3.6 Abgeleitete Anforderungen

In Abschnitt 2.3 wurden relevante Aspekte im Hinblick auf die Funktionen in der Montage, die Struktur von Produkten und Montagesystemen sowie die montagegerechte Produktgestaltung vorgestellt. Im Rahmen der Arbeit wird von montagegerecht konstruierten Produkten ausgegangen, die zumindest eine valide Montagereihenfolge aufweisen. Eine Generierung von Handlungsempfehlungen bezüglich der Produktgestalt ohne Berücksichtigung des bestehenden Montagesystems ist nicht Teil der Betrachtung. Im Folgenden werden die daraus resultierenden Anforderungen an ein Planungssystem zur automatisierten Arbeitsplanung definiert:

- Betrachtung primärer und sekundärer Montagevorgänge
- Berücksichtigung der Struktur des Produktes (z. B. Vormontagen, Cluster, Modul-Baugruppen) und der daraus resultierenden Einschränkungen bezüglich der Montagereihenfolgen
- Möglichkeit der Strukturierung des Produktes durch den Nutzer zur Einbindung seines Wissens bei der Arbeitsplanung
- Berücksichtigung der Struktur von Montagesystemen mitsamt unterschiedlich konfigurierter, miteinander verketteter Stationen mit individuellen Ressourcen sowie kombinierten Ressourcen und den sich daraus ergebenden Funktionen.

2.4 Veränderungsfähigkeit im Kontext der Montage

Der Begriff *Veränderungsfähigkeit* wird in der Literatur auf unterschiedliche Weise definiert und gilt im Allgemeinen als die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich

wirtschaftlich an externe Störgrößen wie verändernde Technologien, Produktlebenszyklen, Umwelt, Politik, Gesellschaft oder Ökonomie anzupassen (WIENDAHL 2002). Eine Vielzahl von Ansätzen - wie Flexible Manufacturing Systems (FMS) und Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS) - hat die Steigerung der Veränderungsfähigkeit von Produktionssystemen zum Ziel (ELMARAGHY 2006, WIENDAHL ET AL. 2007). Die Veränderungsfähigkeit von Produktionssystemen ermöglicht aufwandsarme Anpassungen an veränderte Rahmenbedingungen, stellt aber aufgrund des potentiell enormen Lösungsraumes möglicher Veränderungen den Planer bei der Auswahl einer bestmöglichen Lösung vor erhebliche Herausforderungen (WIENDAHL ET AL. 2007).

2.4.1 Ebenen und Klassen der Veränderungsfähigkeit

ELMARAGHY (2009) ordnet die Hierarchie von Veränderungsfähigkeit, Produktion und Produkt in sechs Betrachtungsebenen, vgl. Abb. 4. Die fünf Klassen der Veränderungsfähigkeit werden im Folgenden definiert:

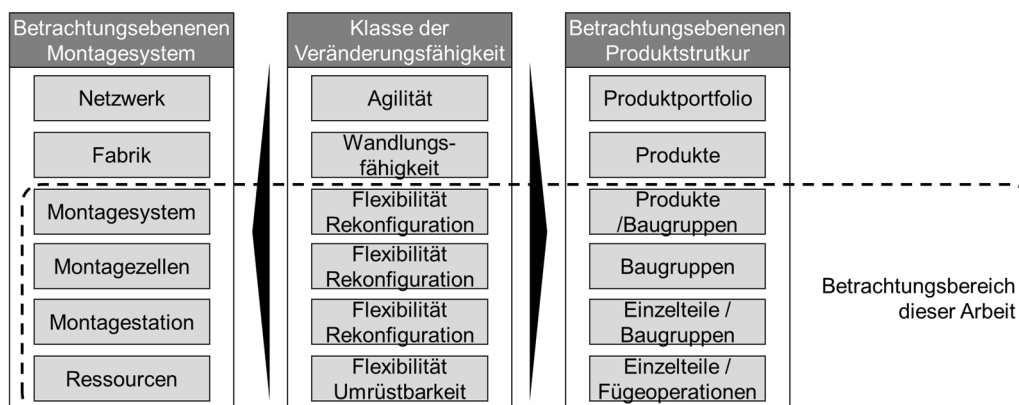


Abbildung 4: Klassen der Veränderungsfähigkeit mit dazugehörigen Betrachtungsebenen des Montagesystems und der Produktstruktur in Anlehnung an WIENDAHL (2002) und ELMARAGHY (2009).

Umrüstbarkeit ist die Fähigkeit einer Arbeitsstation, aufwands- und verzögerungsarm spezifische Montageoperationen an bekannten Bauteilen bzw. Baugruppen durchzuführen. (ELMARAGHY 2009)

Flexibilität ist definiert als die operative Anpassungsfähigkeit einer Station oder eines Montagesystems innerhalb vordefinierter Grenzen, wobei auf physische Änderungen verzichtet wird. Im Rahmen dieser Arbeit werden Anpassungen des Steuerungscode von Ressourcen, Umleitungen der Materialflüsse sowie Änderungen am Arbeitsplan, die nach ELMARAGHY (2006) *weiche Rekonfigurationen* genannt werden, ebenfalls der Flexibilität zugeordnet. Die in einem Montagesystem anzutreffenden Arten von Flexibilität werden im folgenden Abschnitt 2.4.2 genauer erläutert.

Rekonfigurierbarkeit ist die Möglichkeit, mit geringem Aufwand und in kurzer Zeit ein Produktionssystem an veränderte Anforderungen durch physische Änderungen der Produktionsprozesse, der Materialflüsse sowie durch das Hinzufügen und Entfernen von Ressourcen anzupassen (WIENDAHL 2002). Diese Vorgänge werden nach ELMARAGHY (2006) der Kategorie der *physischen Rekonfiguration* zugeordnet. Im Folgenden wird zwischen *manuellen* und *automatischen physischen Rekonfigurationen* unterschieden. Manuelle Rekonfigurationen erfordern menschliches Eingreifen zur Anpassung des Produktionssystems, während automatische Rekonfigurationen ohne menschlichen Eingriff ablaufen, etwa im Falle von automatischen Werkzeugwechselsystemen (FELDMANN ET AL. 2014).

Wandlungsfähigkeit beschreibt die taktische Fähigkeit der Anpassung an eine neue Produktgruppe oder -familie auf der Betrachtungsebene der Fabrikstruktur. Dies beinhaltet Änderungen bezüglich des gesamten Montagesystems, der Organisation, des Personals und der Infrastruktur. (WIENDAHL ET AL. 2007, ELMARAGHY 2009)

Agilität ist die Fähigkeit eines Unternehmens zur strategischen Anpassung an neue Marktanforderungen, beispielsweise durch die Eröffnung neuer Märkte oder durch die Erweiterung des Produktportfolios. (ELMARAGHY 2009)

Bezugnehmend auf die Zielsetzung dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 1.2) und die in Abb. 4 dargestellte Gliederung einer Fabrik beschränkt sich der Betrachtungsbereich auf die unteren vier Ebenen und auf die Nutzung der dort vorherrschenden Veränderungsmöglichkeiten in Form von Umrüstbarkeit, Flexibilität und Rekonfiguration.

2.4.2 Arten der Flexibilität

Montagesysteme besitzen unterschiedliche Arten der Flexibilität. Maschinen-, Handhabungs- und Operationsflexibilität werden als Grundflexibilitäten bezeichnet und beziehen sich auf Systemkomponenten in einem Produktionssystem. Sie bilden die Voraussetzung für aus ihnen resultierenden komplexeren Flexibilitätsarten: die Systemflexibilität und die daraus resultierende aggregierte Flexibilität, die ein Produktionssystem in seiner Gesamtheit beschreiben. Die Grundflexibilitäten werden im Folgenden im Kontext der Montage definiert. (SETHI & SETHI 1990)

Maschinenflexibilität beschreibt die Fähigkeit einer Ressource, ohne großen Aufwand unterschiedliche Vorgänge durchzuführen.

Handhabungsflexibilität ist die Fähigkeit einer Ressource, unterschiedliche Baugruppen effizient zu handhaben. Dazu gehören neben Handhabungs- auch Zuführungs- und Transportvorgänge.

Operationsflexibilität beschreibt die Möglichkeit, dass eine Baugruppe auf unterschiedliche Arten produziert werden kann. In der Montage beinhaltet dies unterschiedliche valide Montagevorgänge und -reihenfolgen zur Erzeugung derselben Baugruppe.

2.4.3 Abgeleitete Anforderungen

Die Anforderungen an das Planungssystem zur automatisierten Arbeitsplanung werden im Hinblick auf die Veränderungsfähigkeit wie folgt zusammengefasst:

- Die Veränderungsfähigkeit, zusammengesetzt aus Umrüstbarkeit, Flexibilität in Form der Grundflexibilitäten und Rekonfigurierbarkeit von Ressourcen in Stationen, soll durch das Planungssystem berücksichtigt werden.

2.5 Konstruktion und Arbeitsplanung

Der folgende Abschnitt beschreibt die Aufgaben und Planungsschritte in der Konstruktion und Arbeitsplanung. Aufgrund ihrer Bedeutung für das weitere Vorgehen steht hierbei die Montage im Mittelpunkt. Planungsschritte für den Bereich der Fertigung werden nicht im Detail betrachtet.

2.5.1 Begriffsdefinitionen

Hauptaufgabe der *Konstruktion*, die als Teil der *Produktentwicklung* betrachtet wird, ist die funktionale Gestaltung von Einzelteilen, Baugruppen und Produkten zur Erfüllung der vom Kunden geforderten Funktionen (EVERSHEIM 1998, S. 4-6). Dabei müssen gegebene technische und ökonomische Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Eine Aufgabe der Konstruktion besteht in der Festlegung der Gestalt, Dimension, Anordnung, Art und Anzahl der Einzelteile des Produktes. Die Tätigkeit des Konstruierens umfasst das vormaterielle Zusammensetzen der einzelnen Bauteile und der Funktionen zur Sicherstellung der Montierbarkeit (VDI-RICHTLINIE 2221, S. 40). Eine montagegerechte Gestaltung erhöht dabei die Effizienz der Montage. (EVERSHEIM 1998, VDI-RICHTLINIE 2221)

Die Ergebnisse der Konstruktion werden im Folgenden zusammengefasst. Stücklisten sind ein formalisiertes Verzeichnis, das alle in einem Produkt enthaltenen Elemente enthält (WIENDAHL 2010). Einzelteilzeichnungen beinhalten die Teilegeometrie sowie alle zur Fertigung nötigen technologischen Angaben. Zusammensetzungszeichnungen beschreiben die räumliche Lage der Einzelteile im fertigen Produkt zueinander, mitsamt der Informationen zu den Montagevorgängen

(EVERSHEIM 1998). Die Ergebnisse der Konstruktion werden gegenwärtig üblicherweise digital erzeugt und gespeichert (VAJNA ET AL. 2009).

Der Begriff *Arbeitsvorbereitung* umfasst alle Tätigkeiten zwischen *Konstruktion* und *Fertigung und Montage*, die zur Vorbereitung der Fertigung und Montage von Erzeugnissen notwendig sind, vgl. Abb. 5.

Die Arbeitsvorbereitung gliedert sich in zwei aufeinanderfolgende Teilbereiche, die *Arbeitsplanung* und die *Arbeitssteuerung*. Ziel ist der Aufbau und Betrieb einer Produktion, die eine zeit-, kosten und qualitätsoptimale Herstellung ermöglicht. Die *Arbeitsplanung* umfasst dabei alle einmalig durchzuführenden Planungsmaßnahmen zur wirtschaftlichen Herstellung eines Erzeugnisses. Die Arbeitsplanung gliedert sich in zwei Planungsphasen, in die *Arbeitsablaufplanung* sowie in die *Arbeitssystemplanung*. (EVERSHEIM 2002)

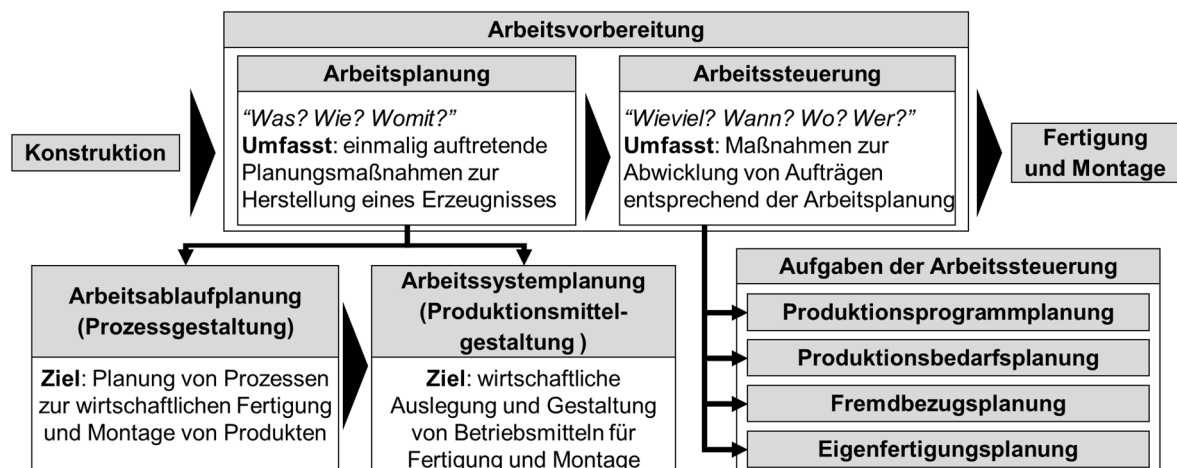


Abbildung 5: Einordnung der Konstruktion und der Arbeitsplanung in Anlehnung an EVERSHEIM (2002).

Die *Arbeitsablaufplanung* fokussiert die Prozessgestaltung, also die Planung von technischen Prozessen zur wirtschaftlichen Fertigung und Montage von Produkten. Die Arbeitsablaufplanung erfolgt in Bezug auf ein konkretes Produkt bzw. einen konkreten Auftrag und weist einen kurz- bis mittelfristigen Charakter auf. Sie erfolgt ausgehend von den Produktbeschreibungen aus der Konstruktion heraus. Die Arbeitsablaufplanung muss bei der Einführung eines neuen Produktes bzw. einer neuen Variante durchlaufen werden. Ihr Arbeitsumfang ist abhängig vom Neuheitsgrad des Produktes. Dabei wird zwischen Neu-, Anpassungs-, Varianten- und Wiederholplanung unterschieden. (EVERSHEIM 2002)

Die *Arbeitssystemplanung* hat die wirtschaftliche Auslegung, Gestaltung und Anordnung der Betriebsmittel und Anlagen für die Fertigung und Montage zum Ziel. Die Arbeitssystemplanung hat im Vergleich zur Arbeitsablaufplanung einen

langfristigen und produktionsprogrammbezogenen Charakter. Die Arbeitssystemplanung erfolgt nur, wenn das bestehende Produktionssystem bzw. die verfügbaren Betriebsmittel aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht für die Fertigung und Montage geeignet sind. Dies wird während der Arbeitsablaufplanung festgestellt. (EVERSHEIM 2002)

An dieser Stelle sei auf die Komplexität der Arbeitsablaufplanung im Falle von Varianten- und Anpassungsplanungen hingewiesen. Insbesondere Änderungen hinsichtlich der Geometrie und der Struktur eines Produktes können den Planer vor große Herausforderungen stellen, da die Änderungen nicht nur Stationen und Ressourcen betreffen, die direkt am Montagevorgang der veränderten Baugruppen beteiligt sind (KAMRANI & NASR 2010). So können sich etwa nachgelagerte Montagevorgänge an anderen Stationen aufgrund der veränderten Geometrie mit den verfügbaren Ressourcen als nicht mehr kollisionsfrei durchführbar erweisen. Daher ist im Falle von geometrischen und strukturellen Änderungen eine Absicherung sämtlicher zur Fertigstellung des Produktes geforderter Montagevorgänge vorzunehmen.

Zusätzlich werden abhängig von der Art der Auftragsauslösung zwei Typen der Konstruktion und Arbeitsvorbereitung differenziert: die kundenspezifische Auftragsabwicklung wegen einer konkreten Kundenanfrage sowie die kundenanonyme Produktentwicklung aufgrund von Marktindikatoren. Im Falle der kundenspezifischen Auftragsabwicklung soll die Durchlaufzeit des Auftrages, bei einer Neuentwicklung die Zeit bis zum Markteintritt (engl.: time-to-market) verkürzt werden. Folglich ist eine Minimierung der Dauer der Konstruktion und Arbeitsvorbereitung erwünscht. Des Weiteren sollte zur Minimierung der Investitionskosten die Weiterverwendung der bestehenden Fertigungsmittel angestrebt werden. (EVERSHEIM 2002)

Die *Arbeitssteuerung* erfolgt zeitlich nach der Arbeitsplanung und dient der Abwicklung der Aufträge, ausgehend vom zuvor erstellten Arbeitsplan. Sie ist somit nicht Teil der Entwicklung des Produktes bzw. der Anlage (EVERSHEIM 2002). In der *Fertigung und Montage* wird schließlich, ausgehend von den in den vorgelagerten Bereichen entstandenen Ergebnissen und Vorgaben, das Produkt hergestellt.

Angesichts einer steigenden Variantenvielfalt, sinkender Losgrößen und zunehmend dynamischer Lebenszyklen müssen Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und folglich auch die Abstimmung zwischen den Phasen immer häufiger erfolgen. Eine intensive und oft auftretende Zusammenarbeit ergibt sich zwischen der Konstruktion und der Arbeitsablaufplanung, weil die technischen und geometrischen Produkteigenschaften in derer beider Fokus stehen. Ziel ist die Gestaltung vom Produkt, den Montagevorgängen und dem Montagesystem zur Sicherstellung der

Wirtschaftlichkeit der Montage. Dies erfolgt durch iterative Absprachen und Anpassungen zwischen den Phasen. Festgestellte notwendige Änderungen am Montagesystem werden entsprechend an die Arbeitssystemplanung weitergeleitet. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Arbeitsablaufplanung unter Berücksichtigung der Schnittstellen zu den vor- und nachgelagerten Planungsphasen Konstruktion, Arbeitssystemplanung und Arbeitssteuerung. Die Tätigkeiten und Ergebnisse der Arbeitsablaufplanung werden im Folgenden detailliert ausgeführt.

2.5.2 Tätigkeiten und Ergebnisse der Arbeitsablaufplanung

Die Arbeitsablaufplanung gliedert sich nach EVERSHEIM (2002) in vier Stränge: die *Planung von Fertigung und Montage*, die *Kostenplanung und Kalkulation*, die *Fertigungs- und Prüfmittelplanung* sowie die *Prüfplanung*, vgl. Abb. 6.

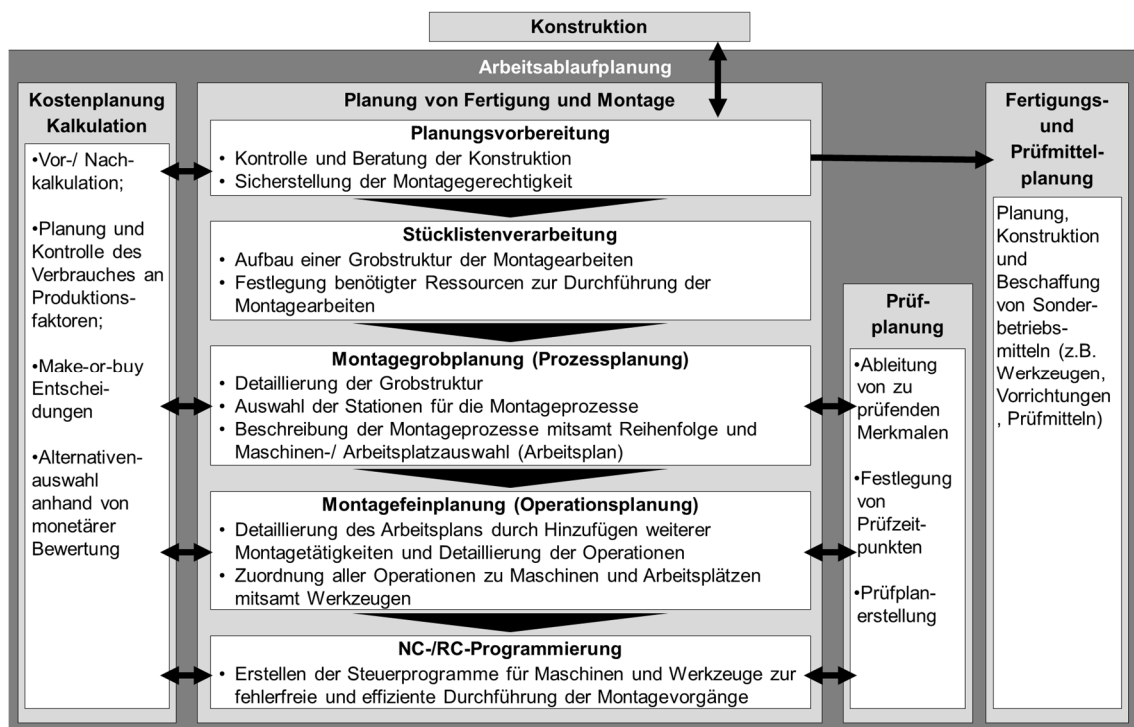


Abbildung 6: Zeitlicher Ablauf der Tätigkeiten in der Arbeitsablaufplanung mitsamt der Aufgabenbeschreibung in Anlehnung an EVERSHEIM (2002).

Der Hauptstrang, die *Planung von Fertigung und Montage*, im Folgenden *Planung der Montage* genannt, gliedert sich in fünf Teilschritte: Planungsvorbereitung, Stücklistenverarbeitung, Montagegrobplanung, Montagefeinplanung sowie NC/RC-Programmierung.

Im ersten Schritt, der *Planungsvorbereitung*, werden die Ergebnisse der Konstruktion kontrolliert. Des Weiteren kann eine Beratung der Konstruktion erfolgen, um

Produktänderungen oder Veränderungen am Montagesystem zu einem späteren Zeitpunkt zu vermeiden. Ziel ist die Sicherstellung der montagegerechten Gestaltung des Produktes. Im darauffolgenden Schritt erfolgt die *Stücklistenverarbeitung*. Dabei werden aus den Konstruktionszeichnungen Montagestücklisten erstellt. Ziel ist hierbei der Aufbau einer Grobstruktur der Montageoperationen sowie eine erste Festlegung benötigter Betriebsmittel an den Montagestationen. Im Nachgang erfolgt die *Montagegrobplanung*, welche die notwendigen Montagevorgänge beschreibt, ihre Reihenfolge festlegt und die geeigneten Ressourcen und Stationen auswählt.

Die *Montagefeinplanung* detailliert die Beschreibung der Montagevorgänge aus der Montagegrobplanung. Die durchzuführenden Operationen werden vollständig beschrieben sowie Spannlagen und Greifpunkte für die Bauteile und Baugruppen festgelegt. Weitere notwendige Montagetätigkeiten, wie Handhabungsvorgänge und Qualitätsprüfungen, werden dem Montageplan hinzugefügt. Ziel der Montagefeinplanung ist die Zuordnung aller erforderlichen Montagevorgänge zu Stationen mitsamt geeigneter Ressourcen. Notwendige Rekonfigurationen der Stationen des Produktionssystems werden bestimmt. Im letzten Schritt der Stranges Planung der Montage erfolgt die *Erstellung des Steuerungscode*s für die zuvor ausgewählten Stationen und Betriebsmittel.

Parallel zur Planung der Montage erfolgt phasenübergreifend die *Kostenplanung und Kalkulation*. Durch entsprechende Vor- und Nachkalkulationen bei den Schritten der Planung der Montage erfolgt die Kontrolle der Einhaltung der wirtschaftlichen Vorgaben. Ziel der Kostenplanung und Kalkulation ist die Auswahl von Alternativen anhand einer monetären Bewertung.

Die *Fertigungs- und Prüfmittelplanung* erfolgt ebenfalls parallel zu der Planung von Fertigung und Montage und wird im Folgenden *Betriebsmittelplanung* genannt. Ziel ist hierbei die rechtzeitige auftrags- und produktbezogene Planung, Konstruktion oder Beschaffung von Betriebsmitteln (EVERSHEIM 2002). Der Fokus liegt auf den Betriebsmitteln, die im direkten Kontakt mit dem Produkt stehen und zudem einfach rekonfigurierbar sind, wie Fügeeinrichtungen, Bereitstellungsvorrichtungen oder Werkstückträger. Neu konstruierte oder beschaffte Betriebsmittel müssen der Arbeitsablaufplanung rechtzeitig bekannt sein, damit diese bei der Erstellung des Arbeitsplans berücksichtigt werden können. Im Gegensatz zur Betriebsmittelplanung umfasst die Arbeitssystemplanung übergeordnete Aspekte der Wandlungsfähigkeit wie z. B. die Stationsanzahl und die Verkettung der Stationen mit Fördermitteln. Die Arbeitssystemplanung wird von der Arbeitsablaufplanung in den Planungsprozess eingebunden, wenn umfangreichere Änderungen am Montagesystem nötig sind.

Ab dem Zeitpunkt der Montagegrobplanung beginnt zusätzlich ein weiterer Strang der Arbeitsablaufplanung – die *Prüfplanung*. Sie hat die Ableitung von zu prüfenden

Merkmale sowie die Festlegung von Prüfzeitpunkten zum Ziel. Diese sind Bestandteil des Arbeitsplans.

Der Arbeitsplan enthält somit Informationen über das zu montierende Produkt mitsamt Montagezuständen und den zu montierenden Baugruppen an der jeweiligen Station sowie der Reihenfolge der Vorgänge inklusive der Vorgabezeiten. Der Arbeitsplan dient als Grundlage für die nachgelagerte Arbeitssteuerung. Eine Freigabe des Arbeitsplans zur Durchführung der Montage des Produktes erfolgt erst, wenn die korrekte Konfiguration der Ressourcen im Produktionssystem vorliegt (EVERSHEIM 2002, BRACHT ET AL. 2011).

2.5.3 Abgeleitete Anforderungen

Die Arbeitsablaufplanung bildet das Bindeglied zwischen Produktkonstruktion, Betriebsmittelplanung, Produktionssteuerung und Arbeitssystemplanung. Der Informationsfluss zwischen den Bereichen kann dabei bidirektional ablaufen. Angesichts der zunehmenden Häufigkeit der Planung sowie der steigenden Veränderungsfähigkeit von Produktionssystemen muss die Arbeitsplanung wachsenden und dynamischen Lösungsräumen begegnen.

Eine Herausforderung bei der Einführung neuer Produkte ist die oftmals ungenügende Kenntnis der Produkt-Konstrukteure über die der Eigenschaften und Einschränkungen des bestehenden Produktionssystems. Dies hat viele iterative Anpassungen des Produktes oder des Produktionssystems durch aufwändige und fehleranfällige Abstimmungen zwischen der Konstruktion und der Arbeitsplanung zur Folge. (KAMRANI & NASR 2010)

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll eine möglichst vollständige Automatisierung der Aufgaben der Arbeitsablaufplanung erfolgen. Sämtliche zu generierenden Ergebnisse werden in Hinblick auf bestehende bzw. feingeplante Montagesysteme gesehen. Die Arbeitssystemplanung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Bestimmung der zu beschaffenden Ressourcen und notwendigen Rekonfigurationen des Montagesystems in das zu entwickelnde Planungssystem einbezogen. Die Prüfplanung liegt außerhalb des Betrachtungsbereiches der vorliegenden Arbeit und wird im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. Die Automatisierung der Betriebsmittelplanung, also Konstruktion und Beschaffung von Ressourcen, liegt ebenfalls außerhalb der Betrachtung der vorliegenden Arbeit.

Die Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik für die *automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung* sind in Form der folgenden, automatisiert zu generierenden Ergebnissen zusammengefasst:

- Verbesserungsvorschläge für die Produktkonstruktion
- Festlegung einer geeigneten Prozesssequenz mitsamt Primär- und Sekundärvorgängen (dokumentiert im Arbeitsplan)
- Zuordnung der Montagevorgänge zu geeigneten Stationen mitsamt Betriebsmitteln (dokumentiert im Arbeitsplan)
- notwendige Änderungen am Montagesystem als Arbeitsgrundlage für die Betriebsmittelplanung und Arbeitssystemplanung
- Handlungsempfehlungen hinsichtlich notwendiger Rekonfigurationen der Betriebsmittel in den Stationen.
- Erstellung von Steuerungscode
- Kalkulationen zur Sicherstellung der Einhaltung wirtschaftlicher Vorgaben

2.6 Austaktung und Takt

2.6.1 Begriffsdefinitionen

Übergeordnetes Ziel der *Austaktung* ist die optimale Zuordnung von Montagevorgängen zu Stationen, wobei technologische und organisatorische Vorrangbeziehungen betrachtet werden müssen (BOYSEN ET AL. 2007). In der Literatur werden unterschiedliche Synonyme für den Begriff Austaktung verwendet (vgl. ROSCHER (2008) und PRÖPSTER (2016)). Beispielhaft seien die Begriffe Abtaktung (LUTZ 1974) und Leistungsabstimmung (KRATZSCH 2000, SCHLEUSENER & GÜNTHER 2003) genannt. Im Englischen wird Austaktung vor allem als *Assembly Line Balancing (ALB)* bezeichnet (BECKER & SCHOLL 2006).

Die entscheidende Planungsgröße im Rahmen der Austaktung stellt die *Taktzeit* dar. Sie wird nach LUTZ (1974, S. 18) definiert als „die pro Erzeugnis und Arbeitsstation maximal verfügbare Montagezeit und wird durch die effektive tägliche Arbeitszeit und die pro Tag geforderte Stückzahl bestimmt.“ Die *Stationszeit* beschreibt die kumulierte Dauer aller Montagevorgänge an einer Station (BECKER & SCHOLL 2006). Die Differenz zwischen Stationszeit und Taktzeit wird *Taktausgleich* (Weiß 2000) oder *Austaktverlust* (Grundig 2009) genannt. Unterschiede zwischen den Stationszeiten in einer Montagelinie werden mit Puffern ausgeglichen, die eine zeitliche Entkopplung der Stationen ermöglichen (LOTTER & WIENDAHL 2012).

Es existiert eine Vielzahl an Methoden zur Bestimmung der Zeiten von Montagevorgängen. Die am weitesten verbreiteten Methoden sind die *Zeitenermittlung* nach REFA (1997) sowie *Systeme vorbestimmter Zeiten (SvZ)* (LOTTER & WIENDAHL 2012, S. 54). Grundlage der Zeitenermittlung ist eine Beobachtung der Ist-Prozesse zur Zeitenmessung (REFA 1997). Bei SvZ hingegen

sind für die Teilvorgänge standardisierte Zeiten hinterlegt. Ein Beispiel für SvZ ist das *MTM-Verfahren (Methods-Time Measurement)* (BOKRANZ & LANDAU 2006). Eine weitere Möglichkeit ist die simulative Bestimmung von Prozessdauern, etwa mit Hilfe von Kinematiksimulationen. (LOTTER & WIENDAHL 2012)

BOYSEN ET AL. (2007) fassen die Zielgrößen der Austaktung wie folgt zusammen:

- Minimierung der Durchlaufzeit, Taktzeit und Kosten
- Maximierung der Effizienz und des Profits
- Glättung der Stationszeiten

Je nach Planungsaufgabe ergibt sich eine Kombination aus den verfolgten Zielen. Abhängig von der Komplexität der Aufgabe kann bereits die Bestimmung einer validen Austaktung zur Zielerreichung genügen. (BOYSEN ET AL. 2007)

2.6.2 Einordnung in Klassifizierungskriterien der Austaktung

Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Gebiet der Austaktung werden nach unterschiedlichen Kriterien klassifiziert. Im Folgenden werden die von BECKER & SCHOLL (2006) und BOYSEN ET AL. (2007) definierten, für diese Arbeit relevanten Klassifikationen vorgestellt und die vorliegende Arbeit in diese eingeordnet.

Die Austaktung kann bei der Neuplanung einer Montagelinie oder im Falle einer bestehenden Montagelinie zu deren Anpassung an sich veränderte Rahmenbedingungen erfolgen. Im Falle einer Neuplanung kann die Austaktung als einmaliger Vorgang betrachtet werden, der ausgehend von einer Montageaufgabe eine Planung eines optimalen Montagesystems zum Ziel hat. Der Fokus liegt dann auf der Bestimmung einer minimalen Menge an Stationen unter Berücksichtigung einer in einem Zeitraum zu produzierenden Menge an bekannten Produkten. Der Fokus der wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich der Austaktung liegt auf dem Fall der Neuplanung. (BECKER & SCHOLL 2006, BOYSEN ET AL. 2007, 2009)

Im Fall der Anpassung einer bestehenden Line an sich veränderte Rahmenbedingungen, der in der Realität häufiger auftritt, kann die Anzahl der Stationen als konstant angenommen werden (BOYSEN ET AL. 2007). Die in den Stationen vorhandenen Ressourcen können als bekannt angenommen werden (BOYSEN ET AL. 2007), was dem Planungsfall der Arbeitsablaufplanung entspricht. Im Folgenden soll daher die Definition nach KRATZSCH (2000, S. 18) Verwendung finden, wonach die Zielsetzung der Austaktung lautet „Tätigkeiten der Montage eines Produktes den Stationen einer Montagelinie so zuzuordnen, dass der Arbeitsumfang der einzelnen Stationen zeitlich aufeinander abgestimmt ist und Verlustzeiten vermieden werden.“

Die optimale Aufteilung der durchzuführenden Montagevorgänge auf die verfügbaren Stationen wird als *Assembly Line Balancing Problem* (ALBP) bezeichnet. Die Darstellung der Vorrangbeziehungen der Montagevorgänge erfolgt in der Regel in Form eines *Vorranggraphen* (engl.: Precedence Graph). Die Knoten des Vorranggraphen werden *Tasks* genannt und entsprechen Montagevorgängen, deren Teilvorgänge nicht auf mehrere Stationen aufgeteilt werden dürfen. Sie müssen Stationen eindeutig zugeordnet werden. Den Tasks sind Vorgangsdauern zugeordnet. Die gerichteten Kanten repräsentieren die Vorrangbeziehungen zwischen den Tasks. Eine valide Austaktung einer Montagelinie ist erreicht, wenn alle Tasks geeigneten Stationen zugewiesen sind, ohne dass Vorrangbeziehungen verletzt wurden. Dabei wird in der Montagelinie ein unidirektionaler Materialfluss zwischen den Stationen angenommen (BECKER & SCHOLL 2006, BOYSEN ET AL. 2009).

Die *produktspezifische Klassifikation* betrachtet die Anzahl an Produktvarianten sowie deren Einsteuerung in eine Linie. Bei einer *serienweisen Mehrprodukt-Linie* werden gleichartige Produkte in Losen zusammengefasst und nacheinander montiert. Darauf folgende Lose umfassen andere Montagevorgänge und erfordern daher eine Anpassung des Produktionssystems, z. B. durch Rüsten oder Rekonfiguration (LÖDDING 2008). Eine zusätzliche Herausforderung bei der Planung ist folglich die optimale Losbildung. Bei einer *Variantenmontagelinie* werden unterschiedliche Produktvarianten in Losgröße Eins montiert, da die Dauer der Anpassung des Produktionssystems im Vergleich zur Dauer der Primärvorgänge sehr gering ist. Dabei müssen je Variante unterschiedliche Bearbeitungszeiten an jeder Station berücksichtigt werden, um durch eine kurzfristige Reihenfolgebildung eine optimale Einsteuerung der Varianten zu ermöglichen (MERENGO ET AL. 1999). Bei einer *Einprodukt-Linie* wird ausschließlich eine Produktvariante hergestellt.

Die Arbeitsablaufplanung ist unabhängig von der Art des Produkt-Mix, da bei der Einführung eines neuen Produktes stets einmalig die Frage zu beantworten ist, ob das Montagesystem zur Durchführung aller Vorgänge verändert werden muss. Außerdem muss geprüft werden, wie lange die Vorgänge an den einzelnen Stationen dauern. Die optimale Einsteuerung der unterschiedlichen Varianten bzw. die Losbildung sind nicht Teil der vorliegenden Arbeit.

Eine weitere Art der Klassifizierung erfolgt angesichts der Betrachtung des bei der Austaktung berücksichtigten *Layouts von Montagelinien*. Den einfachsten Fall stellt eine *serielle Linie* mit einer sequentiellen Anordnung der Stationen dar. Im Rahmen dieser Arbeit soll der komplexere Fall von Montagesystemen mit *mehreren parallelen Linien* mit *parallelen Stationen* betrachtet werden.

Die Arten von berücksichtigten *Restriktionen bezüglich der Stationszuordnung* von Tasks werden ebenfalls zur Charakterisierung der Austaktung genutzt (SCHOLL

1999). So können zwingende Zuordnungen von Tasks zu Stationen bzw. von Tasks zu Typen von Stationen vor der Austaktung definiert werden, etwa um Schraub-Tasks ausschließlich Schraub-Stationen zuzuordnen. Der Stand der Technik sieht des Weiteren die Möglichkeit vor, die Zuordnung eines Task zu einer Station nur bei der Einhaltung bestimmter Task-Parameter durch die Station zu ermöglichen, etwa im Falle eines einzuhaltenden maximalen Bauteilgewichts. Eine weitere Klassifikation erfolgt durch die Betrachtung der *Eigenschaften von Ressourcen* im Rahmen der Austaktung. Dabei können die qualitativen und quantitativen Anforderungen der Tasks bei der Auswahl von Ressourcen berücksichtigt werden. So ergeben sich neben Restriktionen zwischen Tasks und Stationen zusätzliche Restriktionen zwischen Tasks und Ressourcen (SCHOLL 1999). Sämtliche erwähnten Restriktionen hinsichtlich Stations- und Ressourcenzuordnung sollen in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt werden.

Weitere relevante Klassifizierungsaspekte beziehen sich auf die Berücksichtigung von *materialflussspezifischen Restriktionen* aufgrund von Zuführungen und Bereitstellungen an den Stationen (BOYSEN ET AL. 2007), die ebenfalls in die Methode zur automatischen Arbeitsablaufplanung einfließen sollen.

2.6.3 Abgeleitete Anforderungen

Die Austaktung im Falle eines bestehenden Produktionssystems mit einer definierten Menge an Stationen und Montagelinien kann als Teilproblem der Arbeitsplanung betrachtet werden. Die Berücksichtigung von Vorrangbeziehungen zwischen den Montagevorgängen und die Einhaltung der vorgegebenen Taktzeit sind bei der Zuordnung der Vorgänge zu den Stationen zu beachten. Die durch das Planungssystem zu generierenden Arbeitspläne müssen hinsichtlich der Stations- und Durchlaufzeiten zu bewerten sein. Des Weiteren ist für eine aussagekräftige Austaktung im Sinne einer Arbeitsablaufplanung für eine bestehende Montagelinie eine detaillierte Betrachtung der Fähigkeiten der Stationen sowie der dazugehörigen Ressourcen unabdingbar. Losbildung und die Einsteuerung von Varianten werden nicht betrachtet. Die abgeleiteten Anforderungen lauten zusammengefasst:

- automatische Austaktung der vom Produkt geforderten Montagevorgänge in einem gegebenen Montagesystem unter Einhaltung der Vorrangbeziehungen und Berücksichtigung der Zielgrößen der Austaktung
- automatisierte Zuordnung der vom Produkt geforderten Montagevorgänge zu Stationen unter Berücksichtigung der Verkettung und Fähigkeiten der Stationen, die abhängig von den zugehörigen Ressourcen sind
- Betrachtung paralleler Montagelinien und paralleler Stationen

2.7 Digitale Fabrik in der Konstruktion und Arbeitsablaufplanung

2.7.1 Begriffsdefinitionen

Die *digitale Fabrik* ist „der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und dreidimensionalen Visualisierung – die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt“ (VDI-RICHTLINIE 4499, S. 3).

In diesem Abschnitt sollen die in den Phasen Konstruktion und Arbeitsablaufplanung verwendeten digitalen Modelle und Softwarewerkzeuge mit Fokus auf montagerelevante Aspekte vorgestellt werden. Folgende Werkzeuge werden dabei als Autoren- und Erzeugersysteme bezeichnet (BRACHT ET AL. 2011):

- CAD (Computer Aided Design) Werkzeuge zur „(...) Erzeugung der geometrischen, technologischen und funktionalen Daten eines Produktes oder Produktionsmittels (...)“ (Bracht et al. 2011, S. 180).
- CAE (Computer Aided Engineering) Werkzeuge zur Prozess-, Struktur- und Funktionsanalyse wie z. B. Robotersimulationen, Ergonomiesimulationen und Materialflusssimulationen. (Bracht et al. 2011, S. 183).
- CAM (Computer Aided Manufacturing) Werkzeuge zur computerbasierten Steuerung von Maschinen wie Robotern, Handhabungs- und Transportsystemen durch die Erzeugung von Anweisungen mit Hilfe entsprechender Programmiersysteme (Bracht et al. 2011, S.187).
- CAPP (Computer Aided Production Planning) Werkzeuge zur rechnergestützten Arbeitsplanung (Bracht et al. 2011, S. 183).

Zur Vernetzung der unterschiedlichen Erzeugersysteme wird eine geeignete IT-Infrastruktur benötigt. Der Begriff *Datenmanagement* umfasst alle beim Entwurf, Haltung und Bereitstellung von Daten anfallenden technischen und organisatorischen Aufgaben. Die *Durchgängigkeit* der Daten erlaubt einen medienbruchfreien Datenaustausch zwischen den Werkzeugen. (BRACHT ET AL. 2011)

Die VDI-RICHTLINIE 2219 (S. 6) bezeichnet *Product-Data-Management-Systeme* (PDM) als „Verwaltung von produktbeschreibenden Daten, um eine vollständige Rechnerunterstützung in der Produktentwicklung zu ermöglichen.“ Sie erlauben eine Verwaltung und einfache Erstellung unterschiedlicher Produktvarianten sowie die Dokumentation von Beziehungen zwischen Einzelteilen und Baugruppen

(SAAKSVOURI & IMMONEN 2008). Das *Product Lifecycle Management (PLM)* ist nach VDI-RICHTLINIE 2219 (S. 6) definiert als ein Ansatz zum „Management von Produktinformationen, Prozessen und Applikationen in einem Produktlebenszyklus“. PLM-Systeme umfassen auch PDM-Systeme und bilden die funktionale und administrative Grundlage für die Integration von CAD-, CAM- und CAE-Systemen (EIGNER & STELZER 2009). Die Versorgung der unterschiedlichen Systeme mit aktuellen und konsistenten Daten ist Voraussetzung für die Parallelisierung und Verzahnung der Produktionsphasen. CAD- und PLM-Systeme können in der Produktentwicklung als „grundsätzlich eingeführt“ betrachtet werden (WESTKÄMPER ET AL. 2013, S. 224). In der Produktionsplanung sowie in kleinen und mittleren Unternehmen kommt PLM hingegen nur geringfügig zum Einsatz (EIGNER & STELZER 2009, S. 6).

2.7.2 Datenmodelle für Produkt, Prozess und Ressource

Zur digitalen Modellierung von Vorgängen in der Produktion hat sich die Dreiteilung in *Prozess, Produkt und Ressource (PPR)* bewährt. Die Dreiteilung findet in unterschiedlichen Bereichen, wie der Anlagenplanung im Kontext von AutomationML (DRAHT 2010), der Steigerung der Interoperabilität zwischen Produktion und Unternehmensführung (DIN EN 62264, Adams 2007) oder im Product-Lifecycle-Management (PLM), Anwendung (EIGNER & STELZER 2009). In Abb. 7 sind die Beziehungen zwischen den Elementen für die Domäne der Produktion dargestellt. Produkte benötigen Prozesse, um produziert zu werden, während ein Prozess von einer oder mehreren Ressourcen durchgeführt wird. Die Zuordnung eines Produktes zu einer Ressource ist folglich Voraussetzung für dessen Produktion (DRAHT 2010). Ein *PPR-Datenmodell* bildet die Abhängigkeiten zwischen den Elementen ab und entspricht einem integrierten Datenmodell (EIGNER & STELZER 2009, WESTKÄMPER ET AL. 2013). Ein PPR-System zur Verwaltung dieses Modells bildet im Kontext der digitalen Fabrik die Basis zur simultanen Planung von Produkt, Prozess und Ressourcen (BRACHT ET AL. 2011).

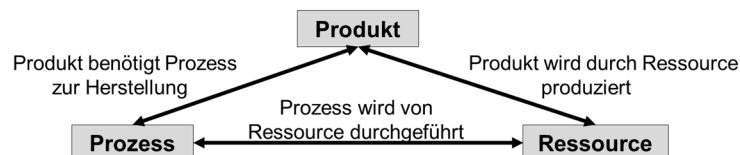


Abbildung 7: Verhältnisse zwischen Produkt, Prozess und Ressource
in Anlehnung an DRAHT (2010).

Ein *integriertes Produktmodell* bildet die funktionalen Abhängigkeiten zwischen den unterschiedlichen Teilmodellen zur Erfassung aller während der Produktentwicklung

anfallenden Daten ab. Das integrierte Produktmodell verbindet dabei ein *technisches Modell*, das die Beziehungen der Einzelteile als Objektstruktur abbildet, mit dem *geometrischen Modell* der Einzelteile und des Gesamtproduktes. Es wird schrittweise gebildet und zusätzlich um ein *technologisches Modell* erweitert, das arbeitsplanbezogene Daten, wie ausgewählte Ressourcen und Steuerungsprogramme, enthält. (REINER & POLLY 1989, PAUL & SUTTER 1991)

Bestehende PLM-Systeme (z. B. Dassault Enovia, Siemens Teamcenter) implementieren die Verknüpfung von Prozess-, Produkt- und Ressourcen-Daten durch die Integration und Speicherung von Querverweisen in die PPR-Datenmodelle. Die relationalen Datenbanksysteme speichern und definieren die Beziehungen der Elemente zueinander hinsichtlich logischer Restriktionen (z. B. Bauteilgewicht und Traglast) sowie basierend auf gespeichertem Nutzerwissen (z. B. feste Zuordnung eines Vorgangs zu einer Maschine). Zunehmende Datenmengen sowie die steigende Komplexität aufgrund von steigender Variantenvielfalt, Planungshäufigkeit und Marktdynamik bedeuten eine zunehmende Herausforderung für die Sicherstellung der Korrektheit und Aktualität der Relationen in den Datenbanken. Der Modellinhalt nimmt dabei kontinuierlich zu, etwa um kinematische und geometrische Informationen aufgrund der zunehmenden Verbreitung von 3D-CAD-Modellen. (EIGNER & STELZER 2009, FERRER ET AL. 2016)

Der Einsatz von PPR-Datenmodellen und PLM-Systemen ist in der Phase der Produktentwicklung sowie in Großfirmen am weitesten verbreitet. Die Betrachtung der Organisation sowie der Prozesse in der Produktion wird dabei oftmals vernachlässigt. (ABRAMOVICI 2007, EIGNER & STELZER 2009)

2.7.2.1 Digitale Modellierung von Prozessen

Zur Modellierung von Prozessen kommen aufgrund der Vielfalt an Anwendungsfällen eine Vielzahl von Sprachen zum Einsatz. So führt PAWLEWSKI (2014) einen Vergleich über 70 verschiedener graphischer und textbasierter Sprachen zur Modellierung von Produktionsprozessen durch. Daher erfolgt ausschließlich eine Vorstellung für diese Arbeit relevanter Modellierungsansätze.

Die VDI/VDE-RICHTLINIE 3682 beschreibt ein Konzept zur graphischen Darstellung von Prozessen mitsamt dem dazugehörigen Informationsmodell, das auf Petri-Netzen aufbaut. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Abbildung der Zustände und Merkmale des Produktes vor und nach der Durchführung eines Prozesses mitsamt der zur Realisierung notwendigen Ressourcen und Energien. Sämtliche Objekte werden durch Attribute, deren Detaillierungsgrad abhängig vom Anwendungsfall ist, weiterführend beschrieben.

PLCOpen XML ist ein neutrales Datenformat nach DIN EN 61131-3 und hat die logische Beschreibung von Verhalten und Abfolgen zum Ziel. Es unterstützt unterschiedliche Diagrammtypen für die Logikbeschreibung, wie z. B. Gantt-Diagramme, Zustandsdiagramme und *Sequential Function Charts (SFC)*. SFC sind dabei in der Lage, sämtliche andere Logikbeschreibungen nach IEC61131-3 abzubilden und können zur Programmierung von speicherprogrammierbaren Steuerungen verwendet werden (SCHNEIDER 1999, DRAHT 2010). Aufgrund der Relevanz für diese Arbeit sollen die SFC im Folgenden genauer erklärt werden.

Der SFC bildet mit einer sequentiellen Darstellung einen Ablauf von durchzuführenden Schritten ab, vgl. Abb. 8. Voraussetzung für die Bearbeitung eines Schrittes ist die Erfüllung von Voraussetzungen, die in Form von Transitionen mit Weiterschaltbedingungen dargestellt werden. Schritte können mit Aktionen verbunden sein, welche die Ausführung einer Steuerungsaktivität definieren. Die Zusammenfassung eines SFC zu einem Schritt bzw. die Dekomposition eines Schrittes in Teilschritte ist möglich. Ein SFC kann ohne Informationsverlust in ein Petrinetz überführt werden. (SCHNEIDER 1999, DRAHT 2010)

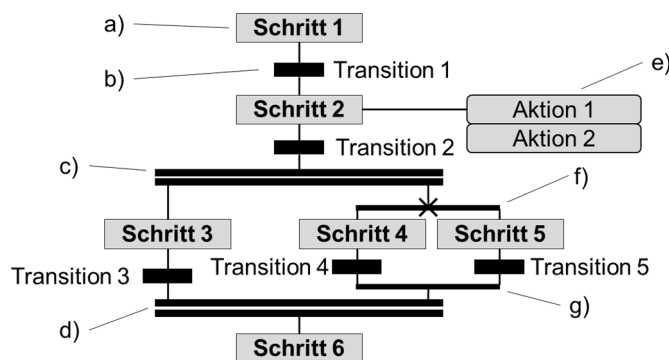


Abbildung 8: Beispielhafter SFC in Anlehnung an DRAHT (2010); a) Schritt, b) Transition, c) Simultan-Verzweigung, d) Simultan-Zusammenführung, e) Aktion, f) Alternativ-Verzweigung, g) Alternativ-Zusammenführung.

2.7.2.2 AutomationML

Bei AutomationML (AML) handelt es sich um ein XML-basiertes Datenaustauschformat, welches „(...) einen durchgängigen Engineering-Prozess über alle Phasen und alle Disziplinen der Anlagenplanung hinweg dienen (...)“ soll (DRAHT 2010, S. 10). AML ist eine spezifische Ausprägung eines PPR-Datenmodells. Zur Beschreibung der Anlagen mitsamt ihren Komponenten auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen bindet AML XML-basierte Standards für unterschiedliche Disziplinen ein. Eine Kernfunktion von AML ist die Möglichkeit

der Erweiterung der Engineeringdaten um weitere Standards zur Beschreibung anwendungsfallspezifischer Aspekte. (DRAHT 2010)

Als AutomationML-Grundhierarchie dient dabei CAEX (Computer Aided Engineering Exchange) gemäß IEC 62424. Dabei handelt es sich um ein XML-basiertes Datenformat, das die Topologie einer Anlage in einer hierarchischen Struktur abbildet. *Klassen und Bibliotheken* erlauben die Modellierung wiederverwendbarer Vorlagen, z. B. für Ressourcen. Die *Instanz-Hierarchie* beschreibt die Topologie einer Anlage mitsamt der beteiligten Objekte, Eigenschaften, Schnittstellen und Relationen zwischen ihnen. *Schnittstellen, Relationen und Referenzen* beschreiben die Verbindungen zwischen CAEX-Objekten sowie den dazugehörigen externen Dokumenten. *Rollen* dienen zur Modellierung abstrakter Funktionen oder Eigenschaften (z. B. die Rolle des *Greifers*) und ermöglichen so eine semantische Identifikation von Objekten. (DRAHT 2010)

Jedes Objekt in der CAEX-Grundhierarchie kann mit zusätzlichen Engineering-Daten verknüpft werden. Beispielhaft seien geometrische und kinematische Informationen in Form des COLLADA-Standards sowie Verhaltens- und Prozessbeschreibungen nach PLCopenXML genannt. (DRAHT 2010)

2.7.3 Computer Aided Design

CAD-Systeme sind Werkzeuge zur Modellierung von Einzelteilen, Baugruppen, Produkten und Ressourcen. Ein mittels eines CAD-Systems erstelltes Geometriemodell wird CAD-Modell genannt. Gegenwärtig sind dreidimensionale CAD-Modelle von Produkten aufgrund der vollständigen Geometriebeschreibung weit verbreitet. 3D-CAD-Modelle werden von CAE- und CAM-Systemen weiterverarbeitet und können in den unterschiedlichen Lebensphasen eines technischen Produktes für vielfältige Simulations-, Animations- und Berechnungsverfahren genutzt werden. *Featurebasierte CAD-Systeme* erlauben es, die geometrischen Modelleigenschaften um Zusatzinformationen, sogenannte Features, zu erweitern. Dabei handelt es sich um Informationsobjekte, die im gesamten Produktlebenszyklus verwendet werden können und beispielsweise Funktionen von Ressourcen oder notwendige Fertigungstechnologien von Bauteilen beschreiben. (VAJNA ET AL. 2009, VDI-RICHTLINIE 2209, BRACHT ET AL. 2011)

Beim Übergang von der Konzept- in die Entwurfsphase beginnt in der Konstruktion die 3D-Modellierung. 3D-Modelle von Einzelteilen werden erstellt (Neukonstruktion) oder angepasst (Anpassungs- und Variantenkonstruktion) bzw. aus Norm- und Standardteilkatalogen entnommen (ROLLER 1995). Anschließend werden die Einzelteil-Modelle zu Baugruppen-Modellen und schließlich zum

Produktmodell zusammengesetzt. Dies erlaubt eine bessere Vorstellung des Produktes sowie die Erkennung von Konstruktionsfehlern. (VAJNA ET AL. 2009)

Einsatzgebiete von CAD-Werkzeugen finden sich auch in der Arbeitsablaufplanung. Die Konstruktion von Ressourcen, die in direktem Kontakt mit dem Produkt stehen, erfolgt in der Regel ausgehend vom CAD-Produktmodell. Indem CAD-Modelle von Ressourcen im Produktmodell integriert und positioniert werden, können Betriebsmittel auch ohne reale Prototypen entwickelt und geprüft werden. (WILSON 1998)

Eine Herausforderung bei der Nutzung von CAD-Modellen mit unterschiedlichen digitalen Werkzeugen besteht oftmals in der Inkompatibilität der Daten zwischen den verschiedenen Systemen. Eine Lösung dieses Problems ist die Schaffung einer Norm zur systemneutralen Darstellung von Produktmodellen (SCHÜLER 1994). FRIEDWALD (2011) gibt eine Übersicht über neutrale Datenformate. Beispielhaft seien IGES (Initial Graphics Exchange Specification), 3D-PDF, STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) und JT (Jupiter Tessellation) genannt.

Aufgrund der Relevanz für die vorliegende Arbeit wird das JT-Format genauer vorgestellt. Dabei handelt es sich um ein von Siemens entwickeltes, neutrales CAD-Format, das in der ISO 14306 standardisiert ist (SENDLER 2013). JT-Modelle können um Features, die *Product and Manufacturing Information (PMI)* genannt werden, sowie um kinematische Beschreibungen ergänzt werden (EIGNER ET AL. 2010).

2.7.4 Computer Aided Engineering

CAE-Werkzeuge umfassen Systeme zur computergestützten Berechnung, Simulation und Analyse. BRACHT ET AL. (2011) geben einen Überblick über CAE-Systeme in den unterschiedlichen Anwendungsbereichen und Planungsphasen. Für die Arbeitsplanung ist die Kinematiksimulation von besonderer Bedeutung, insbesondere beim roboterbasierten Fügen, und wird im nächsten Abschnitt gesondert vorgestellt (BRACHT ET AL. 2011, S. 117). Anschließend wird auf die Ergonomiesimulation eingegangen, die bei der Planung und Absicherung manueller Stationen Anwendung findet (BRACHT ET AL. 2011, S. 119).

2.7.4.1 Einordnung und Vorgehen bei der Nutzung der Kinematiksimulation

In der Kinematiksimulation werden als Ersatzmodell Mehrkörpersysteme verwendet. Diese bestehen aus starren Körpern, die mit Gelenken verbunden und kinematisch gekoppelt sind. Die Kinematiksimulation erlaubt die Überprüfung der Korrektheit der Bewegungsabläufe. (BRACHT ET AL. 2011)

Voraussetzung für den Aufbau eines Kinematik-Simulationsmodells für ein Montagesystem sind dreidimensionale Modelle der Betriebsmittel mitsamt den Geometrie- und Verhaltensmodellen aus einer Maschinenbibliothek (VDI-RICHTLINIE 4499). Die Betriebsmittelmodelle müssen räumliche Informationen über ihre Schnittstellen enthalten. Diese können zur Anbindung an weitere Betriebsmittel zur Erstellung von kombinierten Betriebsmitteln mit veränderten kinematischen Ketten (z. B. Roboter und Greifer) oder als Schnittstelle zum Produkt (z. B. Greifer und Bauteil des Produktes) genutzt werden. Die unterschiedlichen Betriebsmittel sowie die Umgebung werden dem Modell des zu planenden Montagesystems hinzugefügt und in diesem positioniert. (DILLMANN & HUCK 1991, WECK & BRECHER 2006, FELDMANN ET AL. 2014)

Anschließend wird das 3D-CAD-Modell des Produktes in das Montagesystem-Modell integriert. In modernen CAD-Systemen sind die Fügstellen sowie dazugehörige Produktionsdaten in Form von Features direkt in das Produktmodell integriert (VAJNA ET AL. 2009). Aufbauend auf dem CAD-Modell des Produktes müssen nun optimale Prozessreihenfolgen sowie der Steuerungscode für die Betriebsmittel in der Simulation bestimmt werden (BRACHT ET AL. 2011). Hierfür müssen den Baugruppen geeignete Ressourcen bzw. Stationen zugeordnet und anschließend die durchzuführenden Montagevorgänge beschrieben werden (z. B. anzufahrende Posen der Bewegungseinrichtungen, Zustände von Endeffektoren). Ein hoher manueller Aufwand ergibt sich aufgrund der je nach Produktstruktur unterschiedlich großen Menge an Einzelteilen sowie der zu erstellenden Montagezustände. Des Weiteren sollten für eine vollständige Absicherung Sekundärvorgänge, wie Transport, Zuführung oder Werkzeugwechsel, abgebildet werden. (DILLMANN & HUCK 1991, FELDMANN ET AL. 2014) Anschließend kann die Kinematiksimulation entsprechend dem definierten Ablauf im Simulationsmodell durchgeführt werden. Die Festlegung der von Robotern durchzuführenden Bewegungen kann manuell vorgegeben oder durch eine *Bahnplanung* automatisiert werden (WECK & BRECHER 2006).

Ohne eine simulative Prüfung können unerwünschte Kollisionen und nicht erreichbare Posen erst in der Inbetriebnahme erkannt werden, was zu erheblichen Zusatzaufwänden und Verzögerungen führen kann. Des Weiteren können die vom Roboter in der Simulation durchgeführten Prozesse automatisiert in proprietäre Roboterprogrammiersprachen übersetzt und direkt an die realen Robotersteuerungen weitergegeben werden, was zu einer weiteren Zeitersparnis führt (BRACHT ET AL. 2011). Diese Art der Roboterprogrammierung wird der Offline-Programmierung zugeordnet, bei der im Gegensatz zur Online-Programmierung kein eingeschalteter Roboter während der Programmierung benötigt wird (HAUN 2013). Diese Art der Programmerzeugung kann den CAM-Werkzeugen zugeordnet werden. Basierend auf

der Analyse der durchzuführenden Bewegungen in der Simulation können zudem detaillierte Vorgangsdauern bestimmt werden. (DILLMANN & HUCK 1991)

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der erstmalige Aufbau des Modells eines Montagesystems der Montagesystemplanung zugeordnet. Die fortlaufende Anpassung und Rekonfiguration sowie die Nutzung eines Modells im Rahmen einer Kinematiksimulation aufgrund von sich verändernden Rahmenbedingungen wird als Teil der Arbeitsablaufplanung betrachtet. Es wird folglich von einem bestehenden Modell des Montagesystems in einem initialen Zustand ausgegangen. Eine Simulation von sensorischen Vorgängen erfolgt in einer Kinematiksimulation nicht.

2.7.4.2 Ergonomiesimulation

Die Ergonomiesimulation ist eine spezielle Art der Kinematiksimulation und wird den CAE-Werkzeugen zugeordnet. Dabei „(...) ist der Mensch mit seinen physischen (...) Eigenschaften Gegenstand der Betrachtung (...). Auf der Basis definierter Arbeitsabläufe und anhand von Bewegungen, körpereigenen Belastungen und bewegten Gewichten lässt sich z. B. die Beanspruchung in den (...) Körperteilen messen (...)“ (BRACHT ET AL. 2011, S. 119). Digitale Modelle von Menschen mitsamt Betriebsmitteln und Baugruppen erlauben die Simulation der dynamischen Bewegungen des Menschen und ermöglichen eine Bewertung von Arbeitssystemen im Hinblick auf körperliche Belastungen sowie zeitwirtschaftliche Fragestellungen (GEYER 1997). Die automatische Bewegungsplanung des Menschen unter Berücksichtigung von Kollisionen mit der Umgebung stellt gegenwärtig ein Feld der Forschung dar, siehe z. B. LO ET AL. (2002) und BJÖRKENSTAM ET AL. (2016). Ein Teilbereich der Ergonomiesimulation ist die Greifplanung für menschliche Hände, deren Automatisierung ebenfalls ein Forschungsgebiet darstellt (vgl. z. B. IBERALL (1987), KIM ET AL. (2004), GOLDFEDER ET AL. (2007) und ROA ET AL. (2012)).

2.7.5 Computer Aided Process Planning

Computer Aided Process Planning (CAPP) umfasst Werkzeuge zur rechnergestützten Arbeitsplanung (AWF 1985). Unter Verwendung der Ergebnisse aus der Konstruktion werden Arbeitsschritte zur Fertigung und Montage sowie die einzusetzenden Betriebsmittel festgelegt. CAPP ist somit das Bindeglied zwischen CAD und CAM (YUSOF & LATIF 2014). Aufgabe von CAPP-Systemen ist die Zusammenführung von Produkt-, Prozess und Betriebsmitteldaten zur Festlegung eines Arbeitsplans mitsamt seinen Prozessparametern (BRACHT ET AL. 2011). YUSOF & LATIF (2014) vermitteln eine Übersicht über den Stand der Technik im Bereich CAPP, dessen Fokus auf Fertigungsprozessen wie spanenden Verfahren liegt.

2.7.6 Abgeleitete Anforderungen

Die vorliegende Arbeit geht von einer Verfügbarkeit der dreidimensionalen Modelle des Montagesystems, der Ressourcen und des Produktes mitsamt seinen Einzelteilen in einem PLM-System aus. Ein System zur Automatisierung der Arbeitsablaufplanung kann CAPP-Werkzeugen zugeordnet werden, wobei die simulative Absicherung der Arbeitspläne die Einbindung von CAE-Werkzeugen erfordert.

Die Kinematiksimulation dient im Kontext der Arbeitsablaufplanung dazu, die Ergebnisse aus der Prozessplanung (Montagegrobplanung) in die Operationsplanung (Montagefeinplanung) sowie in die NC-/RC-Programmierung zu überführen. Die Kinematiksimulation erlaubt eine frühzeitige Betriebsmittelplanung sowie eine beschleunigte Einbindung der Arbeitssystemplanung. Die Anwendung der Simulation ist mit hohem manuellem Aufwand verbunden. Insbesondere unter Berücksichtigung der Veränderungsfähigkeit des Montagesystems, etwa im Falle unterschiedlicher valider Arbeitspläne und Montagereihenfolgen sowie bei rekonfigurierbaren Stationen, kann dem entstehenden Lösungsraum nicht effizient begegnet werden. Die abgeleiteten Anforderungen lauten wie folgt:

- Verwendung bestehender, industriell verbreiteter digitaler Modelle von Montagesystemen, Ressourcen und Produkten zur Vermeidung von zusätzlichem Aufwand bei der Modellerstellung
- Einbindung industriell verwendeter Software-Werkzeuge zur Reduktion der Aufwände bei der Einführung des Systems zur automatischen Arbeitsplanung.
- durchgängige Modellierung während der Arbeitsplanung durch digitale Verknüpfung von Produkt, Prozess und Ressource
- Vermeidung von Widersprüchen zum Modellierungsansatz von AutomationML (z. B. möglichst ausschließliche Verwendung von XML)
- Nutzung bestehender Normen bei der Prozessmodellierung
- Reduktion der Aufwände bei der Kinematiksimulation in der Arbeitsplanung

2.8 Aufgabenorientierte Programmiersysteme

2.8.1 Begriffsdefinitionen

Die *aufgabenorientierte Programmierung* erfolgt auf einer höheren Abstraktionsebene als die ressourcenorientierte Programmierung, bei der explizit die Befehle zur Steuerung der Betriebsmittel vom Nutzer vorgegeben werden. Anstelle einer Beschreibung WIE eine Aufgabe zu lösen ist, wird beschrieben, WAS ein System tun soll (SIEGERT & BOCIONEK 1996, S. 96). Die aufgabenorientierte

Programmierung ermöglicht folglich auch weniger erfahrenen Anwendern, lauffähige Programme zu erzeugen (KUGELMANN 1999).

Als *aufgabenorientierte Programmiersysteme* werden Systeme bezeichnet, die - ausgehend von einem Ist- und einem Soll-Zustand eines Montagesystems bzw. einer Baugruppe - selbstständig die erforderlichen Bewegungen und Zustandsänderungen der Ressourcen erzeugen. Ziel ist hierbei die vollautomatische Generierung der Steuerungsprogramme zur Vermeidung zeitaufwändiger manueller Tätigkeiten wie z. B. der Vorgabe kollisionsfreier Bahnen. Aufgabenorientierte Programmiersysteme können zur Programmierung von realen Ressourcen sowie von Simulationsmodellen, etwa in einer Kinematiksimulation, genutzt werden. (WECK & BRECHER 2006)

2.8.2 Struktur aufgabenorientierter Programmiersysteme

Ausgangsbasis für die aufgabenorientierte Programmierung ist die Beschreibung der Umwelt und des Produktes im CAD-System, vgl. Abb. 9. Das Umweltmodell beinhaltet den Zustand des Montagesystems mitsamt dessen Geometrie sowie den verfügbaren Zustandsänderungen der Ressourcen (SECKNER 2008). Das *Aufgabenmodell* beschreibt vorgegebene zu erreichende Zielzustände und Sequenzen von Vorgängen (HUMBURGER 1998, KUGELMANN 1999). Das Aufgabenmodell kann manuell vom Nutzer vorgegeben oder automatisiert aus CAD-Modellen des Produktes abgeleitet werden. Der *Aktionsplaner* dient der Zerlegung des Aufgabenmodells in Teilvergänge wie Greif- und Bahnaufgaben, die in spezialisierten Planungsmodulen in lauffähige Programmanweisungen aufgelöst werden. Eine Zuordnung der Teilvergänge zu geeigneten Ressourcen in einer Station kann manuell oder automatisiert erfolgen. Die automatisierte Zuordnung erfordert eine Abbildung der Fähigkeiten der Ressourcen in einem geeigneten Modell (SECKNER 2008, S. 54), das im Folgenden *Fähigkeitenmodell* genannt wird. (WECK & BRECHER 2006)

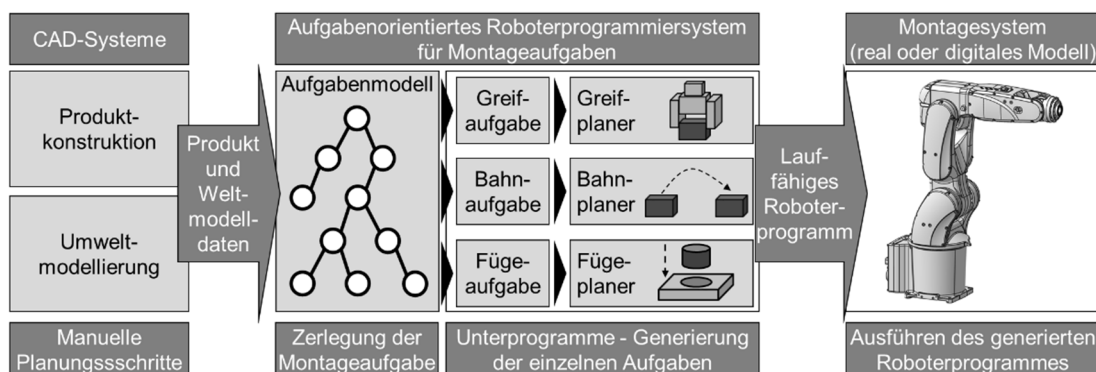


Abbildung 9: Struktur eines aufgabenorientierten Roboterprogrammiersystems für die Montage in Anlehnung an WECK & BRECHER (2006).

Die zugeordneten Teilvorgänge werden anschließend durch Planungsmodule in ausführbare Steuerungsbefehle überführt. Notwendige Planungsmodule sind die *Greifplanung*, die *Bahnplanung* sowie die *Fügeplanung* (WECK & BRECHER 2006). Weitere relevante Planungsmodule sind notwendig zur *Sensorintegration* sowie zur *Synchronisation* der Montagevorgänge mit der Umwelt (SIEGERT & BOCIONEK 1996). Dieser grundlegende Aufbau von aufgabenorientierten Programmiersystemen findet sich in einer Vielzahl von Arbeiten wieder (vgl. HUMBURGER (1998), KUGELMANN (1999), SECKNER (2008), BACKHAUS (2016)).

Die Greifplanung hat die Festlegung einer Greifposition zum Ziel, die einen sicheren, beschädigungsfreien Transport sowie die richtige Lage des zu greifenden Objektes ermöglicht. Während des Greifvorgangs darf es zu keiner Kollision zwischen dem Greifer und der Umgebung kommen, etwa mit Baugruppen am Fügeort des gegriffenen Objektes oder am Ort der Bereitstellung. Zusätzlich muss die Kinematik des Greifers berücksichtigt werden, da sich dessen Geometrie im offenen oder geschlossenen Zustand verändern kann. Im Bereich der automatischen Greifplanung gibt es eine Vielzahl von Arbeiten, die unterschiedlichen Fragestellungen, wie z. B. der automatischen Greifpunktbestimmung, der Greiferauswahl oder der Gestaltung des Haltesystems nachgehen (vgl. z. B. RÖHRDANZ (1998), BALAN & BONE (2003), HAASE (2011), SCHMALZ & REINHART (2014)). (WECK & BRECHER 2006).

Die Bahnplanung hat in aufgabenorientierten Programmiersystemen die Aufgabe, kollisionsfreie und singularitätsfreie Sequenzen von Roboterbewegungen zwischen einer geforderten Start- und Endpose des Roboters unter Berücksichtigung der Umwelt zu bestimmen. Der Ansatz wird der Offline-Programmierung zugeordnet und in einer Vielzahl von Arbeiten untersucht (vgl. KAVRAKI & LATOMBE (1998), BRANICKY ET AL. (2001), HATWIG ET AL. (2012), ULRICH ET AL. (2016)). Aufgabe des Fügeplaners ist die Planung der Fügevorgänge unter Berücksichtigung geeigneter Fügepositionen und -orientierungen. (WECK & BRECHER 2006)

2.8.3 Abgeleitete Anforderungen

Im Rahmen dieser Arbeit bildet die aufgabenorientierte Programmierung einer Kinematiksimulation einen zentralen Lösungsbaustein zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung. Ausgehend von der Zielsetzung, ein Montagesystem mit mehreren Stationen zu betrachten, wird die aufgabenorientierte Programmierung von Transportvorgängen zwischen den Stationen des Montagesystems sowie die Programmierung der Ressourcen in unterschiedlicher Stationen gefordert. Auch Zuführvorgänge sollen aufgabenorientiert programmiert werden.

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Positionen möglicher Greifpunkte im 3D-CAD-Modell jeder zu fügender Baugruppe bekannt sind. Des Weiteren werden bestehende Ansätze zur automatischen Bahnplanung als Grundlage verwendet und nicht detaillierter betrachtet.

Die abgeleiteten Anforderungen werden folgendermaßen zusammengefasst:

- Einbindung der aufgabenorientierten Programmierung in die automatische Arbeitsplanung unter Berücksichtigung von Ressourcen in einem Montagesystem mit mehreren Stationen
- Ableitung des Aufgabenmodells aus 3D-CAD-Produktmodellen
- aufgabenorientierte Programmierung von Sekundärvorgängen

2.9 Gegenwärtige Digitalisierungskonzepte in der Produktion

In Abschnitt 2.9 werden gegenwärtige Digitalisierungskonzepte in der Produktion im Kontext von Industrie 4.0 vorgestellt und eingeordnet, die für diese Arbeit relevant sind (vgl. ACATECH (2011), BAUERNHANS ET AL. (2016), REINHART (2017)).

2.9.1 Plug&Produce

Zum automatischen *Konfigurieren* von Betriebsmitteln wurde das Konzept von *Plug&Produce* als Analogie zu Plug&Play im Kontext von Computern von (ARAI ET AL. 2000) erstmalig vorgestellt. Ziel ist hierbei die Beschleunigung der Rekonfiguration von Produktionssystemen. Konfigurieren ist nach DIN IEC 60050-351 das Zusammensetzen von Funktions- oder Baueinheiten zu einem Regelungs- und Steuerungssystem. Dies umfasst in Montagesystemen Aufwände wie die physikalische Systemverbindung über Schnittstellen, die Beschreibung der Datenschnittstellen sowie die Erstellung gerätespezifischer Funktionen (KRUG 2012). Zum Produktionssystem hinzugefügte Betriebsmittel, die mit eigenen Datenspeichern und Steuergeräten ausgestattet sind, werden automatisiert erkannt und vernetzt. Damit können sie schneller zur Durchführung neuer Aufgaben eingesetzt werden.

REINHART ET AL. (2011) und KRUG (2012) stellen eine Methode zum automatisierten Konfigurieren mit Fokus auf Industrieroboter mitsamt Endeffektoren und Peripheriegeräten vor. Kern der Methode ist ein Zustandsmodell, das aus den individuellen Gerätebeschreibungen der einzelnen Betriebsmittel in einer Roboterzelle generiert wird. Die Gerätebeschreibungen beinhalten geometrische und kinematische Informationen sowie eine Funktionsbeschreibung. Zur Vereinfachung der Austauschbarkeit der Betriebsmittel werden diese mittels sogenannter „Transitionstreiber“ unabhängig von Herstellerspezifika beschrieben.

HAMMERSTINGL & REINHART (2015) erweitern das Konzept der Transitionstreiber um eine Systemarchitektur, die das automatisierte Konfigurieren unterschiedlicher Klassen von Betriebsmitteln mit übergeordneten Steuerungen ermöglicht. Zusammenfassend beschleunigen die vorgestellten Methoden das Konfigurieren von Betriebsmitteln durch digitale Ressourcenbeschreibungen. Die Veränderungsfähigkeit wird gesteigert und das benötigte Expertenwissen reduziert (KRUG 2012).

2.9.2 Cyber-Physische Systeme

Als *Cyber-Physische Systeme (CPS)* werden Systeme von vernetzten, kollaborierenden Entitäten verstanden, die die Fähigkeit zur Datenverarbeitung und Datenübertragung besitzen und in Verbindung mit ihrer physischen Umgebung stehen. Im Fokus steht dabei die Interaktion zwischen physischen und virtuellen Komponenten sowie deren Verbindung zu Computer- und Informationssystemen wie dem Internet (ACATECH 2011, MONOSTORI ET AL. 2016, LEE & SESHIA 2017). Ziele der Einführung von CPS sind Selbst-Organisation, autonome Entscheidungsfindung und erhöhte Effizienz und Transparenz in Produktionssystemen (MONOSTORI ET AL. 2016). CPS besitzen die Fähigkeit der Selbstbeschreibung, die neben Informationen über den eigenen Zustand auch die Kenntnis der individuellen Fähigkeiten beinhaltet. (BERGER ET AL. 2015, AZAIEZ ET AL. 2016, VOGEL-HEUSER ET AL. 2017)

Produktionssysteme, in denen unterschiedliche CPS zeitgleich kooperieren, werden *Cyber-Physische Produktionssysteme (CPPS)* genannt (REINHART ET AL. 2015). Voraussetzung für die Selbst-Organisation eines CPPS, etwa zur Bestimmung fehlender Fähigkeiten und notwendiger Rekonfigurationen zur Durchführung einer neuen Aufgabe, ist eine automatische Planung (BANNAT ET AL. 2011).

In der Montage wird nach MICHNIEWICZ & REINHART (2014) und REINHART ET AL. (2015) zwischen *Cyber-Physischen Produkten (CPP)* und *Cyber-Physischen Betriebsmitteln (CPD, für Cyber-Physical Device)* unterschieden. Die Selbstbeschreibung des CPP erlaubt eine automatische Betriebsmittelauswahl und aufgabenorientierte Programmierung der CPDs in einer Roboterzelle. Voraussetzung hierfür ist eine detaillierte Beschreibung der Anforderungen des Produktes und der Fähigkeiten der sich gegenseitig beeinflussenden Betriebsmittel, um diese simulativ vor der realen Durchführung der Montageoperationen abzusichern.

2.9.3 Digitaler Zwilling

Der Begriff *digitaler Zwilling* (engl.: *Digital Twin*) wurde als Paradigma eingeführt, das die digitale „Spiegelung“ der Eigenschaften eines realen Objektes zum Ziel hat. Der digitale Zwilling besteht aus miteinander verknüpften, einander gegenseitig

beeinflussenden Modellen, die durch Simulationen und Sensorinformationen aktualisiert werden können. (SHAFTO ET AL. 2010, GLAESSGEN & STARGEL 2012)

Der digitale Zwilling wird im Kontext der Produktion definiert als Datenstruktur miteinander verknüpfter physikalischer und funktionaler Modelle einer Ressource, eines Produktes oder eines Systems, das in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen Anwendung findet. Ziel ist die Befähigung der Produktion zur autonomen Entscheidungsfindung und Steuerung, basierend auf Leistungsindikatoren durch die Nutzung von Simulationen und Sensordaten in Planung und im Betrieb (BOSCHERT & ROSEN 2016). Der Aufbau bzw. die Aktualisierung von Simulationsmodellen sowie die Durchführung und Auswertung der Simulation sollen vereinfacht und idealerweise automatisiert werden. Das Konzept sieht eine produktionsphasenübergreifende Weiterverwendung der entstehenden Modelle und Informationen in unterschiedlichen Softwarewerkzeugen vor. Der Ursprung des digitalen Zwillings liegt bereits in der Produktentwicklung, während die Anreicherung mit zusätzlichen Daten und Modellen in Planung, Betrieb und Instandhaltung stattfindet. Ein Rückfluss der Informationen und gefällten Entscheidungen in die vorhergegangenen Planungsphasen ist Teil des Konzeptes. (ROSEN ET AL. 2015, KAHLEN ET AL. 2017)

2.9.4 Abgeleitete Anforderungen

Alle in Abschnitt 2.9 vorgestellten Ansätze stellen digitale Selbstbeschreibungen von Betriebsmitteln vor, die individuelle Fähigkeiten und Eigenschaften, geometrische und kinematische Informationen, Zustandsmodelle sowie Simulationsmodelle enthalten. Plug&Produce erhöht die Veränderungsfähigkeit von Montagesystemen durch reduzierte Aufwände bei der Rekonfiguration. Das Konzept Cyber-Physischer Produktionssysteme führt zusätzlich die digitale Selbstbeschreibung von Produkten ein. Die Selbst-Organisation eines CPPS-Montagesystems umfasst im Planungsfall der Einführung eines neuen Produktes auch Fragestellungen der Arbeitsablaufplanung. Das Konzept des digitalen Zwillings sieht eine durchgängige, phasenübergreifende automatische Verknüpfung und Nutzung von Simulationsmodellen und -werkzeugen aus unterschiedlichen Domänen vor. Die abgeleiteten Anforderungen lauten wie folgt:

- Modellierung der Ressourcen in Produktionssystemen unter Berücksichtigung ihrer individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten
- durchgängige, planungsphasenübergreifende Verknüpfung der Modelle von Produkt und Montagesystem in unterschiedlichen Simulationswerkzeugen
- automatische Verknüpfung und Ausführung der Simulationsmodelle aus unterschiedlichen Planungsphasen mitsamt der autonomen Bewertung und Entscheidungsfindung anhand simulativ bestimmter Leistungsindikatoren

2.10 Zusammenfassung und Ableitung von Bewertungskriterien

In Abschnitt 2 wurden die relevanten Grundlagen aus dem Bereich der Montage detailliert beschrieben und entsprechende Anforderungen an das zu entwickelnde Planungssystem abgeleitet. Ein Augenmerk lag dabei auf den Vorgängen sowie der Struktur des Produktes und des Produktionssystems in der Montage. Des Weiteren erfolgte eine Einordnung der vorliegenden Arbeit in die Phasen der Produktion. Der Fokus der Arbeit liegt auf der Arbeitsablaufplanung mit den vor- und nachgelagerten Planungsphasen sowie der Austaktung im Fall der Einführung eines neuen Produktes in einer bereits geplanten Montagelinie mit einer bekannten Menge an Stationen. Eine zentrale Herausforderung bei der Automatisierung der Arbeitsplanung stellt der Lösungsraum an Planungsalternativen dar, die sich aus der Veränderungsfähigkeit von Produkt und Montagesystem ergeben. Notwendige Definitionen zur Beschreibung dieser Lösungsräume wurden eingeführt. Des Weiteren erfolgte eine Vorstellung relevanter Aspekte aus dem Kontext der digitalen Fabrik, da geeignete digitale Modelle und Werkzeuge die Voraussetzung für die automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung bilden. Zusätzlich wurden gegenwärtige Ansätze zur Steigerung des Digitalisierungsgrades in der Produktion vorgestellt und deren Implikationen für das zu entwickelnde Planungssystem abgeleitet.

Im Folgenden werden sieben Kriterien abgeleitet, die die vorgestellten Anforderungen an eine automatische Arbeitsplanung zusammenfassen und zur Bewertung des Standes der Wissenschaft und Technik im nächsten Kapitel 3 dienen:

Kriterium 1 - Aufwände zur Generierung des Aufgabenmodells: Bewertet die manuellen Aufwände zur Erstellung des Aufgabenmodells sowie den Automatisierungsgrad bei der Analyse bestehender Produktdaten aus der Konstruktion mit Fokus auf industrielle 3D-CAD-Daten des Produktes. Des Weiteren werden die Aufwände zur Strukturierung des Produktes bewertet. Von besonderer Relevanz ist dabei die Möglichkeit der Strukturierung durch den Anwender, um dessen Wissen über einzuhaltende Vorrangbeziehungen in die Generierung der Aufgabenbeschreibung mit einfließen lassen zu können.

Kriterium 2 - Abgebildete Veränderungsfähigkeit und Vollständigkeit des Aufgabenmodells: Bewertet die Aufgabenbeschreibung im Hinblick auf die Modellierung der Operationsflexibilität, insbesondere unter Berücksichtigung unterschiedlicher Montagereihenfolgen und alternativer Montagevorgänge für ein Produkt. Die Abbildung der montagerelevanten Produktstruktur, der Montagebahnen sowie der unterschiedlichen Montagezustände mitsamt der Geometrie des Produktes

werden bewertet. Das Aufgabenmodell soll zur Ressourcenauswahl, zur Austaktung und zur aufgabenorientierten Programmierung geeignet sein.

Kriterium 3 - Aufwände zur Generierung des Fähigkeitenmodells des Montagesystems: Anzustreben ist eine möglichst automatisierte Generierung und Aktualisierung des Fähigkeitenmodells eines Montagesystems, das seine aktuelle Konfiguration mitsamt den durchführbaren Montagevorgängen abbildet. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Verwendung verfügbarer digitaler Daten des Montagesystems, etwa der 3D-CAD-Modelle aus der Montagesystemplanung, zur aufwandsarmen Generierung des Fähigkeitenmodells.

Kriterium 4 - Abgebildete Veränderungsfähigkeit und Vollständigkeit des Fähigkeitenmodells des Montagesystems: Bewertet das verwendete Fähigkeitenmodell eines Montagesystems hinsichtlich der Berücksichtigung mehrerer Stationen mitsamt des Materialflusses zwischen ihnen. Des Weiteren soll das Fähigkeitenmodell die Bestandteile der Stationen auf der Ebene individueller Ressourcen unter Berücksichtigung ihrer gegenseitigen Beeinflussung abbilden. Die Rekonfigurierbarkeit und Flexibilität eines Montagesystems sollen modelliert sein.

Kriterium 5 - Qualität der Absicherung der Montagevorgänge: Bewertet die Aussagekraft der verwendeten Methoden zur Analyse und Absicherung der Zuordnung von geforderten Montagevorgängen zu geeigneten Ressourcen. Die Absicherung soll Primär- und Sekundärvorgänge umfassen. Die Einbindung von Simulationsverfahren wie z. B. einer Kinematiksimulation zur Kollisions- und Erreichbarkeitsprüfung sowie die Berücksichtigung möglichst aller am Vorgang beteiligten Ressourcen steigern die Qualität der Absicherung.

Kriterium 6 - Automatisierungsgrad der Arbeitsplanung: Idealerweise erfolgen alle erwähnten Schritte der Arbeitsplanung vollständig automatisiert. Die Modellierung von Produkt, Prozess und Ressource soll durchgängig sein. Im Falle einer simulativen Absicherung ist eine aufgabenorientierte Programmierung des Simulationsmodells anzustreben. Des Weiteren soll eine automatisierte Austaktung und Bewertung alternativer Arbeitspläne hinsichtlich wirtschaftlicher Kriterien als Grundlage für eine objektive Auswahl erfolgen.

Kriterium 7 - Berücksichtigung nicht durchführbarer Montagevorgänge: Bewertet wird der Umgang bzw. die Qualität der generierten Planungsergebnisse im Falle von geforderten Montagevorgängen, die vom bestehenden Montagesystem nicht durchgeführt werden können. Als Teil der Arbeitsplanung sollen eine automatisierte Herleitung von Handlungsempfehlungen für Produktentwicklung, Betriebsmittelkonstruktion sowie hinsichtlich notwendiger Rekonfigurationen des Montagesystems erfolgen.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Stand der Wissenschaft und Technik gliedert sich in drei Bereiche, die aus der Zielsetzung und den abgeleiteten Anforderungen an die automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung hervorgehen. Abschnitt 3.1 beschäftigt sich mit Arbeiten aus dem Themenfeld der Generierung valider Montagereihenfolgen anhand von Beschreibungen des zu montierenden Produktes. Im englischsprachigen Raum wird dieses Themengebiet als *Assembly Sequence Planning (ASP)* bezeichnet (HOMEM DE MELLO & SANDERSON 1991). Der Fokus liegt auf Arbeiten, die als Planungsgrundlage Konstruktionsdaten in Form von 3D-CAD-Modellen des Produktes verwenden. Des Weiteren werden Methoden vorgestellt, welche die auf diese Weise generierten Montagereihenfolgen in nachgelagerten Planungsphasen verwenden. Abschnitt 3.2 stellt relevante Arbeiten aus dem Bereich der Austaktung vor. Abschnitt 3.3 widmet sich der Automatisierung relevanter Teilschritte der Arbeitsablaufplanung in der Montage. Am Ende jedes Abschnitts wird ein Fazit gezogen. Abschnitt 3.4 fasst die Defizite des Standes der Wissenschaft und Technik zusammen und bewertet diese anhand der zuvor abgeleiteten Bewertungskriterien (vgl. Abschnitt 2.10), um anschließend globale Handlungsbedarfe für die zu entwickelnde Planungsmethodik abzuleiten.

3.1 Assembly Sequence Planning

3.1.1 Einleitung

Aufgrund des großen Lösungsraumes und der daraus folgenden Komplexität der Aufgabe beschäftigt sich eine Vielzahl von Arbeiten mit der methodischen Unterstützung und Automatisierung bei der Bestimmung valider Montagereihenfolgen anhand einer Beschreibung des zu montierenden Produktes. Abschnitt 3.1.2 widmet sich den unterschiedlichen Ansätzen zur Modellierung von Montagereihenfolgen. In Abschnitt 3.1.3 werden unterschiedliche ASP-Methoden vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Betrachtung von Arbeiten, die ASP mit nachgelagerten Planungsphasen verknüpfen. Es erfolgt eine Darstellung des Standes der Wissenschaft in Bezug auf die Nutzung von ASP zur automatisierten Ressourcenauswahl (Abschnitt 3.1.4) sowie in Bezug zur aufgabenorientierten Programmierung (Abschnitt 3.1.5).

Beim ASP müssen zwei Arten von Bedingungen (eng. constraints) berücksichtigt werden. Die Nicht-Berücksichtigung von *absoluten Bedingungen* führt zu nicht ausführbaren Montagereihenfolgen. *Optimierungs-Bedingungen* hingegen haben die Erreichung einer möglichst hohen Qualität der Montagereihenfolgen zum Ziel (PAN

2005). Das Ergebnis des ASP ist eine valide Montagereihenfolge. Eine Voraussetzung für deren Validität ist, dass jede Baugruppe des Produktes kollisionsfrei montiert werden kann. Eine weitere Voraussetzung ist die Stabilität der Baugruppen während und nach dem Montagevorgang. (HOMEM DE MELLO & LEE 1991)

Assembly-by-Disassembly (Montage durch Demontage) bezeichnet einen Ansatz, bei dem eine valide Montagereihenfolge durch die systematische Demontage eines Modells des vollständig montierten Produktes und eine anschließende Umkehrung der so bestimmten, validen Demontagereihenfolge erzeugt wird (LEE 1989). *Assembly-by-Disassembly* ist nur für steife Produkte und ohne Berücksichtigung von physikalischen Effekten wie Gravitation und Reibung vollständig gültig (GHANDI & MASEHIAN 2015).

Im Bereich des ASP wird in einer Vielzahl von Arbeiten als Eingangsinformation zur Beschreibung des Produktes ein Graphenmodell verwendet, welches die Einzelteile als Knoten und die Beziehungen zwischen ihnen als Kanten repräsentiert. BOURJAULT (1984) bezeichnet diesen Graphen als *Liaison Graph*. Der *Liaison Graph* für das Beispielprodukt (Abb. 10 a)), dessen Einzelteile X, Y und Z in das Basisbauteil B gefügt werden, ist in Abb. 10 b) dargestellt. CHEN ET AL. (2008) stellen ein vergleichbares Modell vor und nennen es *Relational Model Graph*. Die Kanten können dabei verschiedene Informationen enthalten, wie Kontakte zwischen den Einzelteilen, die Art der Verbindung bzw. die geometrische Kompatibilität zwischen den Einzelteilen und Vorrangbeziehungen (HOMEM DE MELLO & LEE 1991, CHEN ET AL. 2008). Die Erstellung eines solchen Graphen erfordert folglich mehr Informationen, als in einem normalen CAD-Produktmodell enthalten sind (HU ET AL. 2002). Die Erstellung des *Liaison-Graph* kann durch Frage-Antwort-Techniken hinsichtlich der Vorrangbeziehungen zwischen den Einzelteilen manuell vom Nutzer durchgeführt und anschließend automatisiert in unterschiedliche Darstellungen von Montagereihenfolgen, wie z. B. Vorranggraphen oder UND/ODER-Graphen überführt werden (BOURJAULT 1984, 1987, DE FAZIO & WHITNEY 1987). Eine vergleichbare, graphenbasierte Modellierung der Produktstruktur ist die *Assembly Relation Matrix*, die mittels Kollisionsprüfungen automatisiert aus einem 3D-CAD-Modell generiert werden kann, deren Kanten allerdings ausschließlich Kontakte und Überschneidungen der Einzelteile im Produktmodell abbilden (XU ET AL. 2012, ZHANG ET AL. 2016).

Zur Minimierung der Aufwände bei der Erstellung von Planungsdaten und zur Vermeidung von redundanten Planungsschritten, sollen als Eingangsinformation für das ASP die Ergebnisse aus der Konstruktion, also 3D-CAD-Produktdateien, Verwendung finden. Arbeiten aus dem Bereich ASP, die diese nicht einbeziehen, liegen nicht im Fokus der weiteren Betrachtung. Keines der bekannten

kommerziellen CAD-Systeme besitzt von sich aus die Fähigkeit, automatisch Montagereihenfolgen abzuleiten (OU & XU 2013).

Voraussetzung für die simulative Validierung der Montagereihenfolge unter Berücksichtigung der verfügbaren Ressourcen in einer Kinematiksimulation ist die Kenntnis der kollisionsfreien relativen Montagebewegungen der Baugruppen. Des Weiteren ist für eine aussagekräftige Kollisions- und Erreichbarkeitsprüfung die Abbildung der dazugehörigen Montagezustände bei den validen Montagereihenfolgen zwingend notwendig. Daher werden im folgenden Arbeiten vorgestellt, die beim ASP ebenfalls die Demontierbarkeit der Baugruppen und Einzelteile durch eine Überprüfung der Existenz einer kollisionsfreien Montagebahn sicherstellen. Die Generierung einer kollisionsfreien Montagebahn wird im englischsprachigen Raum als *Assembly Path Planning* (APP) bezeichnet. GHANDI & MASEHIAN (2015) geben eine umfangreiche Übersicht über den Stand der Wissenschaft im Bereich APP.

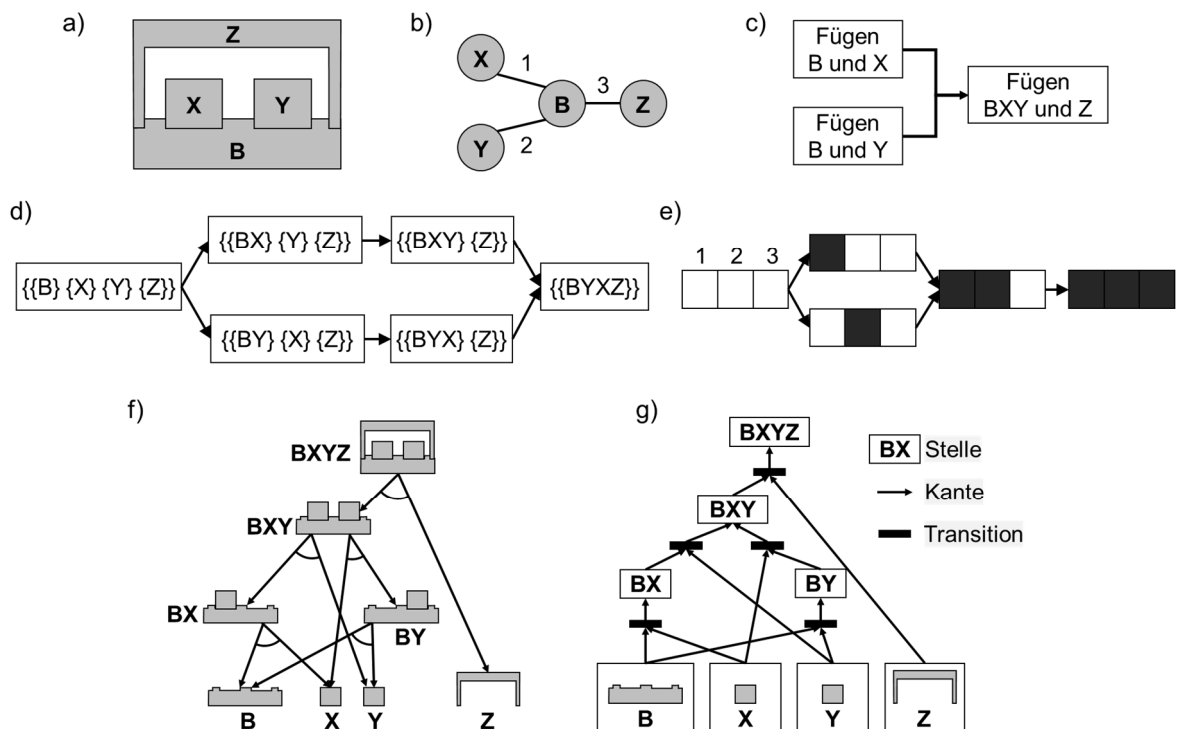


Abbildung 10: a) Beispielprodukt mit 4 Einzelteilen b) Liaison Graph
c) Vorranggraph d) Gerichteter Graph validier Montagesequenzen
e) Diamant Graph f) UND/ODER-Graph g) Petri-Netz

3.1.2 Modellierung von Montagereihenfolgen

Im nachfolgenden Abschnitt werden unterschiedliche Ansätze zur Modellierung von Montagereihenfolgen aus der Literatur anhand des in Abb. 10 a) dargestellten Beispielproduktes vorgestellt.

3.1.2.1 Montagevorranggraph

Der *Vorranggraph* bzw. *Montagevorranggraph* (engl *Precedence Graph*) ist eine weit verbreitete, graphenbasierte Möglichkeit der Darstellung von Montage-reihenfolgen (Abb. 10 c)). Die Knoten repräsentieren Montagevorgänge und können um weitere Informationen wie valide Ressourcen zur Durchführung der Montagevorgänge, Montagebahnen oder Dauern der Vorgänge erweitert werden. Die Knoten werden zum Zeitpunkt ihrer frühestmöglichen Durchführbarkeit eingetragen. Die gerichteten Kanten verbinden den jeweils unmittelbar vorangehenden mit dem unmittelbar nachfolgenden Montagevorgang. Der spätestmögliche Zeitpunkt zur Durchführung des Montagevorgangs ist somit mit der von ihm ausgehenden Kante klar festgelegt. Ein Montagevorgang kann nur dann durchgeführt werden, wenn alle Montagevorgänge mit auf ihn zeigenden Kanten erfolgreich abgeschlossen wurden. Der Montagevorranggraph erlaubt die Darstellung unterschiedlicher Montage-reihenfolgen in einem Graphen, sodass der exakte Montagezustand in einem Knoten ohne die Auswahl einer exakten Montagereihenfolge nicht ersichtlich ist. Vormontagen können modelliert werden. Der Vorranggraph sieht eine Ergänzung um Sekundärvorgänge vor. Durch die Auswahl einer Montagereihenfolge kann ein Vorranggraph in ein Fischgrätendiagramm überführt werden. (PRENTING & BATTAGLIN 1964, BULLINGER 1986, CHEN ET AL. 2002)

Zur Reduktion der Komplexität in der Planung und Darstellung von Montage-reihenfolgen schlagen NIU ET AL. (2003) einen Ansatz zur Untergliederung des Vorranggraphen vor. Dabei werden Vormontagen und Bauteilgruppen, deren Montagereihenfolgen separat betrachtet werden können, auf unterschiedlichen Hierarchieebenen in eigenständigen Vorranggraphen abgebildet. RIGGS & HU (2013) stellen eine Methode zur automatischen Gruppierung von Knoten zu Clustern und Vormontagen anhand der Ähnlichkeit der Beziehungen zwischen den Knoten vor.

3.1.2.2 Gerichteter Graph valider Montagesequenzen

Die Knoten des *gerichteten Graphen valider Montagesequenzen* repräsentieren stabile Montagezustände des Produktes in Form von vorhandenen bzw. fehlenden Kontakten zwischen seinen Einzelteilen (Abb. 10 d)). Einzelteile, die in einem Montagezustand in Kontakt zueinander stehen und somit eine stabile Baugruppe bilden, werden in Form der entsprechenden Bauteilnamen, die von geschweiften Klammern umschlossen sind, dargestellt. Die gerichteten Kanten repräsentieren mögliche Zustandsübergänge zwischen den Montagezuständen und entsprechen somit Montagevorgängen. Eine Montagereihenfolge wird dargestellt durch einen Weg vom Startknoten bis zum Endknoten des Graphen. Ein Anfangsknoten weist

stets einen Kontakt weniger zwischen seinen Einzelteilen auf als sein Zielknoten. (HOMEM DE MELLO & LEE 1991)

3.1.2.3 Diamant Graph

In der Arbeit von DE FAZIO & WHITNEY (1987) wird der *Diamant Graph* zur Abbildung unterschiedlicher Montagereihenfolgen eingeführt (Abb. 10 e)). Die Kanten des Diamant Graph setzen sich aus Quadraten zusammen, deren Anzahl der Menge an Liaisons, also der Beziehungen zwischen Einzelteilen in ihrer Einbaulage, entspricht. Ein gefülltes Quadrat entspricht einer hergestellten Beziehung, z. B. einem Kontakt zwischen Einzelteilen. Im Ausgangszustand liegen nur Einzelteile ohne Kontakte vor, daher sind alle Quadrate unausgefüllt. Im Endzustand sind entsprechend alle Quadrate ausgefüllt. Die gerichteten Kanten stellen die möglichen aufeinanderfolgenden Zustandsübergänge dar, die den Montagevorgängen der Baugruppen entsprechen. Eine Montagereihenfolge entspricht einem Weg vom Ausgangszustand bis zum Endzustand.

3.1.2.4 UND/ODER-Graph

UND/ODER-Graphen (engl.: *AND/OR-Graph*) sind bipartite Graphen, die zwei zueinander disjunktive Knotenmengen erhalten. Ein Graph ist bipartit, wenn die Knoten zwei Teilmengen zugeordnet werden können, innerhalb derer keine Adjazenz zwischen den Knoten besteht. (DIESTEL 2010)

Die Knoten des Graphen repräsentieren stabile Montagezustände des Produktes (Abb. 10 f)). Die gerichteten Hyperkanten, die mindestens zwei Knoten eines niedrigeren Montagezustandes mit einem Knoten eines höheren Montagezustandes verbinden, symbolisieren mögliche Montagevorgänge. Die entsprechenden Montagezustände sind eindeutig definiert. Eine valide Montagereihenfolge in einem UND/ODER-Graphen ist ein Teilgraph, in dem - ausgehend vom Knoten, welcher das montierte Produkt repräsentiert - von jedem Knoten jeweils nur eine Hyperkante auf zwei Knoten eines niedrigeren Montagezustandes zeigt. Die Endknoten des Teilgraphen stellen die Einzelteile des Produktes dar. Im Vergleich zu gerichteten Graphen valider Montagesequenzen weist der UND/ODER-Graph eine reduzierte Knotenmenge auf. Die bipartiten Kanten des UND/ODER-Graphen eignen sich besonders gut zur Darstellung von primären Fügevorgängen, da sie stets zwei untergeordnete Montagezustände mit einem übergeordneten Montagezustand verbinden. (HOMEN DE MELLO & SANDERSON 1990, HOMEM DE MELLO & SANDERSON 1991)

3.1.2.5 Petri-Netze

Petri-Netze finden in Systemen mit verteiltem Zustand Anwendung. Es handelt sich um bipartite, gerichtete Graphen. In einem Petri-Netz wird die Knotenmenge unterteilt in zwei Klassen: *Stellen* und *Transitionen*. Stellen, auch passive Knoten genannt, repräsentieren mögliche Zustände eines Systems. Die Markierung eines Knotens stellt den aktiven Zustand des Systems dar. Übergänge zwischen den Zuständen werden durch Transitionen ausgelöst. Gerichtete Kanten verbinden Stellen mit Transitionen oder umgekehrt. (PRIESE & WIMMEL 2008)

Bei der Repräsentation von Montagevorgängen repräsentieren Stellen die validen Produktzustände im Montageverlauf. Transitionen stellen primäre Montagevorgänge dar. Gerichtete Kanten geben Beziehungen zwischen den Stellen und Transitionen wieder, also welche Montagevorgänge bzw. Montagezustände aufeinander folgen können (Abb. 10 g)). (ZHANG 1989, ZHA ET AL. 1998, ROSELL 2004)

3.1.3 Assembly Sequence Planning basierend auf 3D-CAD-Produktdaten

Im Fokus vieler Arbeiten im Bereich des ASP steht die Optimierung der Montagereihenfolge nach unterschiedlichen Kriterien. Eine Übersicht über den Stand der Wissenschaft in diesem Bereich geben RASHID ET AL. (2012) und JIMÉNEZ (2013). Zu den häufigsten Zielgrößen der Optimierung zählen eine Minimierung der Änderungen von Montagerichtungen, von Werkzeugwechseln sowie von unterschiedlichen Arten von Prozessen bei aufeinanderfolgenden Montagevorgängen. Ein weiterer Aspekt ist die Maximierung der Stabilität der Montagezustände bzw. der Baugruppen während der Montage. Dabei kommen diverse Optimierungsansätze zur Anwendung, wie genetische Algorithmen, Ameisenalgorithmen und Partikelschwarmoptimierung. Eine Vielzahl von Arbeiten geht dabei von einem existierenden, in der Regel graphenbasierten Modell der Montagereihenfolge bzw. der Vorrangbeziehungen zwischen den Einzelteilen aus (vgl. (DE LIT ET AL. 2001, QIANG ET AL. 2002, ZHOU ET AL. 2011, WANG & TIAN 2016)). Die graphenbasierten Methoden sind dabei in der Lage, eine optimale Montagereihenfolge zu generieren. Insbesondere bei Produkten mit vielen Einzelteilen stoßen diese an ihre Grenzen, da die Rechenzeit bei diesen Ansätzen mit zunehmender Teileanzahl exponentiell steigt (RASHID ET AL. 2012). Arbeiten, die ASP ausschließlich als Optimierungsproblem ohne simulative Absicherung der Kollisionsfreiheit betrachten und ein Modell valider Montage-reihenfolgen bzw. sämtlicher Vorrangbeziehungen zwischen den Baugruppen als Eingangsgröße benötigen, werden im Folgenden nicht näher betrachtet.

Um ausgehend von einem 3D-CAD-Produktmodell eine valide Montagereihenfolge zu generieren, muss für jede Baugruppe mindestens ein valider Montagezustand des Produktes bestimmt werden, der eine kollisionsfreie Demontage der Baugruppe ermöglicht. Dazu erfolgt eine virtuelle Demontage des Produktmodells, indem sukzessive für alle Einzelteile bzw. Baugruppen kollisionsfreie Pfade von ihrer Endeinbaulage zu einer Position mit genügend Abstand zu den im Produktmodell verbleibenden Einzelteilen bestimmt werden. APP kann in zwei Phasen unterteilt werden. Zunächst muss eine Montagebewegung ermittelt werden, die eine Auflösung des Kontaktes der zu demontierenden Baugruppe mit den initial in Kontakt stehenden Baugruppen ermöglicht (vgl. Fügeplanung), etwa bei einer linearen Demontagebewegung eines Stiftes aus einer Bohrung. Nach dem Kontaktverlust der Baugruppe kann die Bahnplanung als Bewegung eines Objektes zwischen stationären Hindernissen beschrieben werden. Die zweite Phase des APP kann als reines Bahnplanungsproblem betrachtet werden (SCHWARTZ 1983). Kann für eine Baugruppe in einem Montagezustand kein kollisionsfreier Montageweg gefunden werden, verbleibt die Baugruppe in ihrer Ursprungsposition und die Prüfung der Demontierbarkeit wird mit einer anderen Baugruppe fortgesetzt. (HOMEM DE MELLO & LEE 1991, JIMÉNEZ 2013, GHANDI & MASEHIAN 2015)

Des Weiteren existieren Arbeiten, die im Kontext des ASP eine Stabilitätsbewertung der Baugruppen während und nach den Montagevorgängen in die Generierung von Montagereihenfolgen einbinden (vgl. MOSEMAN ET AL. (1998) und RAKSHIT & AKELLA (2015)). Aufgrund des Betrachtungshorizonts dieser Arbeit, der physikalische Effekte wie Reibung und Gravitation ausschließt, wird auf diese nicht gesondert eingegangen.

Die rechenaufwändige Bestimmung der kollisionsfreien Montagebewegung sollte möglichst selten durchgeführt und deren Freiheitsgrade möglichst minimiert werden, um die Gesamteffizienz der Planung zu erhöhen. Im nachfolgenden Abschnitt werden unterschiedliche Ansätze zur Lösung dieser Problemstellungen vorgestellt und die Qualität der automatisiert generierten Ergebnisse betrachtet. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf Systemen, die kommerzielle CAD-Systeme einbinden.

Zur Reduktion der Anzahl an Aufrufe zur Bestimmung eines kollisionsfreien Pfades jedes Einzelteils existieren unterschiedliche Ansätze. Eine Möglichkeit ist die Vorsortierung der Einzelteile anhand ihrer relativen Position im montierten Produkt. Dabei werden außen liegende Bauteile hinsichtlich ihrer Demontierbarkeit priorisiert geprüft. Dies kann ausgehend vom Schwerpunkt des Produktes radial (THOMAS & WAHL 2010) oder in Richtung einer definierten Achse, etwa in Hauptmontagerichtung des Produktes, erfolgen (MICHNIEWICZ ET AL. 2016). Des Weiteren kann eine manuelle Priorisierung der Bauteile durch den Nutzer erfolgen, indem er diese

Kategorien zuordnet, wie z. B. Basisbauteil, Gehäuse, Verkleidungsteile oder Verbindungselemente wie Schrauben. Die Kategorisierung der Einzelteile kann auch basierend auf dem Namen des Bauteils im digitalen Produktmodell automatisiert erfolgen (OU & XU 2013, PINTZOS ET AL. 2016). HU ET AL. (2002) schlagen eine Priorisierung der Bauteile anhand der Montagedauer vor, wobei als nächstes zu demontierendes Einzelteils stets jenes mit der geringsten Demontagezeit ausgewählt wird. Die Bestimmung der Demontagezeit wird dabei nicht im Detail erläutert und ist ein vorgelagerter, manueller Prozess. Im System von XU ET AL. (2012, 2014) bilden die Ausgangsinformation ein integriertes objektorientiertes Datenmodell des Produktes, das neben dem CAD-Modell des Produktes hierarchische Informationen hinsichtlich der geforderten Montagevorgänge mitsamt den Prozessparametern und Bewegungsrichtungen der Bauteile sowie Vormontagen enthält. Aus dem 3D-CAD-Modell des Produktes wird automatisiert eine Assembly-Relation-Matrix erstellt, welche die Kontaktbeziehungen zwischen allen Bauteilen eines Produktes zusammenfasst und von ZHANG ET AL. (2016) weiterentwickelt wurde. Diese dient als Grundlage für die heuristische Generierung einer Vorsortierung, welche anschließend mit Hilfe unterschiedlicher Algorithmen nach vom Nutzer gewichteten Kriterien optimiert wird. Beispielsweise sei die Übereinstimmung des Bauteiltyps oder der Montagerichtung der nacheinander zu montierenden Bauteile genannt. Die mit einer der vorgestellten Methoden generierte Vorsortierung wird anschließend an einen automatischen Montagebahnplanungsalgorithmus übergeben.

Zur effizienten Bestimmung der initialen Richtung der kollisionsfreien Montagebahn sind folgende Ansätze bekannt. Unterschiedliche wissensbasierte Systeme nutzen zur Bestimmung die Analyse der Kontakte des zu demontierenden Einzelteils mit anderen Einzelteilen (WILSON & LATOMBE 1994, HU ET AL. 2002). Dazu wird eine Wissensbasis erstellt, welche die Kontakte kategorisiert und diese entsprechenden Bewegungsrichtungen zuordnet, die eine kollisionsfreie Bewegung bis hin zum Kontaktverlust zwischen den Einzelteilen sicherstellen soll. Exemplarische Ansätze sind die Bewegung in Normalenrichtung im Falle eines Flächenkontaktes oder die Bewegung entlang der Symmetrieachse bei einem Kontakt zwischen Zylinder und Bohrung. Des Weiteren können auch geometrische Bedingungen zwischen Einzelteilen, die bei der Konstruktion im CAD-Konstruktionswerkzeug vorgegeben werden, als Informationsquelle verwendet werden, wie z. B. die Kongruenz oder der Flächenkontakt (OU & XU 2013, PINTZOS ET AL. 2016). MICHNIEWICZ ET AL. (2016) beziehen als eine weitere optional zu prüfende initiale Montagerichtung die Achsrichtungen der Koordinatensysteme des zu prüfenden Einzelteils sowie des Basisbauteils mit ein. XU ET AL. (2012) und PINTZOS ET AL. (2016) sehen zudem die manuelle Vorgabe der Hauptmontagerichtung jedes einzelnen Bauteils vor.

Ergebnis der ASP-Systeme von HU ET AL. (2002) und PINTZOS ET AL. (2016), die in kommerziellen CAD-Konstruktionswerkzeugen umgesetzt wurden, ist eine lineare und monotone Montagereihenfolge ohne Berücksichtigung von Vormontagen, welche im CAD-Softwarewerkzeug visualisiert werden kann. Die von OU & XU (2013) vorgestellte Methode besitzt ähnliche Eigenschaften, bezieht allerdings eine Bewertung der alternativen Montagereihenfolgen, basierend auf Stabilitätskriterien der Baugruppen und Montagezustände während der unterschiedlichen Montageoperationen, mit ein. Des Weiteren erstellt das System automatisiert Bilder der Montageschritte durch Screenshots des Modells. Ergebnis des Systems AutoAssem (XU ET AL. 2012) ist eine Montagereihenfolge, dargestellt in einem Fischgrätendiagramm, das aufgrund des leichten Verständnisses der Visualisierung des Ergebnisses im Vergleich mit anderen Darstellungsformen gewählt worden ist. Die Gräten bilden dabei Vormontagen ab, wobei die Generierung der Vormontagen jedoch nicht im Detail erläutert wird. Zusätzlich können die Montagebewegungen der Bauteile in der generierten Montagereihenfolge visuell im 3D-Modell dargestellt und in 2D-Montageanleitungen überführt werden.

Eine zusätzliche Herausforderung bei der automatisierten Generierung von Montagereihenfolgen besteht in der sinnvollen Aneinanderreihung von miteinander in Beziehung stehenden Einzelteilen. Beispielfhaft seien die Berücksichtigung von Clustern sowie die Montage von Verbindungselementen wie Schrauben genannt, die direkt auf das von ihnen zu fixierende Einzelteil folgen sollte. In den meisten Ansätzen erfolgt dies, indem Baugruppen vom gleichen Typ oder Baugruppen, denen der selbe Werkzeug- oder Prozesstyp zugeordnet wurde, nacheinander hinsichtlich ihrer Demontierbarkeit überprüft werden (vgl. KAUFMANN ET AL. (1996), OU & XU (2013), XU ET AL. (2014)).

Zur automatisierten Erkennung von Vormontagen und Modul-Baugruppen existieren unterschiedliche Ansätze. Eine Vielzahl von Arbeiten verwendet dabei als Ausgangsinformation einen Liaison-Graphen. Dabei erfolgt die Erkennung von Vormontagen und Modul-Baugruppen durch die Suche nach Aufteilungen des Liaison-Graphen in möglichst voneinander unabhängige Teilgraphen, die möglichst wenige Liaisons miteinander verbinden (vgl. SHPITALNI ET AL. (1989), LEE (1994), GU & YAN (1995)). Dieser Vorgang wird nach HOMEM DE MELLO & LEE (1991) Bi-Partitionierung genannt. Ein anderer Ansatz ist die wissensbasierte Detektion im Liaison Graph durch die Erkennung vordefinierter Teilgraphen (vgl. SWAMINATHAN & BARBER (1996), GUPTA & KRISHNAN (1998)). Weitaus weniger Arbeiten verwenden für die Erkennung von Vormontagen und Modul-Baugruppen 3D-CAD-Produktdaten. MORADI ET AL. (1997) stellen eine Methode vor, die Bauteile in einem geometrischen Modell anhand der Übereinstimmung ihrer Demontagerichtung und ihrer parallelen oder sequentiellen Montierbarkeit in Gruppen zusammenfasst.

BELHADJ ET AL. (2016) bestimmen automatisiert Vormontagen aus einem 3D-CAD-Produktmodell. Im ersten Schritt werden anhand einer Bewertung der Bauteileigenschaften, z. B. hinsichtlich Bauteilgröße und Kontaktanzahl, automatisiert mögliche Basisbauteile für die Vormontagen bestimmt. Die Definition der Vormontage-Baugruppen erfolgt durch die anschließende Zuordnung der verbleibenden Einzelteile zu den Basisbauteilen anhand von Kontaktkriterien. Eine Bestimmung valider Montagereihenfolgen für die Vormontagen findet nicht statt.

Das Stanford Assembly Analysis Tool (STAAT) ist ein System zur automatischen Generierung und Evaluierung von Montagereihenfolgen anhand von CAD-Produktmodellen (ROMNEY ET AL. 1995). Zur Auswahl der einfachsten Montagereihenfolge werden diese nach unterschiedlichen Komplexitätskriterien bewertet, wie z. B. Linearität der Montagereihenfolge, Einheitlichkeit der Fügerichtungen der Baugruppen und Einfachheit der Fügebewegungen für ein Bauteil. Zur Beschreibung valider Montagebewegungen der Baugruppen des Produktes wird die kompakte Struktur der *Non Directional Blocking Graphs (NDGB)* verwendet. NDGB wurden von WILSON & LATOMBE (1994) eingeführt und dienen der Speicherung der gegenseitigen Behinderung von Baugruppen in beliebigen Bewegungsrichtungen in Form von Regionen auf einer Kugeloberfläche. Dies erlaubt die Bestimmung freier Bewegungsrichtungen von Baugruppen mittels eines Projektionsverfahrens. Ergebnis sind valide Montagereihenfolgen, dargestellt als UND/ODER-Graphen.

Fazit

Die vorgestellten Arbeiten zeigen unterschiedliche Ansätze zur automatisierten Generierung von Montagereihenfolgen. Zur vereinfachten Einbindung der Konstruktion und zur Vermeidung redundanter Daten sollen möglichst unveränderte CAD-Produktmodelle verwendet werden. Es wurden unterschiedliche Ansätze zur Verwendung des in den Modellen enthaltenen Wissens vorgestellt, wie etwa die Kategorisierung der Einzelteile anhand ihrer Namen oder die Verwendung geometrischer Bedingungen zwischen den Einzelteilen, welche im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls Berücksichtigung finden sollen. Ziele sind dabei die Reduktion des Lösungsraumes und die Vermeidung von redundanten Nutzereingaben.

Voraussetzung für eine industriell anwendbare automatische Reihenfolgebildung ist die Möglichkeit zur Ermittlung von montagerelevanten Produktstrukturen wie Vormontagen, Clustern und Modul-Baugruppen (vgl. Abschnitt 2.3.2). Eine Weitergabe sämtlicher theoretisch möglicher Montagereihenfolgen an die nachgelagerten Planungsphasen, welche die genannten Strukturen und die daraus folgenden Zwangsbeziehungen ignorieren, wird aufgrund der unnötigen Erweiterung des sehr großen Lösungsraumes als nicht notwendig angesehen. Keine der vorgestellten Arbeiten geht hinreichend auf diese Fragestellungen ein. Des Weiteren

ist aufgrund des Rechenaufwandes bei der simulativen Prüfung in den nachgelagerten Planungsphasen eine Reduktion der Menge unterschiedlicher Montagevorgänge und Montagezustände anzustreben, ohne dabei gegebenenfalls geeignete Alternativen auszuschließen.

3.1.4 Assembly Sequence Planning in Kombination mit automatisierter Ressourcenauswahl

Die meisten Arbeiten im Bereich des ASP reduzieren die Komplexität der Fragestellung und berücksichtigen die Ressourcen nicht, obwohl die geometrischen Einschränkungen, die sich etwa durch Spannvorrichtungen und Endeffektoren ergeben, erheblichen Einfluss auf die Montage eines Produktes haben (GHANDI & MASEHIAN 2015).

WILSON (1998) führt im ASP den Begriff der *werkzeugabhängigen Bedingungen* (engl.: tool constraints) ein. Dieser wird definiert als die Sicherstellung, dass ein geeignetes Werkzeug während seiner Zuordnung zu einem Montagevorgang nicht mit dem Produkt kollidiert. Eine Montagereihenfolge, bei der das zu einem Montagevorgang zugehörige Werkzeug kollidiert, ist nicht valide. Dabei wird der vom Werkzeug beim Montagevorgang benötigte Arbeitsraum berücksichtigt, indem die Geometrie des Werkzeugs direkt als notwendiger Arbeitsraum modelliert wird. Beispielhaft sei das von einem Schraubenschlüssel bei der Fixierung einer Schraube benötigte zylinderförmige Volumen genannt. Die Vorgabe der Position dieses Arbeitsraumes in Relation zu den zugehörigen Baugruppen ist ein manueller Prozess. Die Kollisionsprüfung erfolgt in einem dreidimensionalen Modell. Das Ergebnis ist eine lineare Montagereihenfolge, in der den Montagevorgängen geeignete Ressourcen, deren Kollisionsfreiheit sichergestellt ist, zugeordnet sind. Der gleichzeitige Kontakt des Produktes mit mehreren Ressourcen während eines zweihändigen Montagevorgangs, etwa eines Greifers zur Fixierung eines Einzelteils sowie einer Spannvorrichtung zur Fixierung des Basisbauteils, wird nicht betrachtet.

CHAUDRON ET AL. (2005) stellen ein System zur automatischen Erstellung valider Montagereihenfolgen aus 3D-CAD-Modellen eines Produktes in einer kommerziellen CAD-Software (Catia V5) durch deren Verknüpfung mit einem bereits vorliegenden UND/ODER-Graphen des Produktes vor. 3D-CAD-Modelle von Werkzeugen werden berücksichtigt, indem der Nutzer diese manuell relativ zu den dazugehörigen Baugruppen platziert. Zur Prüfung der Kollisionsfreiheit während der Montagevorgänge werden die Baugruppen mitsamt der Endeffektoren im CAD-Modell des Produktes automatisiert verschoben und auf Kollisionen mit anderen Baugruppen in unterschiedlichen Montagezuständen geprüft. Das System erfordert

manuelle Vorgaben wie die Definition des UND/ODER-Graphen, der Zugehörigkeit von Einzelteilen zu Vormontagen und die Vorgabe der Basisbaugruppe.

Das System von HASSAN & YOON (2010) generiert - ausgehend vom 3D-CAD-Modell des zu montierenden Produktes unter Berücksichtigung verfügbarer Greifer - mittels eines genetischen Algorithmus eine optimale Montagereihenfolge in Hinblick auf eine minimale Anzahl von Werkzeug- und Orientierungswechseln der Baugruppen. Die Zuordnung der Greifer zu den Baugruppen sowie die Positionierung der zu montierenden Baugruppen vor dem Fügevorgang an einem Bereitstellungsort erfolgen manuell durch den Nutzer. Eine geometrische Betrachtung der Greifer erfolgt nicht. Die Pfadplanung hin zur Zielposition erfolgt ausgehend vom Bereitstellungsort automatisch. Das Ergebnis ist eine optimale Montagereihenfolge, bei der jedem Montagevorgang ein geeigneter Greifer zugeordnet ist.

MISHRA & DEB (2016) beschreiben eine Methode, die Ansätze zur genetischen Optimierung von Montagereihenfolgen mit einer automatischen wissensbasierten Werkzeugauswahl kombiniert. Der Fokus liegt auf Schraubspindeln und Greifern. Die Werkzeuge sind durch typenabhängige Eigenschaften beschrieben, wie z. B. durch Greifkräfte und Backenabstände im Falle von Greifern oder durch Drehmomente im Falle von Schraubspindeln. Des Weiteren erfolgt eine Vorgabe der Eigenschaften der Einzelteile durch den Nutzer. Die Anforderungen der zu montierenden Bauteile und die Fähigkeiten der Werkzeuge werden regelbasiert verglichen, um geeignete Werkzeug-Einzelteil-Paarungen zu bestimmen. Die Vorrangbeziehungen zwischen den Einzelteilen werden aus dem 3D-CAD-Modell des Produktes abgeleitet. Der genetische Planungsalgorithmus berücksichtigt bei der Bewertung alternativer Reihenfolgen die Anzahl notwendiger Werkzeugwechsel. Eine simulative Prüfung der Kollisionsfreiheit der Werkzeuge oder eine Betrachtung der Verkettung von Stationen innerhalb eines Montagesystems erfolgen nicht.

Fazit

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Arbeiten zeigen unterschiedliche Ansätze zur Berücksichtigung von Ressourceneigenschaften und -modellen im ASP. Dabei kommen die in den CAD-Werkzeugen ohnehin integrierten Analysemethoden zur Kollisions- und Kontaktprüfung zum Einsatz. Voraussetzung für die korrekte Positionierung der CAD-Modelle der Ressourcen in Relation zum Produktmodell ist die Kenntnis der Lage der Schnittstellen der entsprechenden Elemente. Des Weiteren verdeutlichen die vorgestellten Ansätze die Notwendigkeit, den gesamten von einer Ressource benötigten hindernisfreien Arbeitsraum bei der Auswahl zu berücksichtigen. An dieser Stelle soll die sich je nach Zustand der Ressource ändernde Geometrie, etwa im Falle eines Backengreifers, erwähnt werden.

Die vorgestellten Arbeiten betrachten die Ressourcenauswahl als isolierte Fragestellung. Dabei liegt der Fokus auf Ressourcen, die direkt im Kontakt mit den Einzelteilen des Produktes stehen. Das Anlagenlayout oder die Möglichkeit, Ressourcen zu kombinieren, werden nicht in die Planung eingebunden.

3.1.5 Assembly Sequence Planning zur aufgabenorientierten Programmierung von Robotersystemen

Archimedes 2 kann als das erste System bezeichnet werden, das eine aufgabenorientierte Programmierung eines Roboters basierend auf einer automatisierten Analyse von 3D-CAD-Produktdaten ermöglicht hat (KAUFMANN ET AL. 1996A, 1996B). Zur Generierung und Auswahl unterschiedlicher Montagereihenfolgen wird ein 3D-CAD-Modell des zu montierenden, steifen Produktes um Zusatzinformationen erweitert. Der Nutzer gibt die Art der Verbindung zwischen Einzelteilen sowie einzuhaltende Vormontagen, einzuhaltende Montagerichtungen der Bauteile und zur Durchführung der Montagevorgänge geeignete Betriebsmittel mitsamt der räumlichen Relation zu den Bauteilen vor. Durch eine fortlaufende Unterteilung der Baugruppen in jeweils zwei Unterbaugruppen (vgl. Bi-Partitionierung nach HOMEM DE MELLO & LEE (1991)) werden mögliche Montagevorgänge generiert und die Kollisionsfreiheit der Relativbewegung der Unterbaugruppen geprüft. Jede Teilung des Produktes in Unterbaugruppen, die kollisionsfrei montiert werden können, wird als valide betrachtet und als Montagevorgang gespeichert. Das Produktmodell wird dabei um die Greifer-Modelle erweitert. Aufgrund der Kenntnis der relativen räumlichen Position der Baugruppen und der Betriebsmittel im 3D-Modell kann automatisiert der Steuerungscode für einen SCARA-Roboter mitsamt Abbildungen der Montagezustände generiert werden. Die Bewertung der als Zustandsgraph abgebildeten Montagereihenfolgen erfolgt hinsichtlich des Aufwandes zur Orientierung der Einzelteile sowie der Anzahl benötigter Werkzeuge. Die Rekonfiguration der Station und die Aufteilung der Montagevorgänge auf mehrere Stationen werden nicht betrachtet.

An der RWTH Aachen wird an einem kognitiven Ansatz zur Planung und betriebsparallelen Steuerung der Montage eines Produktes in Montagesystemen, basierend auf dem Assembly-by-Disassembly-Ansatz nach KAUFMANN ET AL. (1996), gearbeitet. Der Zustandsgraph zur Darstellung der Montagereihenfolge enthält neben Montagezuständen die Montagerichtungen der Montagevorgänge sowie Features zur detaillierten Beschreibung der Einzelteile, etwa zur Kennzeichnung von Schrauben und Greifflächen. Im nächsten Planungsschritt werden die Montagezustände im Graphen kognitiv mit jenen in der realen Anlage

oder in einer Simulation in Übereinstimmung gebracht. Die Kanten des Graphen werden mit Kosten bewertet, die z. B. Werkzeugwechsel und die Verfügbarkeit der zu montierenden Einzelteile in der Zelle berücksichtigen. Die Auswahl einer optimalen Montagereihenfolge erfolgt mittels eines Graphensuchalgorithmus, der im Zustandsgraphen, ausgehend vom aktuellen Montagezustand, den besten Weg zum finalen Montagezustand sucht. Die Zuordnung der Baugruppen zu geforderten Ressourcen erfolgt manuell. Anwendungsfall ist eine Station mit zwei parallel arbeitenden Robotern. Im Falle eines nicht durchführbaren Montagevorgangs wird die Einbindung eines Menschen zur Problembekämpfung oder zur Durchführung des Montagevorgangs vorgeschlagen. Rekonfigurationen des Produktionssystems werden nicht betrachtet. (EWERT ET AL. 2010, BÜSCHER ET AL. 2013)

Mehrere aufeinander aufbauende Arbeiten an der TU Braunschweig beschäftigen sich mit ASP zur Programmierung von Robotersystemen. RÖHRDANZ ET AL. (1997) stellen das System HighLAP vor, welches zur automatischen Erstellung von Montagereihenfolgen anhand von 3D-CAD-Modellen des zu montierenden Produktes dient. Kontaktstellen, die sich an den Oberflächen der einander berührenden Bauteile befinden, werden vom Nutzer manuell vordefinierten Kategorien zugeordnet (z. B. Achse oder Bohrung). Montagereihenfolgen werden heuristisch durch die Bi-Partitionierung des Liaison-Graphen des Produktes generiert (vgl. HOMEM DE MELLO & LEE (1991)). Die Durchführbarkeit einer Montageoperation wird bestimmt durch die Analyse der geometrischen Behinderungen der Bauteile im 3D-CAD-Modell des Produktes. Die Stabilität der Baugruppen wird dabei sowohl geometrisch als auch physikalisch überprüft. Die validen Montagereihenfolgen werden nach unterschiedlichen Kriterien evaluiert, um den Lösungsraum alternativer Montagereihenfolgen sinnvoll einzuschränken. Beispielhafte Kriterien sind die Einheitlichkeit der Fügerichtungen, die Parallelisierbarkeit der Montagevorgänge, die Stabilität der Baugruppen und die Anzahl an Umorientierungen der Baugruppen. Als Ergebnis liefert HighLAP einen UND/ODER-Graphen. MOSEMANN & WAHL (2001) erweitern das System zur Übersetzung der UND/ODER-Graphen aus HighLAP um Skill-Primitiva. Skill-Primitiva entsprechen Roboterbewegungen und Steuerbefehlen für Werkzeuge, die an reale Roboterteuerungen übertragen werden. Dabei werden die Hyperkanten des UND/ODER-Graphen zuerst in übergeordnete Roboter-Skills (z. B. „Fügen zweier Bauteile“) übersetzt, welche eine Beschreibung des Fügevorgangs, der Fügepartner sowie des ausgewählten Werkzeugs enthalten. Anschließend werden die übergeordneten Skills in Skill-Primitiva übersetzt (z. B. „Öffnen“ und „Schließen“ eines Greifers), die zur Programmierung des Robotersystems genutzt werden. Die Vorteile der Nutzung von Skill-Primitiva bestehen in der Möglichkeit ihrer Wiederverwendung zum Aufbau neuer übergeordneter Skills, ihrer Verknüpfung mit

einfachen Roboterbefehlen sowie ihrer vereinfachten Anpassung an neue Robotersysteme. Die Arbeiten von THOMAS ET AL. (2003) erhöhen die Effizienz bei der Generierung von Montagereihenfolgen durch eine Abbildung der validen Montagebewegungen im Konfigurationsraum, sodass die rechenaufwändige Generierung der validen Montagebewegungen für jede Bauteilpaarung im Konfigurationsraum nur noch einmal pro Produkt erfolgen muss. Die Generierung unterschiedlicher Montagereihenfolgen wird in THOMAS & WAHL (2010) neben der Bi-Partitionierung des Liaison-Graphen um eine zweite Heuristik ergänzt, welche die Einzelteile des Produktes abhängig von ihrer Entfernung vom Schwerpunkt des Produktes kategorisiert und außen liegende Baugruppen bei der Demontage priorisiert. Der Fokus der Arbeit liegt auf der Programmierung kraft geregelter Robotersysteme. Im Projekt SMERobotics (THOMAS ET AL. 2015) wird die vorgestellte Methode um eine automatische Greifplanung erweitert, die valide Greifpunkte eines Objektes bestimmt und das 3D-Modell der zu fügenden Baugruppen um Modelle von Händen oder Greifern erweitert. Diese werden auf Kollisionen mit anderen Baugruppen oder der Umgebung geprüft, um einen validen Greifpunkt auszuwählen. Baugruppen ohne valide Greifpunkte werden aus dem UND/ODER-Graph entfernt und bei der Planung nicht weiter berücksichtigt.

Fazit

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Arbeiten zeigen Planungsansätze, die - ausgehend von einer Analyse von 3D-Produktdaten - die aufgabenorientierte Programmierung von Robotersystemen zum Ziel haben. Die Betrachtung beschränkt sich allerdings stets auf eine Station. Eine Austaktung, also die Zuordnung mehrerer Montagevorgänge zu unterschiedlichen Stationen, erfolgt nicht. So wird etwa die Planung der Transportvorgänge zwischen Stationen nicht betrachtet. Der Umgang mit Planungsfällen, bei denen das Produktionssystem nicht in der Lage ist, das Produkt zu montieren, wird nicht beleuchtet, ebenso wenig eine Einbindung relevanter Rollen im Sinne der Arbeitsplanung. Auch notwendige Rekonfigurationen der Roboter-Stationen sowie alternative valide Zuordnungen von Ressourcen zu Montagevorgängen werden nicht betrachtet.

3.2 Austaktung

Im Folgenden soll eine Übersicht über die Arbeiten aus dem Bereich der Austaktung von Montagelinien gegeben werden. Im Bereich der Austaktung existiert ein sehr umfangreicher Stand der Technik, welcher diverse Problemstellungen adressiert. Ausgehend von der Klassifikation der Arbeiten in Abschnitt 2.6 liegt der Fokus der Analyse auf Arbeiten, die eine Zuordnung von Tasks zu einer bekannten Menge an

Stationen zum Ziel haben. Des Weiteren werden Arbeiten, welche die Eigenschaften und Restriktionen von Stationen bzw. der innerhalb von Stationen verfügbaren Ressourcen nicht berücksichtigen, von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Für eine Übersicht über den umfangreichen Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich der Austaktung sei an dieser Stelle auf BECKER & SCHOLL (2006) sowie auf BOYSEN ET AL. (2009) verwiesen.

Abschnitt 3.2.1 widmet sich der Austaktung unter Berücksichtigung von Eigenschaften von Stationen, während Abschnitt 3.2.2 Arbeiten adressiert, die ALB und ASP miteinander verknüpfen. Abschnitt 3.2.3 fasst den Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich der Austaktung zusammen. Ein besonderes Augenmerk liegt auf den initial benötigten Daten und Informationen, die zur Anwendung der Methoden erforderlich sind. Des Weiteren wird der Detaillierungsgrad bei der Beschreibung der Stationen, Prozesse und Produkte analysiert.

Der Fokus der Forschung im Bereich der Austaktung liegt in der Entwicklung von Optimierungsmethoden mit dem Ziel, die Effizienz der Planung zu erhöhen sowie möglichst vielseitige Optimierungskriterien und vorgestellte Aspekte der Klassifikation der Austaktung bei der Planung zu berücksichtigen. Bestehende Methoden zur Austaktung wenden vielfältige Ansätze zur Optimierung an. Beispielhaft seien genetische Algorithmen, Partikel-Schwarm-Optimierung oder Ameisenalgorithmen erwähnt. Die häufigsten Optimierungskriterien sind dabei eine Maximierung der Einheitlichkeit von Stationszeiten, eine Minimierung der Taktzeit und der Stationsanzahl oder eine Maximierung der Effizienz der Montagelinie. Seltener werden monetäre Aspekte, wie die Kosten pro Produkt oder die Investitionskosten der Linie, berücksichtigt. (RASHID ET AL. 2012)

Um die unterschiedlichen Optimierungsmethoden miteinander vergleichbar zu machen, werden diese auf einheitliche, im Internet verfügbare Datensätze angewandt (www.assembly-line-balancing.de). Die Vorrangbeziehungen sind dabei als Vorranggraph abgebildet und die Task-Dauern bekannt (TALBOT ET AL. 1986, SCHOLL 1999). Datensätze, die eine Zuordnung von Ressourcen zu Stationen berücksichtigen sollen, enthalten bereits eine feste Zuordnung der Ressourcen zu den Tasks (REKIEK & DELCHAMBRE 2006, SCHOLL ET AL. 2010). Zusätzlich gibt es Arbeiten, welche eine vollständig randomisierte Generierung der Daten vorstellen (OTTO ET AL. 2013). Die aufwändige Generierung und Aktualisierung dieser Planungsdaten in der industriellen Praxis steht folglich nicht im Fokus.

3.2.1 Austaktung unter Berücksichtigung von Stations-Eigenschaften

SCHOLL ET AL. (2010) stellen mit dem Algorithmus ABSALON eine mathematische Lösung zur Austaktung unter Berücksichtigung von Restriktionen bei der Zuweisung von Tasks zu Stationen vor. Sie verwenden einen Branch-and-Bound-Algorithmus zum Lösen des Optimierungsproblems. Die Methode berücksichtigt alle Aspekte der zuvor vorgestellten Restriktionen bezüglich der Stationszuordnung. Sie kann sowohl für den Fall einer initialen als auch einer Umplanung angewendet werden, betrachtet aber ausschließlich sequentielle Anordnungen von Stationen. Die Fähigkeiten der Ressourcen in den Stationen werden in Form von quantitativen Werten abgebildet und bei der Zuordnung der Tasks zu den Stationen mit den Task-Parametern verglichen. Jeder Station kann nur eine Ressource zugeordnet werden. Kombinierte Ressourcen oder Rekonfigurationen von Stationen werden folglich nicht betrachtet.

PASTOR ET AL. (2002) und GAMBERINI ET AL. (2006) stellen jeweils unterschiedliche multikriterielle, heuristische Algorithmen zur Austaktung neuer Produktvarianten vor, die auf einer Montagelinie hergestellt werden sollen. Beide Ansätze berücksichtigen als Optimierungskriterium die Maximierung der Ähnlichkeit der Austaktungen für die unterschiedlichen Produktvarianten. Zielgröße der Ansätze ist die Maximierung der Anzahl der in allen Produktvarianten gleichen Tasks, die zu denselben Stationen zugewiesen sind. Dadurch sollen Rekonfigurationen von Betriebsmitteln sowie Aufwände zur Schulung der Mitarbeiter vermieden werden. Die Ressourcen in den Stationen bzw. die notwendigen Rekonfigurationen werden dabei nicht explizit betrachtet. Die Festlegung der Tasks sowie der Unterschiede und Übereinstimmungen hinsichtlich der Montagevorgänge der unterschiedlichen Varianten erfolgt manuell. Die Tasks der unterschiedlichen Produktvarianten gelten als gleich, wenn ihre quantitativen Parameter übereinstimmen.

REKIEK ET AL. (1999), REKIEK ET AL. (2002) und REKIEK & DELCHAMBRE (2006) stellen heuristische Planungsmethoden vor, welche die optimale Ressourcenauswahl für eine Montagelinie zum Ziel haben. Die Maximalanzahl an Stationen sowie eine einzuhaltende Taktzeit werden manuell vorgegeben. Die Ressourcen sind in einer Datenbank gespeichert, die neben den von einer Ressource durchführbaren Tasks auch Kosten, Prozesszeiten und den Flächenbedarf der Ressourcen enthält. Die Zuordnung valider Ressourcen zu den Tasks ist ein vorgelagerter, manueller Prozess und wird nicht im Detail erläutert. Nach der Festlegung des Automatisierungsgrades der Stationen wird basierend auf einem Montagevorranggraphen eine Austaktung durchgeführt, bei der den Stationen automatisiert optimale Ressourcen zugeordnet werden. Zielgrößen sind die Einhaltung der Taktzeit bei minimalen Investitionskosten. Ein Task wird stets von nur einer Ressource durchgeführt, wobei eine Station aus mehreren Ressourcen bestehen kann. Eine Betrachtung der gegenseitigen

Beeinflussung der Ressourcen erfolgt mittels einer Inkompatibilitäts-Matrix, welche die sich in einer Station gegenseitig ausschließenden Ressourcen abbildet. Der Flächenbedarf der Ressourcen darf die Gesamtfläche einer Station nicht übersteigen. Ergebnis der Planung ist eine Montagelinie mit Stationen, denen Ressourcen zugewiesen sind.

LEVITIN ET AL. (2006) stellen einen genetischen Algorithmus für die Austaktung von Montagelinien vor, an denen alle Stationen mit Industrierobotern ausgestattet sind. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der optimalen Zuordnung unterschiedlicher Robotertypen zu den Stationen einer Montagelinie. Dies erfolgt anhand der spezifischen Eigenschaften der Roboter. Zielkriterium ist die maximale Ausbringung einer sequentiell angeordneten Linie mit vorgegebener Stationsanzahl. Die spezifischen Prozesszeiten der unterschiedlichen Robotertypen zur Durchführung der Tasks sind eine vorzugebende Eingangsinformation und werden nicht im Rahmen der Methode bestimmt. Die Auswahl der Endeffektoren sowie weiterer Ressourcen für jede Station erfolgt dabei nach der Austaktung und ist ein manueller Prozess.

BUKCHIN & TZUR (2000) stellen einen heuristischen Algorithmus vor, der die Austaktung einer flexiblen Montagelinie unter Berücksichtigung von alternativen Ressourcenzuordnungen zu einer vorgegebenen Menge an Stationen erlaubt. Die Kosten jeder Ressource sowie die Dauer der Tasks in Abhängigkeit von der Ressourcenzuweisung sind bekannt. Zielsetzung ist eine Minimierung der Investitionskosten unter Berücksichtigung der zu erreichenden Ausbringungsmenge. Die Methode sieht eine optimale Zuordnung einer einzelnen Ressource zu jeder einzelnen Station vor. Die Zuordnung der jeweils validen Ressourcen zu den vom Produkt geforderten Tasks sowie die Bestimmung der ressourcenabhängigen Task-Dauer sind vorgelagerte, manuelle Prozesse.

OESTERLE ET AL. (2017) stellen einen Optimierungsansatz vor, der bei der Austaktung alternative Gestaltungsmöglichkeiten eines Produktes sowie alternative Ressourcenzuweisungen zu den Tasks berücksichtigt. Ein Ziel des Ansatzes ist die Unterstützung der Produktentwicklung im Hinblick auf die Produktgestaltung zur Minimierung der Montagekosten. Es wird ein Kostenmodell eingeführt, das die Bewertung der Konfiguration des Montagesystems sowie der Produktalternativen ermöglicht. Das Kostenmodell berücksichtigt unter anderem Energiekosten, Materialkosten der Bauteile, Personalkosten sowie Kosten zum Aufbau der Anlage. Die validen Zuordnungen der Ressourcen zu den vom Produkt geforderten Tasks, Investitionskosten, Ausschussraten und zur Lebensdauer der Ressourcen sowie die ressourcenabhängigen Prozessdauern sind Eingangsgrößen der Methode und vorab manuell vorzugeben. Für die Durchführung eines Tasks wird nur eine Ressource

benötigt. Eine Besonderheit besteht bei der Berücksichtigung der Aufstellfläche von Ressourcen, welche kleiner als die rechteckige Gesamtfläche einer Station sein muss.

3.2.2 Austaktung in Kombination mit Assembly Sequence Planning

In mehreren Arbeiten wurden Optimierungsprobleme von ASP und ALB in einer Gesamtmethodik miteinander verknüpft (TSENG & TANG 2006, TSENG ET AL. 2008, WANG ET AL. 2012, LU & YANG 2016). Zielsetzung ist hierbei die Bestimmung einer optimalen Stationsanzahl mitsamt zugeordneten Ressourcen, ausgehend von einem digitalen Produktmodell des zu montierenden Produktes. Bei der Beschreibung der durchzuführenden Montagevorgänge kommen sogenannte *Konnektoren* zum Einsatz, deren Vorrangbeziehungen in einem Graphenmodell abgebildet werden. Konnektoren sind stark abstrahierte Vorgangsbeschreibungen. Sie beschreiben die Montageoperation zwischen mehreren Baugruppen, die von einem Verbindungselement fixiert werden, und enthalten für die Planung relevante Informationen wie notwendige Werkzeuge, vordefinierte Vorgangsdauern und Montagerichtungen. Die Werkzeuge werden dabei nicht explizit betrachtet, sondern als sehr allgemeine Werkzeugkategorien wie z. B. „kein Werkzeug nötig“ oder „spezifisches Werkzeug nötig“, beschrieben. Der Typ der Station in einer Montagelinie wird ebenfalls mit Hilfe unterschiedlicher Konnektor-Typen beschrieben, wobei einer Station mehrere Konnektor-Typen zugeordnet werden können. Der erste Planungsschritt ist die manuelle Zuordnung der Konnektoren zu Bauteilen. Während in der Arbeit von TSENG & TANG (2006) die Optimierung der Montagereihenfolge sowie der Austaktung sequentiell erfolgen, erreichen TSENG ET AL. (2008) und WANG ET AL. (2012) eine gleichzeitige Optimierung von Montagereihenfolge und Austaktung. Die Kosten der Montagevorgänge sowie die Umrüstdauer von Stationen werden bei WANG ET AL. (2012) in die Betrachtung mit einbezogen und manuell vom Nutzer vorgegeben. Zielgröße der Optimierung sind eine Maximierung der Ähnlichkeit aufeinander folgender Konnektoren sowie minimale Durchlaufzeiten, Produktionskosten und Anzahl der Stationen.

3.2.3 Fazit

Der Themenbereich der Austaktung fokussiert das Optimierungsproblem der Zuordnung vom Produkt geforderter Tasks zu geeigneten Stationen mit Fokus auf zeitliche und monetäre Kriterien. Die reale Struktur eines Produktionssystems wird dabei stark vereinfacht. Insbesondere die räumliche Anordnung von Ressourcen sowie deren gegenseitige Beeinflussung und funktionale Abhängigkeit, etwa in Hinblick auf kombinierte Ressourcen, werden nicht ausreichend betrachtet. Des Weiteren ist die Zuordnung von Montagevorgängen zu geeigneten Ressourcen ein

vor- oder nachgelagerter manueller Vorgang. Die Arbeiten setzen zudem die Kenntnis über die genauen Dauern der Primärvorgänge als Planungsgrundlage voraus. Keine der Arbeiten aus dem Bereich der Austaktung bindet eine simulative Absicherung der Durchführbarkeit der Montagevorgänge in den Planungsprozess ein.

Die vorgestellten Arbeiten, die ALB und ASP verknüpfen, betrachten die Neuplanung einer Anlage. Die automatische Generierung von Montagereihenfolgen aus 3D-CAD-Modellen des Produktes sowie eine simulative Absicherung sind dabei nicht Teil der Betrachtung. Die Beschreibung der Montagevorgänge und Stationen mittels Konnektoren erfolgt stark abstrahiert. So werden etwa die Bestandteile einer Montagestation während eines Montagevorgangs auf eine Ressource reduziert.

BOYSEN ET AL. (2007) beschreiben als Defizite des Standes der Technik im Bereich Austragung explizit die unzureichende Berücksichtigung der Bereitstellung von Bauteilen an den Stationen sowie die kontinuierliche Rekonfiguration der Ressourcen der Stationen während der Laufzeit einer Montagelinie. Des Weiteren betrachten die meisten Arbeiten die Dauer eines Tasks ausschließlich als Primärvorgang an einer Station, ohne die Dauern von Werkzeugwechseln oder die Transportvorgänge zwischen den Stationen zu berücksichtigen (LU & YANG 2016).

3.3 Skillbasierte Automatisierung der Planung in der Montage

Der Schwerpunkt dieses Abschnittes liegt auf Planungsansätzen, die das Konzept der Dreiteilung in Produkt, Prozess und Ressourcen um abstrakte Skills erweitern. Zur Gliederung dieses Abschnitts werden die Arbeiten entsprechend ihren Schwerpunkten zugeordnet: der Automatisierung der Montagesystemplanung (Abschnitt 3.3.1), bei der von der Neuplanung eines Produktionssystems ausgegangen wird, oder der Automatisierung der Arbeitsablaufplanung (3.3.2) mit einem bestehenden Produktionssystem. Ergänzend werden in Abschnitt 3.3.3 Arbeiten aus dem Bereich der produktbasierten Produktionssteuerung vorgestellt, die ebenfalls abstrakte Skills zur Zuordnung der geforderten Vorgänge zu geeigneten Ressourcen verwenden. In Abschnitt 3.3.4 werden die Erkenntnisse aus dem Bereich der skillbasierten Planung in der Montage zusammengefasst. Unabhängig von den spezifischen, in den unterschiedlichen Arbeiten genutzten Synonymen wird im Folgenden einheitlich der Begriff *Skill* verwendet.

3.3.1 Automatisierung in der Montagesystemplanung

Ein grundlegende Methode zur rechnergestützten und skillbasierten Montagesystemplanung beschreibt DEUTSCHLÄNDER (1989). Ziel ist hierbei die

durchgängige Digitalisierung der Generierung und Bewertung alternativer Ressourcen sowie Anlagenlayouts für einen Montagevorgang. Die Planungsgrundlage besteht aus einer Bibliothek an Ressourcen, in der die Ressourcen-Skills in Form von ausführbaren Montagevorgängen in Anlehnung an die VDI-RICHTLINIE 2860 beschrieben sind. Die Methode sieht im ersten Schritt eine vom Nutzer durchgeführte graphische Auswahl und Reihenfolgebildung der Skills eines Produktes vor. Im nächsten Schritt erfolgt für jeden geforderten Skill eine automatische Auswahl unterschiedlicher geeigneter Ressourcentypen anhand der Übereinstimmung der Skill-Typen sowie die Abbildung dieser in einem morphologischen Kasten. Durch einen Abgleich der produkt- und prozessspezifischen Parametrierung der Skills wird der Lösungsraum reduziert. Die Planung des Montagesystems erfolgt anhand der manuellen Auswahl einer geeigneten Ressource für jeden geforderten Skill. Die Ressourcen sind mit entsprechenden 3D-CAD-Modellen verknüpft, die zur Erstellung eines vollständigen Montagesystem-Modells manuell angeordnet werden. Die simulative Prüfung der Kollisionsfreiheit und Erreichbarkeit erfolgt manuell.

PARK (1992) und TONSHÖFF ET AL. (1992) stellen ein teilautomatisiertes Expertensystem zur Planung der Anordnung sowie zur Programmierung von Betriebsmitteln in einer Roboterzelle ausgehend von Produktinformationen vor. Die Arbeit beschränkt sich auf die Planung einer Station, die mit einem SCARA-Roboter ausgestattet ist. Planungsdaten des Produktes hinsichtlich der Montage wie Baugruppen, Fügestellen, Fügeverfahren und -richtungen werden vom Nutzer vorgegeben und in Form von abstrahierten Skills gespeichert, die sich aus wiederkehrenden Sequenzen von Montagevorgängen nach der VDI-RICHTLINIE 2860 zusammensetzen. Das Expertensystem leitet daraus regelbasiert mögliche Montagereihenfolgen ab. Ressourcen werden analog zu ihrer Funktionalität und anhand eines parametrischen Abgleiches den geforderten Skills zugeordnet. Das System ermittelt die hinsichtlich zeitlichen Kriterien optimale Montagereihenfolge sowie die optimale Positionierung von Greifern und Bereitstellungen an vordefinierten Positionen in der Roboterzelle. Ausgehend von den Planungsdaten wird wissensbasiert die Struktur eines Programms zur Steuerung des Roboters generiert. Eine simulative Absicherung der Kollisionsfreiheit der Montagevorgänge erfolgt nicht.

Im Projekt CosMonAut wurde eine Methode entwickelt, die ein abgestimmtes, paralleles Vorgehen zwischen Produktentwicklung und Montagesystemplanung mittels eines Software-Werkzeuges ermöglicht. Dabei wird ein übergreifendes Datenmodell verwendet. Die Planung wird als Syntheseprozess verstanden, dessen Ziel der sukzessive Aufbau eines digitalen Modells des angestrebten Montagesystems ist. Durch die Weiterleitung von entsprechenden Zwischenergebnissen aus der Konstruktion kann der Montagesystemplaner Teil-Planungsabläufe parallel zur

Konstruktion durchführen. Dies erlaubt einen früheren Abschluss der Planung sowie eine Steigerung der Qualität der Ergebnisse. Dafür wird ein Datenmodell entwickelt, das mit Hilfe von Skills die Verknüpfung vom Produkt bzw. von dessen Baugruppen mit geeigneten Betriebsmitteln erlaubt. Diese orientieren sich ebenfalls an der VDI-RICHTLINIE 2860 und beschreiben die Zustände der erwähnten Elemente während der Durchführung der Prozesse mittels Petri-Netzen. Eine simulative Prüfung der Eignung der Anlage erfolgt in einer Kinematiksimation, wobei die Programmierung aufgabenorientiert erfolgt (ROBGODERER 2002). Die Simulationsergebnisse können anschließend für eine automatische Kosten- und Zeitanalyse verwendet werden. Die Beschreibung der geforderten Montagevorgänge mitsamt deren Reihenfolge sowie die Zuordnung zu geeigneten Betriebsmitteln sind manuelle Vorgänge. Eine Berücksichtigung unterschiedlicher Montagereihenfolgen oder von Rekonfigurationen des Produktionssystems findet nicht statt. (FELDMANN 1997)

JONAS (2000) stellt ein Datenmodell zur durchgängigen planungsphasenübergreifenden Montagesystemplanung vor. Ziel ist die Erhöhung des Parallelisierungsgrades zwischen Konstruktion und Montagesystemplanung. Um eine Planung auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen zu ermöglichen, werden hierarchische Strukturen zur Modellierung von Ressourcen, Produkten und Prozessen eingeführt. Die Ressourcen-Modellierung differenziert zwischen Fertigungsbereichen, Stationen, kombinierten Ressourcen und Ressourcen. Das Produktmodell enthält Informationen bezüglich der Baugruppen und deren Verbindungsart und wird initial vom Nutzer manuell erstellt und während der Planung fortlaufend detailliert. Die unterschiedlichen Stations-Typen mitsamt den dazugehörigen Ressourcen und durchführbaren Skills werden bei einer Neuplanung initial in einer Wissensbasis hinterlegt und stehen für spätere Planungsfälle zur Verfügung. Die Möglichkeit der automatisierten Auswahl geeigneter Ressourcen anhand des Produktmodells wird vorgestellt, aber nicht im Detail erläutert. Die Vorgabe der Sequenz der von den ausgewählten Ressourcen durchzuführenden Skills erfolgt manuell. Unterschiedliche Montagereihenfolgen und Rekonfigurationen des Produktionssystems werden nicht betrachtet. Eine automatisierte simulative Absicherung der Montagevorgänge und eine Berücksichtigung der Austaktung erfolgt nicht.

KLUGE (2011) stellt eine skillbasierte Montagesystemplanung für modulare Montagesysteme vor. Im Fokus steht dabei die automatisierte Generierung und Bewertung von alternativen Montagesystemen. KLUGE (2011) entwickelt eine eigene Systematik, die Montageressourcen sowie Montagevorgänge mit Skills beschreibt, die sich an Funktionen orientiert, die in Normen definiert sind. Die Skills dienen zur Differenzierung unterschiedlicher Stationstypen, die in einer Bibliothek gespeichert werden. Eine Modellierung der unterschiedlichen Ressourcen in den Stationen erfolgt nicht. Der Fokus liegt auf der Phase der Grobplanung, da nicht von einem

auskonstruierten Produkt ausgegangen wird. Die Erstellung des Aufgabenmodells des Produktes in Form von Sequenzen von Skills erfolgt manuell. Die vom Produkt geforderten und die von den Stationen angebotenen Skills werden qualitativ miteinander verglichen. Davon ausgehend wird automatisiert ein Lösungsraum alternativer Ausprägungen des Produktionssystems generiert und szenariobasiert bewertet. Eine Modellierung von Transport- und Rekonfigurationsvorgängen in den Stationen erfolgt nicht. Eine simulative Absicherung der Prozesse findet nicht statt.

3.3.2 Automatisierung in der Arbeitsablaufplanung

Der Sonderforschungsbereich (SFB) 336 "Montageautomatisierung durch die Integration von Konstruktion und Planung" hatte die Integration von Konstruktion und Montageplanung unter Zuhilfenahme von Softwarewerkzeugen zum Ziel (LINDEMANN ET AL. 2000). CUIPER (2000) entwickelt darin einen Ansatz zur rechnergestützten Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen. Ein Software-Werkzeug ermöglicht einen gesteigerten Parallelisierungsgrad von Produktentwicklungsprozessen und der Planung des Montagesystems. CUIPER (2000) unterscheidet zwei Planungsfälle: die anlagen- und die produktgetriebene Planung. Bei der anlagengetriebenen Planung gilt es, die Montagevorgänge des Produktes so zu gestalten, dass diese mit dem vorhandenen Montagesystem durchgeführt werden können. Im Falle der produktgetriebenen Planung werden das Montagesystem und die Montagevorgänge den Anforderungen des Produktes angepasst. Die Planung ist in die drei Phasen „Planen der Struktur“, „Planen der Teilvorgänge“ und „Planen der Synchronisation“ eingeteilt. Die Modellierung der Montagevorgänge erfolgt in einem hierarchischen Beschreibungsmodell, dessen Detaillierungsgrad mit zunehmendem Planungsfortschritt in den Phasen zunimmt. Die abstrakte Beschreibung der Montagevorgänge orientiert sich dabei ebenfalls an der VDI-RICHTLINIE 2860. Die Beschreibungsmodelle werden vom Produktentwickler oder vom Anlagenplaner mit einem Software-Werkzeug grafisch modelliert und sind für andere Planungsinstanzen zugänglich. Die detaillierte Montagevorgangsbeschreibung, welche die vollständige Wechselwirkung zwischen Produkt und Anlage beschreibt, entsteht durch die Verknüpfung des Montagevorranggraphen mit der Anlagenstruktur. Die Montagevorgangsbeschreibung wird als objektbezogenes Petri-Netz modelliert, das zur Ablaufsteuerung in einem Montagesystem um Steuerbefehle erweitert wird. Die Beschreibung der geforderten Montagevorgänge inklusive der unterschiedlichen Montagereihenfolgen sowie die Zuordnung geeigneter Ressourcen zu den geforderten Montagevorgängen erfolgen manuell.

Im Rahmen des Forschungsprojektes SIARAS (Skill-based Inspection and Assembly for Reconfigurable Production Systems) wurden Ansätze zur Steigerung der

Wiederverwendbarkeit von Betriebsmitteln durch deren vereinfachte Auswahl und Rekonfiguration von Ressourcen in Montagestationen entwickelt. Durch eine abstrahierte Beschreibung der Eigenschaften und Funktionen von Betriebsmitteln sowie der Anforderungen der durchzuführenden Montagevorgänge in Form von Skills können diese automatisiert miteinander verglichen und einander zugeordnet werden. Dabei können Skills zur vereinfachten Handhabung auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen, ausgehend von einer abstrakten Aufgabe bis hin zu einem feingeplanten Arbeitsplan, beschrieben werden. Die modellierten Skills sind an die VDI-RICHTLINIE 2860 und an die DIN 8593 angelehnt. Der Abgleich zwischen den Produktanforderungen und den Skills der Betriebsmittel erfolgt auf der Ebene ihrer quantitativen Eigenschaften ohne simulative Berücksichtigung der Kinematik bzw. Geometrie. Die automatische Auswahl optimaler Betriebsmittel nach vom Nutzer vorgegebenen Kriterien wird vorgeschlagen, aber nicht genauer beschrieben (BENGEL 2010, S. 116). Die Skills werden als Ontologie modelliert. Die Vorgabe der Reihenfolge der durchzuführenden Montagevorgänge erfolgt durch den Nutzer. (MALEC ET AL. 2007, BENGEL 2010, HAAGE ET AL. 2011)

In dem Nachfolgeprojekt ROSETTA wurden die Arbeiten aus SIARAS mit dem Ziel fortgesetzt, ausgehend von einer groben, abstrakten Aufgabenbeschreibung die Generierung ausführbarer Roboterprogramme zu vereinfachen. Es wird ein Framework eingeführt, das jenes Wissen abbildet, das zur vollständigen Beschreibung von Produktionsprozessen nötig ist. Das Prozesswissen zur Abbildung der allgemeinen Sequenzen der Teilvergänge zur Durchführung eines Skills wird dabei initial vom Nutzer angelegt. Eine vorgegebene Sequenz an durchzuführenden Skills wird in einen Sequential Function Chart (SFC) überführt und zur Programmierung der Roboter verwendet. Dabei werden sowohl der Umgang mit Unsicherheiten und Fehlern bei der Durchführung der Prozesse als auch die Einbindung von Sensorik berücksichtigt (NAUMANN ET AL. 2010). Die Ansätze wurden zusätzlich um Ontologien aus weiteren Forschungsprojekten ergänzt, die z. B. zur vereinfachten Darstellung von kinematischen Ketten oder zur Planung von Montagevorgängen bei der Mensch-Roboter-Kooperation dienen. Die Vorgabe der durchzuführenden Montagevorgänge erfolgt in Form eines skillbasierten Vorranggraphen weiterhin manuell durch den Nutzer (MALEC ET AL. 2013). Sekundärvorgänge, wie automatische Werkzeugwechsel oder die korrekte Positionierung eines Objektes vor einem Montagevorgang, werden automatisiert zum Roboterprogramm hinzugefügt. Eine Aufteilung der Aufgabe auf mehrere Stationen sowie der Transport zwischen diesen erfolgen nicht. (STENMARK & MALEC 2015)

SMALE & RATCHEV (2009, 2010) stellen eine Taxonomie vor, deren Ziel die skillbasierte, automatisierte Auswahl und optimale Konfiguration von Stationen und Ressourcen in einer bestehenden Montagelinie sind. Das Modell der Linie beschreibt

die lineare Verkettung der Stationen, die sich aus Betriebsmitteln mit definierten Skills zusammensetzen. Die Aufgabenbeschreibung wird vom Nutzer manuell erstellt, indem durchzuführende Skills ausgewählt, parametrisiert und in einem Flussdiagramm angeordnet werden. Anhand eines Parameterabgleichs werden jedem geforderten Skill unterschiedliche geeignete Ressourcen im Modell der Linie zugeordnet. Zwingend notwendige Sekundärvorgänge, wie die Zuführung der Bauteile, werden dem Flussdiagramm regelbasiert hinzugefügt und ebenfalls parametrisiert. Anhand von vorgegebenen Kriterien wird eine optimale Lösung ausgewählt, bei der ausgehend vom bestehenden Montagesystem eine Konfiguration generiert wird, die zur Herstellung des Produktes geeignet ist und die im Vergleich zum Ausgangszustand eine minimale Anzahl an Änderungen und Ressourcen benötigt. Nicht benötigte Ressourcen bzw. fehlende Skills werden automatisiert ermittelt und alternative, valide Ressourcen aus einer Bibliothek ausgewählt und Stationen zugewiesen. Die gegenseitige Beeinflussung und Kompatibilität der Betriebsmittel wird nicht betrachtet. Eine simulative Absicherung findet nicht statt.

LOS KYLL (2013) beschreibt einen skillbasierten Ansatz zur automatischen Steuerung und Programmierung von Montagesystemen. Die Planung erfolgt durch einen semantischen Abgleich der geforderten Montagevorgänge, abgebildet als abstrakte Skills, mit den durchführbaren Skills, die von den Feldgeräten in einem Montagesystem zur Verfügung gestellt werden. Die durchzuführenden Aufgaben zur Fertigstellung des Produktes werden vom Anwender auf einem hohen Abstraktionsgrad beschrieben und im Laufe des Planungsprozesses detailliert. Die initiale Vorgabe der durchzuführenden Montagevorgänge sowie deren Reihenfolge erfolgen manuell. Die durchführbaren Skills der Ressourcen im Produktionssystem werden mittels eines Plug&Produce-Ansatzes zur Laufzeit ermittelt und aktualisiert. Die initiale Erstellung des abstrakten Modells des Anlagenlayouts ist ein vorgelagerter manueller Prozess. Die gegenseitige Beeinflussung kombinierter Ressourcen wird in Form von „komponierten“ Skills abgebildet. Die Zuordnung der geforderten Skills zu geeigneten Ressourcen erfolgt ohne eine simulative Absicherung ausschließlich in Hinblick auf eine bestmögliche Anforderungserfüllung. Der Steuerungscode der Feldgeräte wird anhand der Parametrierung der geforderten Skills an das Produkt angepasst. Die Generierung und Bewertung alternativer Arbeitspläne erfolgen nicht.

Ein vergleichbarer Ansatz, der ähnliche Einschränkungen aufweist, wird im Forschungsprojekt SkillPro verfolgt. Skills dienen dabei der Verknüpfung von Produkt und Ressource, wobei mit dem eingeführten Begriff der *Aktion* einander erfolgreich zugeordnete Produkte und Ressourcen und somit ausführbare Montagevorgänge bezeichnet werden. Der vorgestellte Ansatz bindet notwendige Sekundärvorgänge sowie die Aufteilung der Aufgabe auf mehrere Stationen in die Planung ein. Der Fokus liegt dabei auf der dynamischen Produktionssteuerung. Der

durchzuführende Steuerungscode wird teilautomatisch abgeleitet. Die Möglichkeit der geometrischen Prüfung der Durchführbarkeit der Prozesse wird erwähnt, aber nicht im Detail erläutert. Das Anlagenlayout sowie Produkthanforderungen, valide Prozessreihenfolgen und die Prozessdauern werden vor der Nutzung des Systems manuell vorgegeben. Neue Produktvarianten können parallel zum Betrieb innerhalb eines vordefinierten Konfigurationsraumes vom Nutzer vorgegeben werden. Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Rekonfiguration des Produktionssystems werden nicht berücksichtigt. Der Umgang des Systems mit geforderten Montagevorgängen, die vom Produktionssystem nicht durchgeführt werden können, wird nicht beschrieben. (PFROMMER ET AL. 2013, PFROMMER ET AL. 2015)

FERRER ET AL. (2016) entwickeln ein ontologiebasiertes PPR-Datenmodell für die Montage. Die Anwendung des wissensbasierten Systems ermöglicht die automatische Zuordnung von digitalen Aufgabenmodellen des Produktes, welche Eigenschaften und Anforderungen enthalten, zu digital abgebildeten Stationen und Ressourcen eines Montagesystems. Das Montagesystem sowie die Skills werden dabei auf unterschiedlichen Hierarchieebenen modelliert und einander entsprechend zugeordnet. So besteht das Montagesystem aus Stationen, die aus Betriebsmitteln zusammengesetzt sind. Die Montage eines Produktes wird in Skills untergliedert, die weiter in abstrakt modellierte Teilvorgänge aufgeteilt werden. Stationen werden regelbasiert mit Skills und Betriebsmittel entsprechend mit den Teilvorgängen verknüpft. Die Erstellung oder Aktualisierung der Daten zur Beschreibung des Montagesystems bzw. der Aufgabenbeschreibung des Produktes, welche die Eingangsinformationen bilden, oder ein Bezug zur Geometrie der Elemente werden nicht betrachtet. Eine Generierung von Planungsalternativen bzw. deren Bewertung erfolgt nicht. Sekundärvorgänge sind nicht im Datenmodell abgebildet.

KEDDIS ET AL. (2015) stellen ein Konzept zur skillbasierten Arbeitsplanung unter Berücksichtigung des aktuellen Zustandes realer, rekonfigurierbarer Produktionssysteme vor. Die automatische Zuordnung der geforderten Skills zu den in einem Produktionssystem verfügbaren Stationen erfolgt automatisiert auf Basis eines Parameter-Abgleichs unter Berücksichtigung möglicher Transportvorgänge zwischen den Stationen. Das Ergebnis sind alternative Arbeitspläne, die Primär- und Sekundärvorgänge enthalten und objektiv miteinander verglichen werden können. Die manuelle Vorgabe der Reihenfolge der durchzuführenden Skills erfolgt in Form eines Vorranggraphen. Das skillbasierte Fähigkeitenmodell des Produktionssystems beschreibt dessen Stationen, die in Abhängigkeit einer in ihnen vorhandenen Ressource einem Stations-Typ zugeordnet werden, sowie die Verkettung zwischen den Stationen, die automatisiert durch die Erkennung benachbarter Stationen sensorisch erfolgt. Jede Station kann nur einen Skill anbieten. Eine simulative Absicherung der Vorgänge erfolgt nicht.

HUCKABY ET AL. (2013) und HUCKABY & CHRISTENSEN (2014) stellen eine skillbasierte Modellierung zur automatischen Planung von Montagevorgängen von Robotersystemen mit mehreren Robotern und Stationen vor. Grundlage der Planung bilden sogenannte *Skillprimitiva*, die als grundlegende, allgemeingültige, atomare Aktionen definiert sind und von einem Robotersystem durchgeführt werden können. Als Beispiele werden „Bewegen“, „Halten“ und „Schrauben“ genannt. Wiederkehrende Sequenzen von Skillprimitiva, wie etwa beim Aufnehmen eines Objektes, werden in sogenannten *Action Schemes* zusammengefasst. Action Schemes enthalten Vorbedingungen, die erfüllt sein müssen, damit deren Ausführung erfolgen kann. Die unterschiedlichen Skillprimitiva werden durch Parameter und technische Begrenzungen (engl.: constraints) beschrieben. Parameter dienen der Beschreibung der benötigten Montagevorgänge. Die Vorgabe der technischen Begrenzungen, wie beispielsweise Freiheitsgrade eines Roboters zur Begrenzung des Skillprimitivums „Bewegen“, sind notwendig, um die Eigenschaften des Produktionssystems exakt abzubilden. Die automatisierte Planung und Programmierung der Vorgänge erfolgt, indem der Nutzer manuell ein Planungsproblem mit einem vorgegebenen Zielzustand anhand einer Prädikatlogik auf Ebene der Action Schemes textuell beschreibt. Dieses enthält die Parameter für alle durchzuführenden Skillprimitiva. Die Beschreibung der Beziehungen zwischen den Ressourcen in einem Produktionssystem sowie deren Aktualisierung im Falle einer Rekonfiguration erfolgt ebenfalls mit Hilfe einer Prädikatlogik textuell durch den Nutzer. Die automatische Planung erfolgt durch die Zuordnung geeigneter Skillprimitiva unter Berücksichtigung der Parameter und der technischen Begrenzungen. Die Aufteilung der Montagevorgänge auf unterschiedliche Stationen wird nicht im Detail erläutert. Eine simulative Absicherung der Prozesse findet nicht statt.

JÄRVENPÄÄ ET AL. (2016A, 2016B) beschäftigen sich mit der Modellierung von Ressourcen in rekonfigurierbaren Produktionssystemen. Eine Besonderheit ist dabei die automatische Ermittlung durchführbarer Skills von kombinierten Ressourcen. Ziel ist die automatische Zuordnung der vom Produkt geforderten Vorgänge zu geeigneten Stationen und Ressourcen in einem bestehenden Produktionssystem. Zur Modellierung der Ressourcen werden Skills verwendet, die anhand physikalischer und technischer Parameter beschrieben sind. Die Autoren unterscheiden zwischen *einfachen* und *kombinierten* Skills. Die einfachen Skills sind in einer Taxonomie gespeichert und können den Ressourcen direkt zugewiesen werden. Die Verknüpfung einfacher Skills mehrerer Ressourcen, die Teil einer kombinierten Ressource sind, zu kombinierten Skills mit komplexerer Funktionalität, wird ebenfalls in der Taxonomie in Form von Regeln gespeichert. Die automatische Erkennung der Kombinationsmöglichkeiten zweier Ressourcen durch Prüfung der Kompatibilität ihrer Schnittstellen wird erwähnt, aber nicht weiter erläutert. Die Erstellung des

Aufgabenmodells des Produktes erfolgt manuell oder mittels eines featurebasierten Ansatzes in einer CAD-Software, wobei ausschließlich Fertigungs- und keine Montagevorgänge betrachtet werden (GARCIA ET AL. 2011). Die automatisierte Zuordnung der vom Produkt geforderten Skills zu den verfügbaren Skills der Ressourcen erfolgt im ersten Schritt basierend auf deren namentlichen Übereinstimmung und anschließend regelbasiert durch den Abgleich der Parameter. Eine Generierung von Planungsalternativen findet nicht statt. Der Umgang des Systems mit geforderten Montagevorgängen, für die keine geeigneten Ressourcen gefunden werden konnten, wird nicht erläutert. Eine simulative Absicherung oder eine aufgabenorientierte Programmierung der Ressourcen erfolgen nicht.

BACKHAUS (2016) stellt ein aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme vor. Dessen Informationsmodell setzt sich aus einem Aufgabenmodell, welches das Produktmodell mitsamt der Vorgangsfolge in Form von Skills beinhaltet, sowie einem Umweltmodell, bestehend aus Ressourcen und deren Skills, zusammen. Der Fokus der Arbeit liegt auf der Herleitung und Modellierung der Skills sowie deren Abbildung auf die Befehle und Kommunikationsschnittstellen von Betriebsmitteln. Die Erstellung des Aufgabenmodells mitsamt der durchzuführenden Aufgaben sowie der Zwischenzuständen des Produktes in Form von Primärvorgängen erfolgen manuell. Die Zuordnung der geforderten Primärvorgänge zu geeigneten Betriebsmitteln erfolgt automatisch, basierend auf skillspezifischen Wissensquellen, welche die geforderten Prozessparameter mit jenen der Ressourcen vergleichen. Eine simulative Absicherung der Kollisionsfreiheit und der Erreichbarkeit der Posen bei der Durchführung der Montagevorgänge erfolgt aufgabenorientiert in einer Kinematiksimulation. Sekundärvorgänge wie Handhabungsbewegungen zwischen Betriebsmitteln werden automatisch erkannt und zu einem als Graph modellierten Arbeitsplan hinzugefügt. Es wird ein Ansatz zur automatischen Erstellung eines vollständigen Modells der verfügbaren Skills des Produktionssystems anhand von Layoutinformationen vorgeschlagen, aber nicht im Detail erläutert. Manuelle und automatische Rekonfigurationen des Produktionssystems werden bei der Planung nicht betrachtet. Eine automatische Generierung und Bewertung alternativer Montagereihenfolgen und Arbeitspläne findet nicht statt.

Im Projekt SmartFIT werden Ansätze zur Planung Cyber-Physischer Produktionssysteme vorgestellt. MÜLLER ET AL. (2016A) stellen eine umfassende Datenstruktur zur Modellierung von Produkthanforderungen und Anlagenfähigkeiten vor. Ziel ist eine durchgängige digitale Neu- und Arbeitsplanung in der Montage. Zur Beschreibung der vom Produkt geforderten bzw. von den Stationen und Ressourcen durchführbaren Prozesse werden parametrierbare Skills verwendet. Die Montagelinie besteht dabei aus Stationen, die sich wiederum aus Ressourcen zusammensetzen. Zur vereinfachten Aktualisierung der Konfiguration von Montagelinien wird ein

Vorgehen vorgestellt, das die Ressourcen automatisiert bekannten Stationen zuordnet, indem die Ressourcen im vordefinierten kubischen Arbeitsraum der Stationen identifiziert werden. Dies kann in einer realen Anlage sensorbasiert erfolgen (MÜLLER ET AL. 2016B). Eine Betrachtung der gegenseitigen Beeinflussung der Ressourcen sowie der roboterbasierten Montage erfolgt nicht. Die Vorgabe der durchzuführenden Montagevorgänge sowie möglicher Montagereihenfolgen erfolgt skillbasiert manuell. Im Falle der Arbeitsplanung werden die Montagevorgänge geeigneten Stationen unter Berücksichtigung einer maximalen Taktzeit zugeordnet bzw. nicht durchführbare Vorgänge gekennzeichnet. Eine automatische Neu-Zuordnung zu einer anderen Station sowie die Auswahl von Planungsalternativen erfolgen manuell. Eine simulative Absicherung und aufgabenorientierte Programmierung finden nicht statt.

3.3.3 Produktbasierte Produktionssteuerung

LAU (2010) beschreibt eine Methodik zur selbstoptimierenden Produktionsplanung und -steuerung, bei der Produktionsabläufe zur Laufzeit neu geplant werden. Die Methodik unterscheidet zwischen einer Planungs- und einer Produktionsbetriebsphase. In der Planungsphase werden Modelle zur Beschreibung der Produktionsvorgänge, Ressourcen und Transportwege manuell erstellt. Das Modell der Produktionsvorgänge zerlegt den Produktionsprozess in skillbasierte Teilvorgänge, die ebenfalls zur Beschreibung der Ressourcenfähigkeiten herangezogen werden. Vorrangbeziehungen und Vorgangsdauern werden anhand von Montagevorranggraphen manuell vorgegeben. Für die Betriebsphase werden Methoden zur Ressourcenzuweisung und Transportplanung entwickelt. Durch einen automatisierten Abgleich quantitativer Werte findet eine Zuweisung der geforderten Produktionsvorgänge zu Ressourcen statt, die zu einer gleichmäßigen Maschinenauslastung führt. Rekonfigurationen der Ressourcen werden nicht betrachtet.

OSTGATHE (2012) entwickelt ein System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage zur effizienten Handhabung eines hochvariantenreichen Produktionsprogramms in einer hochautomatisierten Produktionsumgebung. Ziel der Arbeit ist eine aufwandsarme Adaption des Arbeitsplans bei produkt- oder ressourcenbezogenen Störungen. Auf Basis der Grundelemente Produkt und Prozess erfolgt eine ressourcenneutrale Beschreibung von Arbeitsvorgängen. Die skillbasierten Prozessbausteine werden als Petri-Netze modelliert. Die Zuweisung der einzelnen Arbeitsvorgänge zu den Fertigungs- und Montagesystemen erfolgt durch einen Abgleich mit den von ihnen angebotenen Skills. Es wird ein wissensbasiertes System eingeführt, das eine globale und lokale Arbeitsplanung durchführt. Unter einer globalen Arbeitsplanung wird die

initiale Ressourcenauswahl und -belegung sowie die Auftragsfreigabe verstanden. Die lokale Planung beinhaltet die Feinplanung im Rahmen der Produktionssteuerung wie z. B. die Reihenfolgeplanung und ermöglicht eine Anpassung und Optimierung der Produktion zur Laufzeit. Sämtliche Produktinformationen und Montage-reihenfolgen werden als gegeben angenommen. Eine simulative Absicherung der Vorgänge erfolgt nicht. Rekonfigurationen der Ressourcen werden nicht betrachtet.

3.3.4 Fazit

Die vorgestellten Arbeiten geben eine Übersicht über die vielseitigen Anwendungsbereiche von Skills. Eine zentrale Herausforderung bei allen vorgestellten Arbeiten ist die initiale Erstellung sowie Aktualisierung des skillbasierten Aufgabenmodells des Produktes mitsamt den Anforderungen der Montagevorgänge. Eine weitere Herausforderung ist die Erstellung des Fähigkeitenmodells des Produktionssystems, was in den meisten Arbeiten mit hohen manuellen Aufwänden verbunden ist. Nur wenige Arbeiten binden eine simulative Absicherung der Vorgänge hinsichtlich der Kollisionsfreiheit und Erreichbarkeit in die Planung ein. Keine der bekannten Arbeiten beschreibt eine Vorgehensweise für den Fall, dass für geforderte Montagevorgänge keine geeigneten Stationen bzw. Ressourcen gefunden werden können. Eine Ableitung von Handlungsempfehlungen für die im Sinne der Arbeitsablaufplanung relevanten Rollen erfolgt nicht. Zudem wird der Umgang mit Planungsalternativen aufgrund alternativer Montagereihenfolgen und Arbeitspläne ungenügend berücksichtigt. Fragestellungen der Austaktung sowie eine objektive Bewertung von Planungsalternativen finden nur eine unzureichende Betrachtung.

3.4 Zusammenfassung des Standes der Technik und Ableitung des Handlungsbedarfes

In Kapitel 3 wurden Arbeiten aus den relevanten Teilbereichen der Wissenschaft und Technik vorgestellt. Die Erkenntnisse werden im Folgenden zusammengefasst. In Tabelle 1 sind relevante Ansätze aus dem Stand der Technik und Wissenschaft dargestellt und nach den in Abschnitt 2.10 definierten Kriterien bewertet. Ansätze zur Modellierung von Montagereihenfolgen wurden in der Übersicht nicht erwähnt, da sie Werkzeuge zur Umsetzung eines Systems für die automatische Arbeitsplanung darstellen und anhand der gegebenen Kriterien kaum bewertet werden können.

Die Arbeiten aus dem Bereich des ASP stellen vielfältige Methoden zur Generierung und Darstellung unterschiedlicher Montagereihenfolgen aus 3D-CAD-Modellen von Produkten vor. Bestehende Ansätze sollen daher nach Möglichkeit weiterverwendet werden. Die Arbeiten fokussieren dabei ausschließlich Primärvorgänge, sodass die

3.4 Zusammenfassung des Standes der Technik und Ableitung des Handlungsbedarfes

Ergänzung des Modells der durchzuführenden Montagevorgänge um zwingend notwendige Sekundärvorgänge erforderlich ist. Des Weiteren sind die Methoden bezüglich der Strukturierung des Produktes weiterzuentwickeln.

Tabelle 1: Bewertung der Ansätze aus dem Stand der Wissenschaft und Technik.

		ASP			Austaktung (ALB)		Automatisierung der Planung in der Montage												
		ASP basierend auf 3D CAD-Daten	ASP mit Ressourcenauswahl	ASP zur aufgabenorientierten Programmierung	ALB mit Stations-eigenschaften	ASP mit ALB	Arbeitsablaufplanung												
							Produktbasierte Produktionssteuerung												
		Xu et al. 2012, 2014 Ou und Xu 2013	Chaudron et al. 2005 Hassan et al. 2010	Kaufmann et al. Büscher et al. 2013 Thomas et al. 2015	Rekiek et. al. 2006 Scholl 2010 Oesterle et al. 2017	Wang et al. 2012	Feldmann 1997	Jonas 2000	Kluge 2011	Cuiper 2000	Huckaby und Keddis et al 2015	ROSETTA 2015	SkillPro 2015	Backhaus 2016	Järvenpää et al. 2016b	Smart FIT 2016	Lau 2010	Ostgathe 2012	
1	Aufwände zur Generierung des Aufgabenmodells	●●	●●	●●	●●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2	Abgebildete Veränderungsfähigkeit und Vollständigkeit des Aufgabenmodells	●●	●●	●●	●●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3	Aufwände zur Generierung des Fähigkeitenmodells des Montagesystems	■	■	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4	Abgebildete Veränderungsfähigkeit und Vollständigkeit des Fähigkeitenmodells des Montagesystems	■	■	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5	Qualität der Absicherung der Montagevorgänge	■	■	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
6	Automatisierungsgrad der Arbeitsplanung	■	■	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
7	Berücksichtigung nicht durchführbarer Montagevorgänge	■	■	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Die Verwendung von Ergebnissen aus der Analyse eines CAD-Modells eines Produktes für nachgelagerte planerische Fragestellungen wie zur Ressourcenauswahl und zur aufgabenorientierten Programmierung von Roboterzellen entspricht dem Stand der Wissenschaft. Allerdings erfolgt keine Aufteilung der durchzuführenden Aufgaben auf mehrere Stationen im Sinne einer Austaktung. Die Bewertung alternativer Arbeitspläne, die Generierung von Handlungsempfehlungen für Produktkonstruktion und Betriebsmittelplanung sowie die Bestimmung notwendiger Rekonfigurationen des Montagesystems liegen nicht im Fokus der Betrachtung.

Arbeiten im Bereich der Austaktung fokussieren die Entwicklung immer fähigerer Optimierungsansätze, ohne die komplexe Struktur von Montagesystemen, die Ressourcengeometrie oder die geometrische Absicherung der Vorgänge einzubinden. Die aufwandsarme Erstellung des Aufgabenmodells liegt außerhalb der Betrachtung.

Arbeiten aus dem Bereich der skillbasierten Automatisierung der Planung in der Montage stellen vielfältige Ansätze zur Modellierung von Prozessen, Produkten und Ressourcen vor. Keine der bekannten Arbeiten aus diesem Bereich verwendet ASP zur Bestimmung der Produkthanforderungen. Einzig THOMAS ET AL. (2015) verwenden ASP zur Ableitung der geforderten Skills aus dem 3D-CAD-Modell eines Produktes und nutzen dieses Modell zur aufgabenorientierten Programmierung eines Roboters sowie zur Greifpunktbestimmung. Einige der vorgestellten Arbeiten berücksichtigen auch eine automatische, simulative Absicherung der generierten Arbeitspläne. Mehrere Autoren schlagen die skillbasierte Modellierung von Montagevorgängen auf mehreren Abstraktionsebenen vor, um wiederkehrende Sequenzen von Teilvorgängen abzubilden (vgl. z. B. TONSHÖFF ET AL. (1992), THOMAS & WAHL (2010), FERRER ET AL. (2016), JÄRVENPÄÄ ET AL. (2016)). Die Generierung und Aktualisierung des Fähigkeitsmodells des Montagesystems wird in den meisten Arbeiten nur peripher betrachtet und ist ein aufwändiger, manueller Prozess. Keine Arbeit in diesem Feld erfüllt die definierten Anforderungen bezüglich der Veränderungsfähigkeit vollständig. Keine der Arbeiten generiert automatisiert simulativ validierte, von der Arbeitsablaufplanung geforderte Handlungsempfehlungen für die vor- und nachgelagerten Phasen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass kein Ansatz die aufgestellten Kriterien ausreichend erfüllt. Keine der bekannten Arbeiten führt eine simulative Absicherung eines zu montierenden Produktes in einer Kinematiksimulation ausgehend von der Analyse des 3D-CAD-Modells des Produktes unter Berücksichtigung der Austaktung eines Montagesystems mit mehreren Stationen durch. Eine ganzheitliche Betrachtung der Veränderungsfähigkeit von Produktionssystemen bei der automatisierten Arbeitsablaufplanung im Sinne der Grundflexibilitäten sowie der Rekonfiguration von Ressourcen in Stationen erfolgt bisher nicht. Des Weiteren sieht keine der Arbeiten eine automatisierte Generierung von Handlungsempfehlungen für den Produktkonstrukteur und Betriebsmittelplaner sowie hinsichtlich notwendiger Rekonfigurationen des Produktionssystems vor.

Ein besonderes Augenmerk liegt im Folgenden auf der Verwendung bestehender digitaler Modelle des Produkts und des Produktionssystems zur Vermeidung zusätzlicher Modellierungsaufwände. Diese sollen die Grundlage für die aufwandsarme Erstellung des Aufgabenmodells des Produktes sowie des Fähigkeitsmodells des Produktionssystems bilden.

4 Entwicklung eines Systems zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung

Basierend auf der Zielsetzung, den definierten Anforderungen und den abgeleiteten Handlungsbedarfen wird ein Planungssystem zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung für die Montage entwickelt. Im Folgenden erfolgt eine Übersicht über das Gesamtsystem, welche die Lösungsbausteine sowie die Schnittstellen des Systems zu unterschiedlichen Rollen in der Planung vorstellt und vier unterschiedlichen Domänen zuordnet. Die Domänen bilden den Ordnungsrahmen für die Gesamtmethodik und dienen ebenfalls zur Untergliederung dieses Kapitels. Die Modelle, Methoden und Werkzeuge für die Lösungsbausteine in den Domänen werden im Folgenden anhand der zuvor formulierten Anforderungen ausgehend von bestehenden Ansätzen hergeleitet und kreativ-synthetisch detailliert. Die Grundzüge des Konzepts wurden bereits in MICHNIEWICZ & REINHART (2014, 2015, 2016), MICHNIEWICZ ET AL. (2016) und REINHART ET AL. (2017) vorgestellt.

4.1 Überblick über das Gesamtkonzept

Das Gesamtkonzept des Planungssystems setzt sich aus vier Domänen zusammen. Es wird dabei zwischen der *Skill*-, *der Produkt*-, *der Ressourcen*- und der *Synthese-Domäne* unterschieden, die in Abb. 11 dargestellt sind.

Die Skill-Domäne umfasst das skillbasierte Informationsmodell und die Datenhaltung bezüglich der abstrakten Skills und bildet somit die Grundlage zur Beschreibung der Montagevorgänge. Die abstrakten Klassen der Skills werden initial von Arbeitsplanern erstellt und können anschließend beliebig instanziiert und parametrisiert werden, um Produktanforderungen, Fähigkeiten von Stationen und Ressourcen sowie Arbeitspläne abzubilden. Das Informationsmodell der Skills wird in Abschnitt 4.2 im Detail beschrieben.

Die Ressourcen-Domäne (Abschnitt 4.3) beinhaltet Modelle und Methoden zur Abbildung der Funktionen und Eigenschaften des bestehenden Montagesystems sowie der bekannten, bei der Planung zu berücksichtigenden Ressourcen. Grundlage der Modellierung bildet das Informationsmodell der Skills. Eingangsinformationen des Systems zur automatischen Arbeitsplanung sind ein Umweltmodell des Montagesystems sowie eine *Ressourcenbibliothek*. Das Umweltmodell bildet das Layout sowie die räumliche Anordnung der Ressourcen des Montagesystems ab. Es wird initial in der Phase der Montagesystemplanung erstellt und während der Arbeitsplanung laufend aktualisiert. Die Ressourcenbibliothek verwaltet die digitalen Modelle der bei der Planung zu berücksichtigenden Ressourcen. Das Ressourcenmodell (Abschnitt 4.3.1) wurde von MICHNIEWICZ & REINHART (2014,

4 Entwicklung eines Systems zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung

2016) eingeführt und beschreibt Geometrie, Kinematik, Zustände, Skills, Eigenschaften und Schnittstellen der Ressourcen. Die Modellierung der Ressourcen erfolgt durch die Betriebsmittelplanung. Eine in Abschnitt 4.3.3 im Detail erläuterte Methode analysiert automatisch das Umweltmodell sowie die Informationen aus der Ressourcenbibliothek und generiert das Skill-basierte Fähigkeitenmodell des Produktionssystems. Das Fähigkeitenmodell bildet die Maschinen- und Handhabungsflexibilität sowie die Rekonfigurierbarkeit des Montagesystems ab.

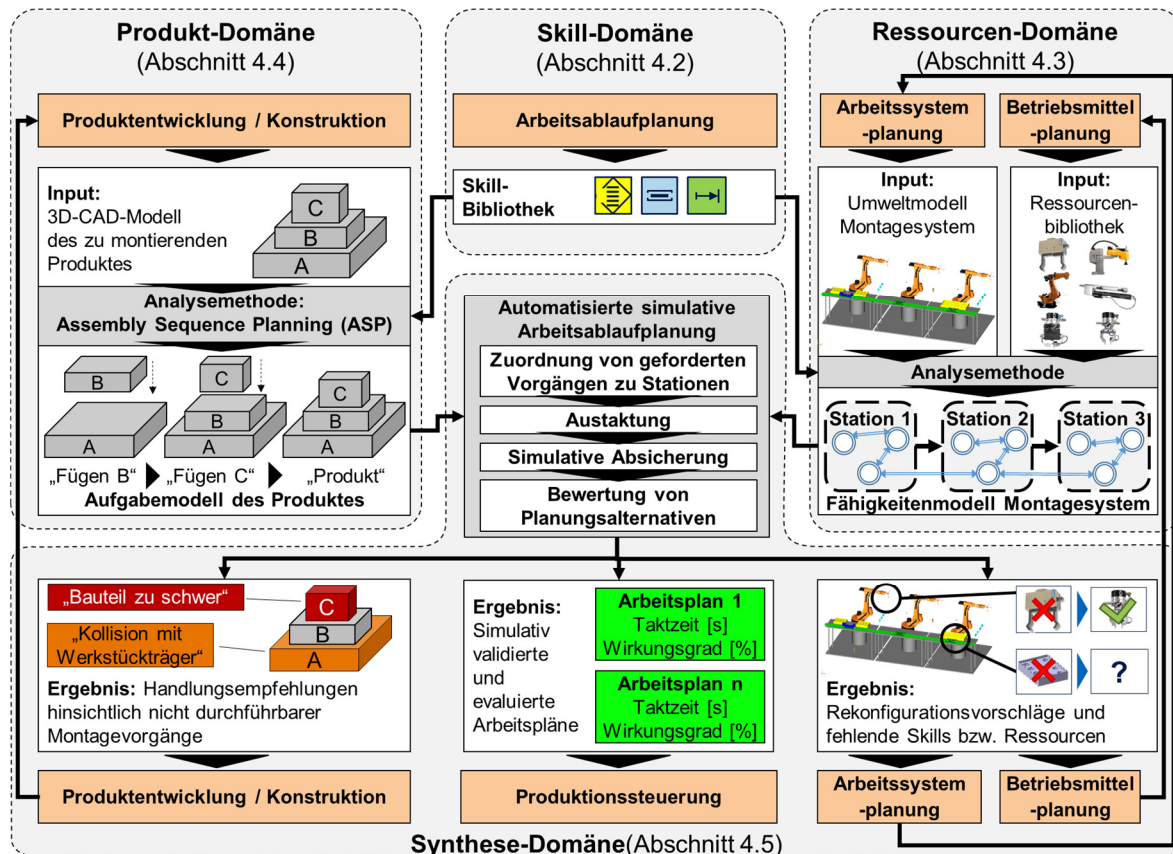


Abbildung 11: Übersicht des Systems zur automatisierten simulationsgestützten Arbeitsplanung in der Montage.

Die Produkt-Domäne bündelt die Daten und Methoden zur Modellierung und Analyse des Produktes. Sie wird in Abschnitt 4.4 genauer betrachtet. Die grundlegende Eingangsinformation des Planungsvorgehens ist das 3D-CAD-Modell des zu montierenden Produktes, das vom Konstrukteur erstellt wird. Mittels einer ASP-Analysemethode erfolgt eine automatisierte Generierung des Aufgabenmodells des Produktes. Dieses bildet die Anforderungen des Produktes hinsichtlich der durchzuführenden Vorgänge ab und basiert auf dem Informationsmodell der Skills. Das Aufgabenmodell fokussiert dabei die geforderten primären Montagevorgänge. Zur Berücksichtigung der Operationsflexibilität enthält es unterschiedliche valide Montagereihenfolgen.

Die Synthese-Domäne, die in Abschnitt 4.5 ausführlich behandelt wird, dient der automatischen skillbasierten Synthese des Aufgabenmodells des Produktes sowie des Fähigkeitenmodells des Produktionssystems. Sie beinhaltet die Generierung alternativer Arbeitspläne durch die Zuordnung der geforderten Montagevorgänge zu geeigneten Stationen und Ressourcen, die Austaktung des Montagesystems, die simulative Absicherung der Zuordnungen sowie eine wirtschaftliche Bewertung von Planungsalternativen. Im Falle einer erfolgreichen Arbeitsplanung, also der validen, eindeutigen Zuordnung sämtlicher vom Produkt geforderten Montagevorgänge zu geeigneten Ressourcen im Montagesystem, besteht das Ergebnis der Planungs-Domäne aus validen Arbeitsplänen, die an die Produktionssteuerung übergeben werden können. Das durchgängige, skillbasierte Informationsmodell dient als Grundlage für die Modellierung der Arbeitspläne.

Im Falle von Aufgabenmodellen, die geforderte Montagevorgänge enthalten, die in der vorliegenden Konfiguration des Produktionssystems nicht durchgeführt werden können, werden automatisiert Handlungsempfehlungen generiert. Die Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Produktgestalt werden an den Produkt-Konstrukteur übergeben und erlauben eine zielgerichtete Anpassung des Produktes an die Restriktionen des Montagesystems.

Des Weiteren leitet das System in der Synthese-Domäne automatisiert Handlungsempfehlungen hinsichtlich empfohlener Rekonfigurationen des Montagesystems ab. Ungeeignete Ressourcen im Ausgangszustand des Montagesystems werden erkannt und geeignete Alternativen aus der Ressourcenbibliothek vorgeschlagen. Falls keine geeigneten alternativen Ressourcen in der Ressourcenbibliothek gefunden werden können, erhält die Betriebsmittelplanung einen detaillierten Auftrag zur Entwicklung bzw. Beschaffung neuer Ressourcen anhand der Beschreibung der geforderten Montagevorgänge. Die neuen Ressourcen können zur Ressourcenbibliothek hinzugefügt und anschließend im Rahmen der automatisierten Arbeitsplanung berücksichtigt werden.

Das System erlaubt die Automatisierung einer Vielzahl von Planungsschritten in der Arbeitsplanung. Dennoch trifft letztendlich der Mensch die letztendliche Entscheidung über die Auswahl einer Montagereihenfolge, eines Arbeitsplans oder über die Anpassung des Produktes beziehungsweise des Montagesystems. Das System ist in der Lage, Lösungsalternativen anzubieten und monetär und temporär zu evaluieren, die im Betrachtungshorizont des Planungssystems als valide angesehen werden. Die endgültige Validität der Arbeitspläne ist aufgrund der Unvollständigkeit der Parameter zum Abgleich sowie die Nutzung vereinfachter Modelle in den Simulationen nicht sichergestellt. Daher sind die Ergebnisse des Planungssystems vor der realen Durchführung der Montage entsprechend in der Realität abzusichern. Im

Falle von notwendigen Änderungen des Produktes oder des Produktionssystems obliegt die endgültige Entscheidung hinsichtlich der Art und Ausprägung der Anpassung ebenfalls dem Nutzer.

4.2 Skillbasiertes Informationsmodell zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung

4.2.1 Einleitung

Grundlage des Informationsmodells bildet der vorgestellte Ansatz der semantischen, herstellerunabhängigen und funktionsorientierten Beschreibung elementarer Montagevorgänge in Form von Skills. Im Rahmen dieser Arbeit werden Skills auf zwei Ebenen definiert und im Folgenden *Funktionsprimitiva (FP)* und *Tasks* genannt. FP beschreiben Montagevorgänge auf Ebene elementarer Montagevorgänge wie z. B. „Sichern“ und „Bewegen“. FP werden in Abschnitt 4.2.2 spezifiziert. Tasks beschreiben wiederkehrende Montagevorgänge und setzen sich aus definierten Sequenzen von Funktionsprimitiva zusammen. Beispielhaft sei das „Zusammensetzen zweier Baugruppen beschreiben“, das sich aus den elementaren Vorgängen „Bewegen“, „Sichern“ und „Lösen“ ergibt (vgl. z. B. CUIPER (2000), THOMAS & WAHL (2010), HUCKABY & CHRISTENSEN (2014), MICHNIEWICZ & REINHART (2016)). Tasks werden in Abschnitt 4.2.3 näher erläutert.

4.2.2 Einführung von Funktionsprimitiva

Unterschiedliche Autoren stellen Vorschläge für Skill-Taxonomien vor, die sich in der Regel an Normen wie der VDI-RICHTLINIE 2860 und DIN 8593 orientieren. Die vorliegende Arbeit baut auf der Taxonomie von REINHART ET AL. (2017) und HAMMERSTINGL & REINHART (2017) auf, die Funktionsprimitiva teilweise analog zur VDI-RICHTLINIE 2860 in „Bewegen“, „Verbinden“, „Kontrollieren“, „Speichern“ und „Sonderoperationen“ gliedern (siehe Abb. 12).

Die Funktionsprimitiva bilden eine eigene Klasse und können sowohl zur Beschreibung von vom Produkt geforderten Montagevorgängen als auch zur Beschreibung von Fähigkeiten von Ressourcen verwendet werden. FP erlauben die Berücksichtigung der Maschinenflexibilität aufgrund einer möglichst allgemeingültigen Modellierung der von Ressourcen durchführbaren Montagevorgänge. Beispielhafte Unterklassen von Funktionsprimitiva sind „variables Bewegen“, „Sichern“, „Entsichern“, „Bereitstellen“ und „Schrauben“. Die uninstanziierten Unterklassen sind in der Skill-Bibliothek gespeichert.

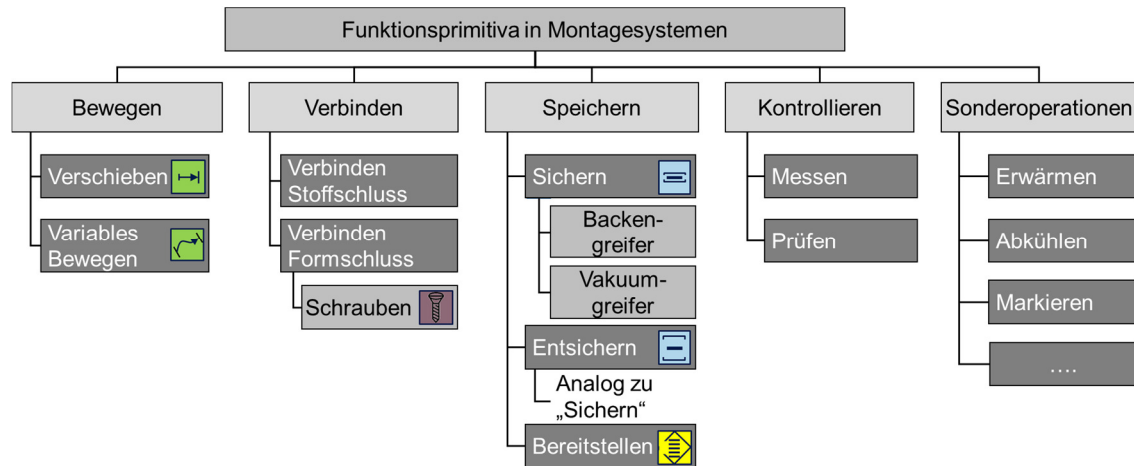


Abbildung 12: Auszug der Funktionsprimitiva-Taxonomie in Anlehnung an HAMMERSTINGL & REINHART (2017) und REINHART ET AL. (2017). Symbole in Anlehnung an die VDI-RICHTLINIE 2860.

Ausgehend von den uninstanziierten Unterklassen werden vier unterschiedliche Instanzen von FP unterschieden. Die Zusammenhänge zwischen den vier Instanzen sowie dem Produkt und den Ressourcen sind in Abb. 13 dargestellt. Wird das FP zur Beschreibung eines vom Produkt geforderten Montagevorgangs verwendet, wird es als *Anforderungs-FP (AFP)* instanziiert (Abb. 14 a)) und so in die Produkt-Domäne überführt. FP, welche die von einer Ressource durchführbaren Montagevorgänge beschreiben, werden *Fähigkeiten-FP (FFP)* genannt (siehe Abb. 14 b)) und in der Ressourcen-Domäne verwendet. Zum Aufspannen des Lösungsraumes und zur Speicherung von Planungsalternativen in der Synthese-Domäne werden *Alternativen-FP (ALTFP)* eingeführt (Abb. 15). Diese verknüpfen ein Anforderungs-FP mit den FFP unterschiedlicher Ressourcen und ermöglichen so das Aufspannen eines Lösungsraums an Alternativen, vergleichbar mit einem morphologischen Kasten. Die eindeutige und valide Zuordnung eines AFP zu einem FFP wird *Arbeitsplan-Funktionsprimitiva (APFP)* genannt (Abb. 16).

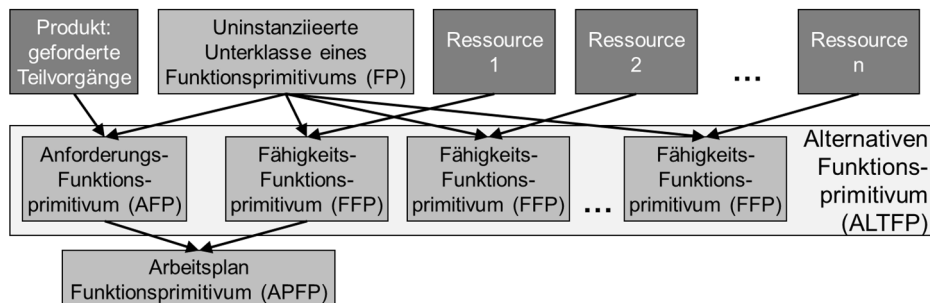


Abbildung 13: Zusammenhänge zwischen Instanzen von Funktionsprimitiva. Die Pfeile geben an, welche Informationen bei der Instanzierung der FP in welcher Sequenz zusammengeführt werden.

Zur Beschreibung eines FP wird dieses in den *Abgleich-Anteil*, den *Zustands-Anteil* sowie den *Geometrie-Anteil* untergliedert (vgl. Abb. 14-16).

Der *Abgleich-Anteil* beschreibt Parameter, die unabhängig von einem Anfangs- und Endzustand eines Vorgangs sind, vgl. z. B. DEUTSCHLÄNDER (1989), OSTGATHE (2012), BACKHAUS (2016) und JÄRVENPÄÄ ET AL. (2016). Sie dienen dem parametrischen Abgleich zwischen Produktanforderungen und Ressourcenfähigkeiten, also dem qualitativen und quantitativen Abgleich zwischen AFP und FFP. Der Vorgang des parametrischen Abgleiches wird nach HAMMERSTINGL & REINHART (2017) als *Matchmaking* bezeichnet. Die instanziierten Abgleich-Anteile der AFP und FFP sind mit *Parameterwerten* beschrieben. Je nach Unterklasse des FP sind die Parameter des Abgleich-Anteiles sowie die einzuhaltenden Relationen zwischen ihnen unterschiedlich. Eine Zuweisung eines AFP zu einem FFP ist parametrisch valide, wenn beim Vergleich aller Anforderungs-Parameterwerte mit den Fähigkeits-Parameterwerten alle *geforderten Relationen* eingehalten sind (vgl. Abb. 14-16). Beispielhaft seien das Gewicht eines zu haltenden Bauteils, das kleiner sein muss als die Traglast eines Greifers für das FP „Sichern“ oder das Drehmoment einer Verschraubung sowie das zwingend höhere aufbringbare Drehmoment einer Spindel für das FP „Schrauben“ genannt. Voraussetzung für die Möglichkeit des Abgleiches zwischen AFP und FFP ist die Übereinstimmung der Semantik sowie der physikalischen Einheiten im Abgleich-Anteil (REINHART ET AL. 2017).

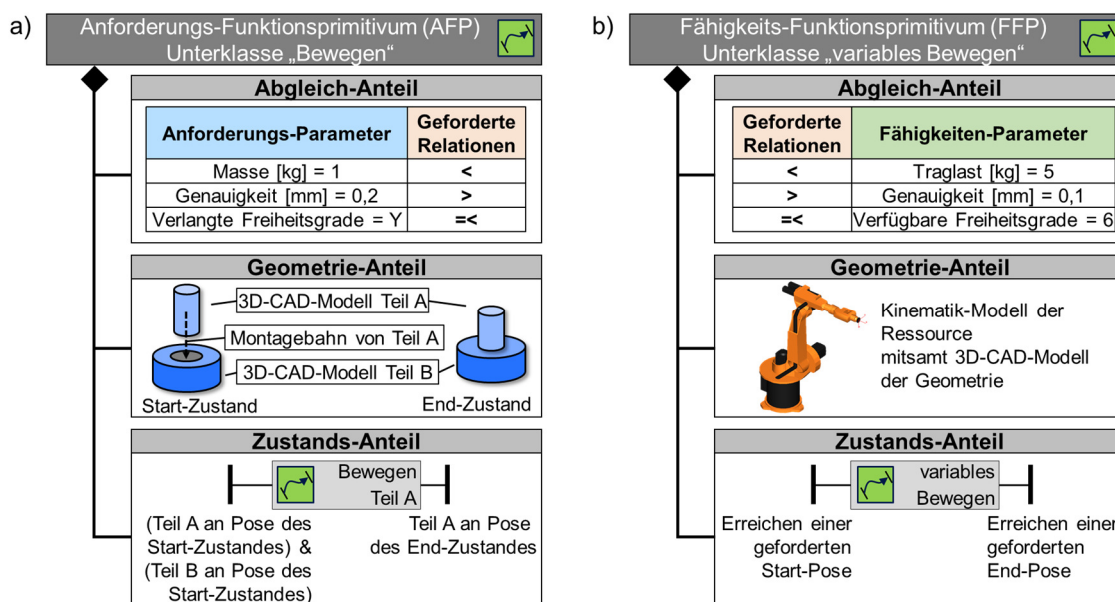


Abbildung 14: Bestandteile eines a) Anforderungs-Funktionsprimitivums (AFP) und b) eines Fähigkeits-Funktionsprimitivums (FFP) am Beispiel des FP „Bewegen“.

4.2 Skillbasiertes Informationsmodell zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung

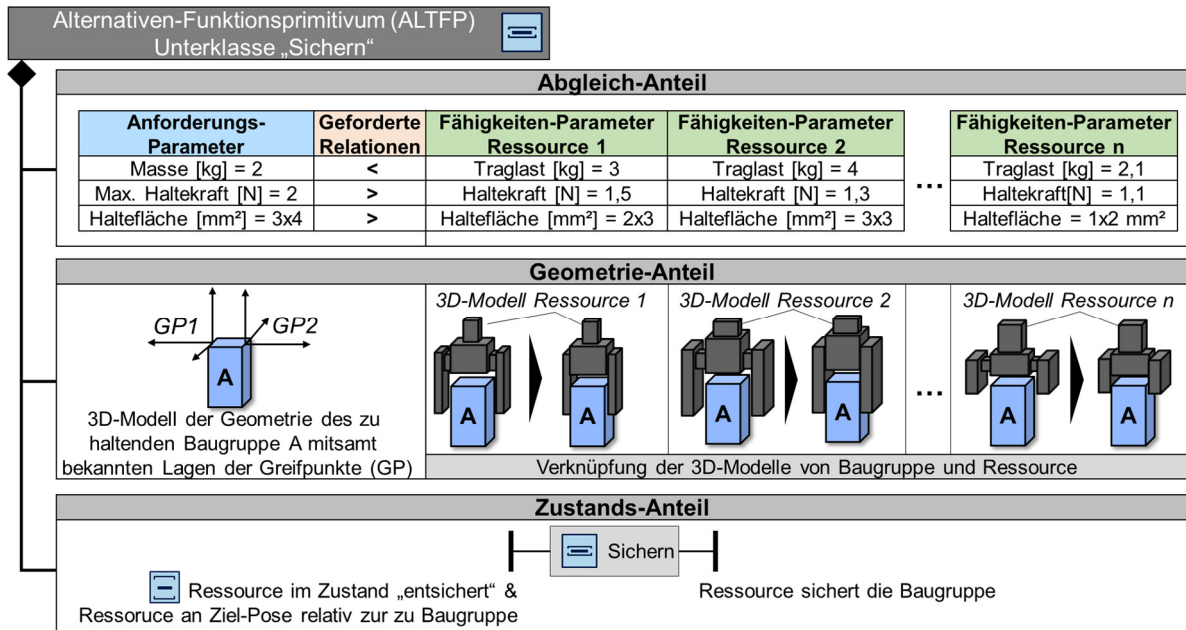


Abbildung 15: Visualisierung der Bestandteile eines Alternativen-Funktionsprimitivums (ALTFP) am Beispiel der FP-Unterklasse "Sichern". Dem Anforderungs-FP wurden unterschiedliche Ressourcen zugeordnet.

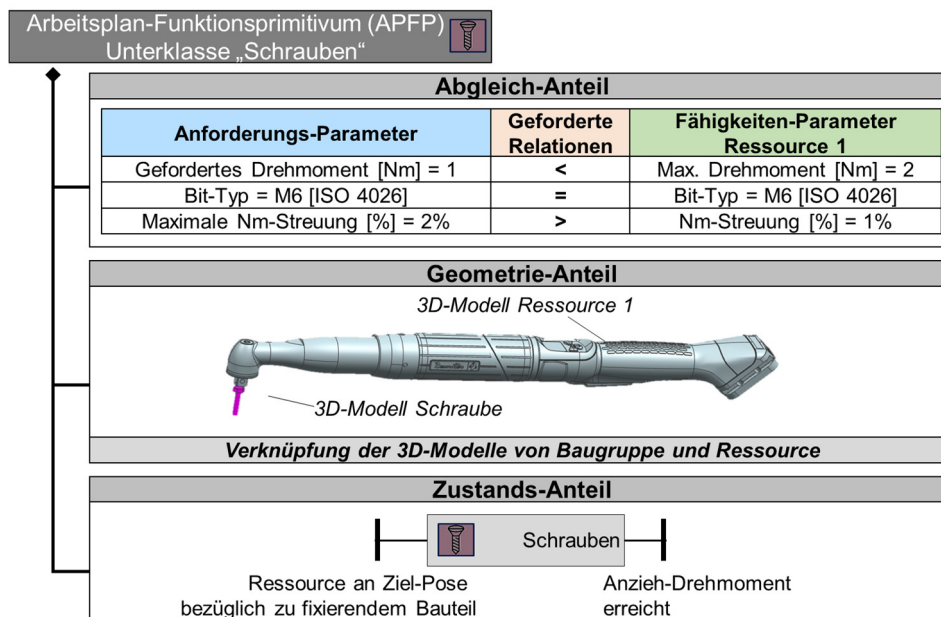


Abbildung 16: Arbeitsplan-Funktionsprimitivum am Beispiel der FP-Unterklasse "Schrauben". Dem AFP wurde eindeutig eine valide Ressource zugeordnet.

Der *Geometrie-Anteil* eines Skills verknüpft diesen mit dem 3D-CAD-Modell des Produktes bzw. der Ressource, vgl. z. B. NAUMANN ET AL. (2010), PFROMMER ET AL.

(2015), BACKHAUS (2016) und REINHART ET AL. (2017). Dies ermöglicht eine geometrische Beschreibung der Vorgänge und Zustandsänderungen. Das 3D-CAD-Modell von Ressourcen beschreibt deren Kinematik, z. B. im Fall von Backengreifern oder Robotern. Der Geometrie-Anteil erlaubt den Zugriff auf die Lage der Schnittstellen des beschriebenen Elementes im Koordinatensystem dessen 3D-CAD-Modells. Beispielhaft seien geeigneter Greifpunkte einer Baugruppe oder die Eingangs- und Ausgangsschnittstellen einer Ressource genannt.

Der *Zustands-Anteil* eines Funktionsprimitivums (vgl. z. B. FELDMANN (1997), MOSEMANN & WAHL (2001), NAUMANN ET AL. (2010) und BACKHAUS (2016)) beschreibt in Form von SFC jeweils dessen Anfangs- und Endzustand sowie die durchzuführenden Vorgänge. Die Struktur des SFC ist abhängig von der Unterklasse des FP. Die Anfangs- und Endzustände sind jeweils mittels SFC-Transitionen beschrieben, die mit entsprechenden Bedingungen verknüpft sind. Die Vorgangsbeschreibung erfolgt mittels SFC-Schritten mit verbundenen Aktionen. Im Falle von AFP beschreibt der Zustands-Anteil den Anfangs- und Endzustand des Produktes vor und nach Durchführung des FP, etwa dessen Montagezustand sowie eine Ausgangs- und eine Zielposition eines Einzelteils im Falle des FP „Bewegen“. Die Beschreibung der Bewegungsbahnen wird als Sequenz von durchzuführenden Aktionen, die mit einem SFC-Schritt verbunden sind, modelliert. Die Beschreibung der Bewegungsbahn erfolgt im Koordinatensystem des 3D-CAD-Modells der Baugruppe. Im Falle von FFP sind die Aktionen in den SFC mit ausführbaren Steuerbefehlen der Ressourcen verknüpft, vgl. z. B. DRAHT (2010), NAUMANN ET AL. (2010), STENMARK & MALEC (2015) und BACKHAUS (2016). Der Zustands-Anteil von FFP beschreibt die Zustände der Ressource bei der Durchführung des Skills. Die Zustände der Ressource sind mit dem Geometrie-Anteil verknüpft und können eine Veränderung des 3D-CAD-Modells der Ressource bewirken. Beispielhaft seien die FFP „Halten“ und „Schließen“ eines mechanischen Greifers genannt, dessen Geometrie sich in Abhängigkeit vom Zustand ändert.

Im Falle von kombinierten Ressourcen, die über ihre Schnittstellen miteinander verbunden sind, können weitere Funktionsprimitiva mit anderer Funktionalität entstehen, vgl. z. B. JÄRVENPÄÄ ET AL. (2016) und HAMMERSTINGL & REINHART (2017). Diese werden im Folgenden *kombinierte Funktionsprimitiva* genannt und sind mitsamt den Regeln, welche die Voraussetzung für ihre Entstehung beschreiben, in der Skill-Bibliothek gespeichert. Beispielhaft sei ein Roboter mit dem FP „variables Bewegen“ und ein am Roboter angeschlossener Greifer mit dem FP „Sichern“ genannt, die gemeinsam das FP „Handhaben“ durchführen können, vgl. Abb. 17. Der Abgleich-Anteil des kombinierten FFP ergibt sich dabei nicht ausschließlich aus einer Zusammenführung der Parameter der ressourcenspezifischen Funktionsprimitiva. Für jedes kombinierte FP werden daher *wechselwirkende*

Parameter und *unabhängige Parameter* unterschieden. Wechselwirkende Parameter ergeben sich aufgrund einer gegenseitigen Beeinflussung der Ressourcen und müssen anhand der Eigenschaften sowie der individuellen Parameterwerte der Ressourcen ermittelt werden. Die Regeln für ihre Verknüpfung sind Teil der Beschreibung des uninstanciierten kombinierten FP in der Skill-Bibliothek. Beispielhaft sei die Traglast eines Roboters und eines damit verbundenen Greifers gegeben, die dem jeweils kleineren Wert der beiden individuellen Parameterwerte entspricht, wobei die Traglast des Roboters um die Masse des Greifers reduziert werden muss. Unabhängige Parameter werden hingegen unverändert von den ressourcenspezifischen FP übernommen. Der Geometrie-Anteil kombinierter Funktionsprimitiva ergibt sich durch die Zusammenführung ihrer CAD-Modelle an den Schnittstellen der Ressourcen. Der Zustands-Anteil der ressourcenspezifischen FP wird nicht zusammengeführt und die Ressourcen können zur Programmierung weiterhin individuell angesprochen werden.

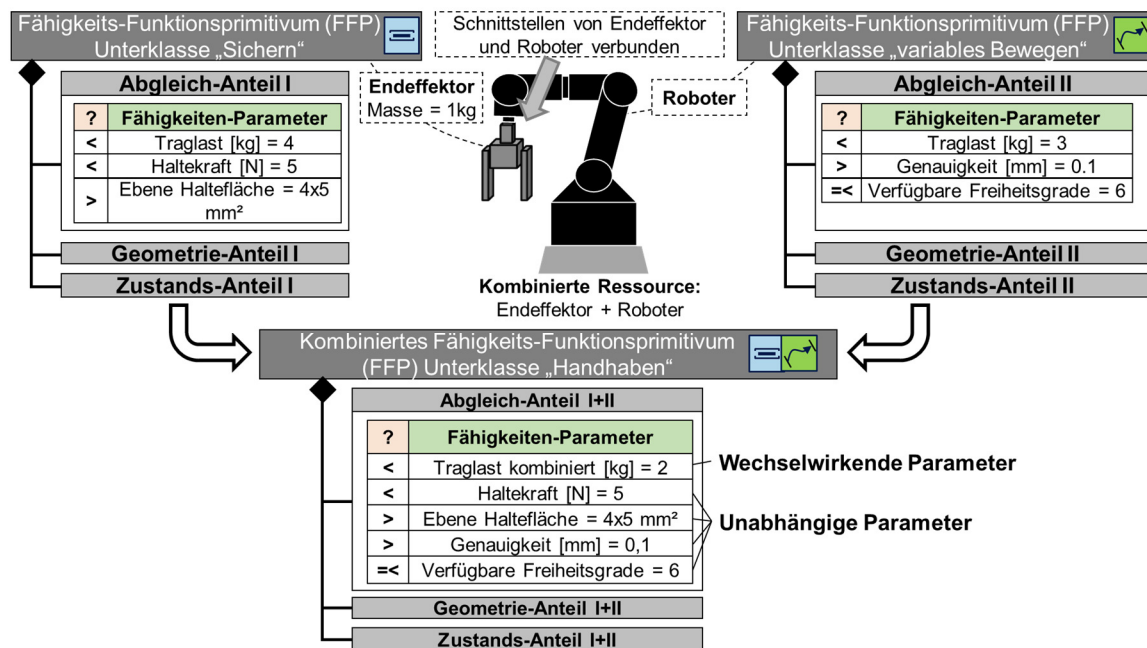


Abbildung 17: Kombination der FFP "Sichern" eines Endeffektors und "variables Bewegen" eines Roboters zum kombinierten FFP "Handhaben" der kombinierten Ressource Endeffektor und Roboter.

4.2.3 Einführung von Tasks

In einer Vielzahl von Arbeiten wurden sogenannte Standardstrukturen von Montagevorgängen definiert (vgl. z. B. KUGELMANN (1999), CUIPER (2000), HUCKABY & CHRISTENSEN (2014), MICHNIEWICZ & REINHART (2015)). Zur Abbildung dieser Standardstrukturen wird die Klasse der Tasks eingeführt. Diese erlaubt die Zusammenfassung wiederkehrender Sequenzen von FP in Unterklassen

4 Entwicklung eines Systems zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung

von Tasks wie beispielsweise Handhabungs-Tasks, Zusammensetzen-Tasks, Verschraubungs-Tasks und Transport-Tasks, an denen Ressourcen mit definierten Fähigkeits-FP-Unterklassen kooperativ beteiligt sind. Beispielhaft sei in Abb. 18 ein Fügevorgang mitsamt der vorgelagerten Zuführung in Form der geforderten FP dargestellt. Analog zur Verwendung des Begriffs im Kontext der Austattung entsprechen Tasks Vorgangsbeschreibungen, die dem Montagesystem auf Ebene der Stationen zugeordnet werden (vgl. BOYSEN ET AL. 2009).

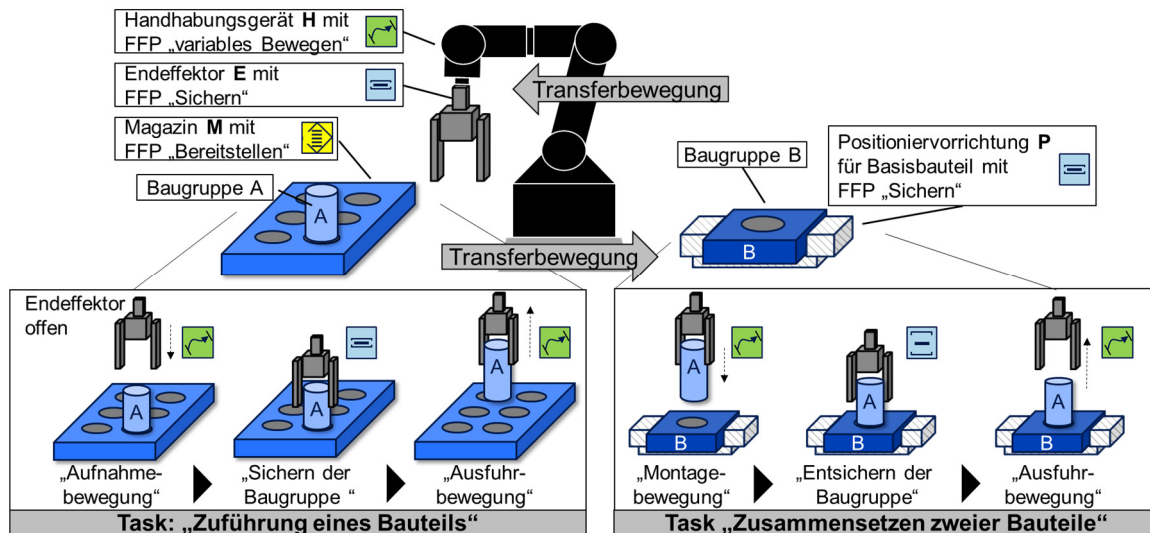


Abbildung 18: Beispielhafte wiederkehrende Standardstrukturen in der Montage.

Analog zur Differenzierung zwischen den unterschiedlichen Instanziierungen der FP werden ausgehend von uninstanziierten Tasks aus der Skill-Bibliothek vier Instanziierungen von Tasks unterschieden, nämlich *Anforderungs-Tasks*, *Fähigkeits-Tasks*, *Alternativen-Tasks* und *Arbeitsplan-Tasks*. Abb. 19 stellt die Zusammenhänge zwischen den Task-Instanzen dar. Anforderungs-Tasks bündeln die Anforderungen aller in einer Task-Instanz zusammengefassten Anforderungs-FP eines vom Produkt geforderten Montagevorgangs, vgl. Abb. 20.

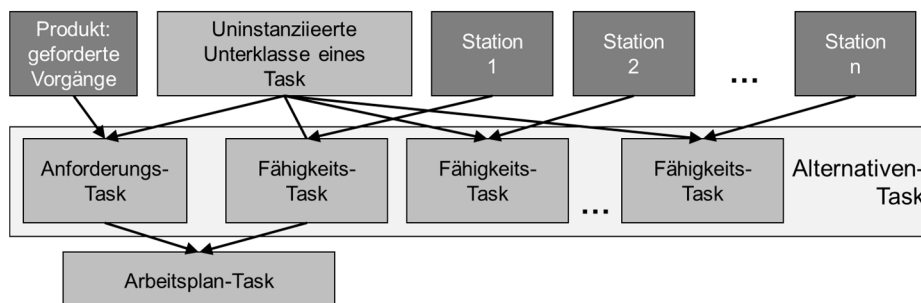


Abbildung 19: Zusammenhänge zwischen Instanzen von Tasks. Die Pfeile geben an, welche Informationen bei der Instanziierung der Tasks in welcher Sequenz zusammengeführt werden.

Ein *Fähigkeiten-Task* beschreibt einen von einer Station durchführbaren Montagevorgang unter Berücksichtigung der individuellen Funktionsprimitiva der in der Station verfügbaren Ressourcen (Abb. 21). Voraussetzung für die Durchführung der Fähigkeiten-Tasks ist die Möglichkeit der räumlichen *Kooperation* zwischen den unterschiedlichen am Vorgang beteiligten Ressourcen. So muss beispielsweise die Bereitstellung einer Baugruppe im Arbeitsraum eines Handhabungsgerätes liegen, damit das Handhabungsgerät die Baugruppe aufnehmen und zuführen kann.

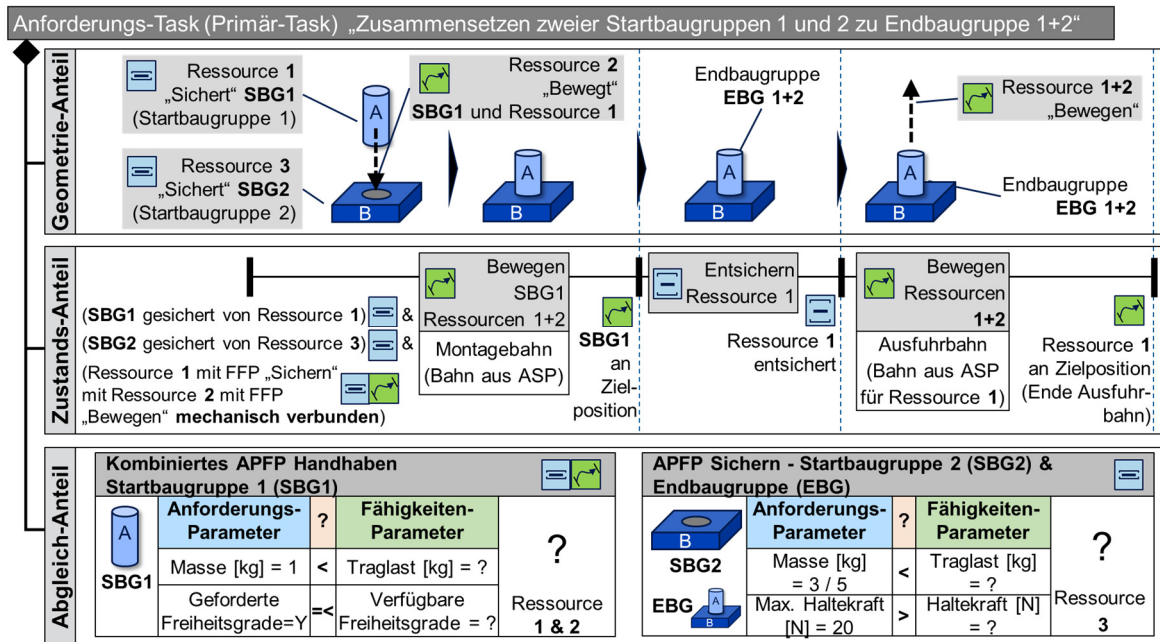


Abbildung 20: Anforderungs-Task für einen beispielhaften „Zusammensetzen“-Vorgang. Die Ressourcen 1, 2 und 3 sind noch nicht bekannt.

Alternativen-Tasks repräsentieren die Zuordnung eines Anforderungs-Tasks zu beliebig vielen Fähigkeiten-Tasks, bei denen die AFP entsprechenden FFP der Ressourcen der ausgewählten Stationen zugeordnet sind. Ein *Arbeitsplan-Task* (Abb. 22) stellt eine valide Zuweisung eines Anforderungs-Tasks zu einem Fähigkeiten-Task dar, bei dem alle AFP entsprechend geeigneten FFP der Ressourcen in einer Station zugeordnet sind.

In einem Task werden die SFC-Diagramme der einzelnen FP analog zur im Task vordefinierten Sequenz der FP zu einem SFC-Diagramm zusammengefasst. Die Logik der sequentiellen Verschaltung der FP ist für jede Task-Unterklasse spezifisch. Die Teilvorgänge in einem Task werden ohne zusätzliche Zwischenvorgänge entsprechend der Vorgabe des SFC durchgeführt.

Bei der Definition von Task-Unterklassen muss der Task-SFC gegebenenfalls um zusätzliche Bedingungen für jene Transitionen, die nicht Teil der ursprünglichen FP-

4 Entwicklung eines Systems zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung

Transitionen sind, ergänzt werden. Eine Besonderheit bilden an dieser Stelle Bedingungen zur Funktionserfüllung, die sich aus der gegenseitigen Beeinflussung der FP von kombinierten Ressourcen ergeben. Beispielhaft seien ein Greifer mit dem FFP „Sichern“ und ein Roboter mit dem FFP „variables Bewegen“ genannt. Voraussetzung für die Durchführung eines „Zusammensetzen“-Tasks ist eine mechanische Verbindung zwischen den Ressourcen. Die erste Transition des Tasks beschreibt somit die Forderung, dass die Ressource mit dem FFP „Sichern“ mechanisch mit der Ressource mit dem FFP „Bewegen“ verbunden ist, vgl. Abb. 22. Diese zusätzlichen Bedingungen sind Teil der Beschreibung der uninstanzierten Tasks in der Skill-Bibliothek.

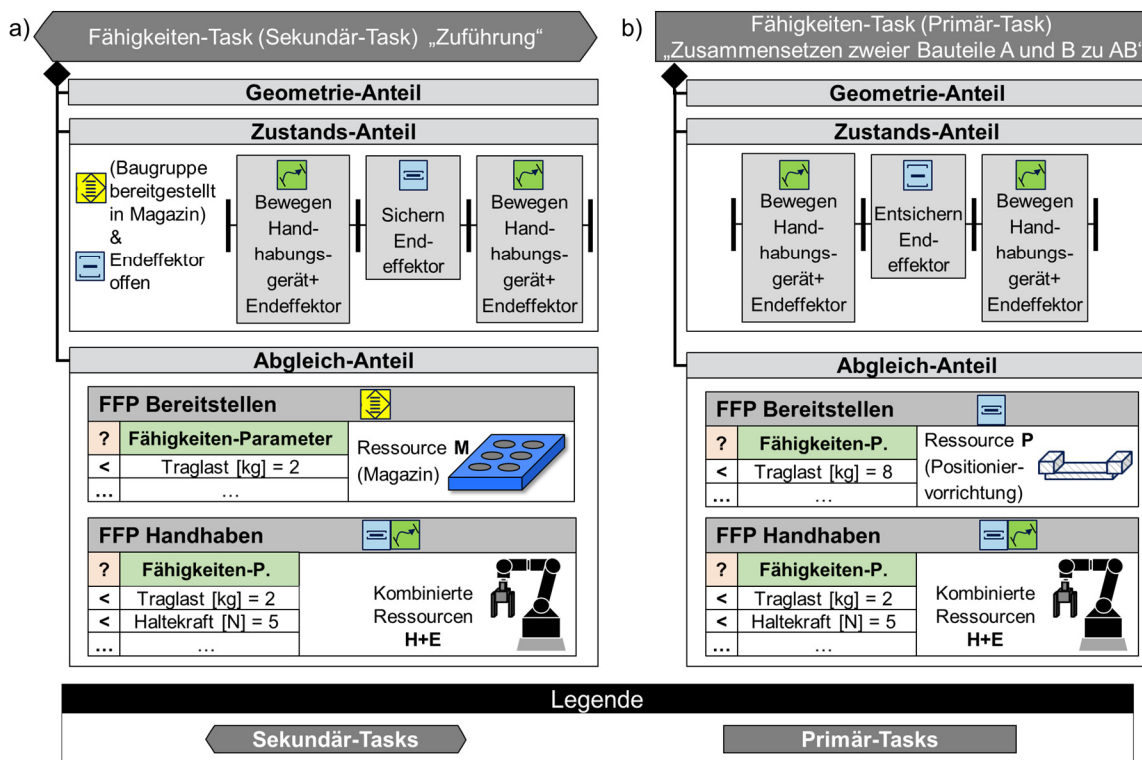


Abbildung 21: a) sekundäre und b) primäre Fähigkeiten-Tasks des beispielhaften Produktionssystems aus Abb. 18.

Des Weiteren wird zwischen *Primär-* und *Sekundär-Tasks* unterschieden. Primär-Tasks bilden wertschöpfende Primärvorgänge ab, bei denen das Produkt einen neuen Montagezustand erreicht und sich somit seiner Fertigstellung nähert. Voraussetzung für das Erreichen eines neuen Montagezustandes ist das Hinzufügen einer Baugruppe an ihrer Endposition. Primär-Tasks verknüpfen somit zwei *Startbaugruppen (SBG)* zu einer *Endbaugruppe (EBG)* (Abb. 22) (vgl. MICHNIEWICZ & REINHART 2015). Ein Primär-Task wird von Ressourcen einer Station durchgeführt. Die Endbaugruppe sowie eine der Startbaugruppen werden von derselben Ressource gesichert.

Sekundär-Tasks beschreiben Sekundärvorgänge wie Handhabungs- und Transportvorgänge, bei denen der Montagezustand des Produktes unverändert bleibt. Die identische Start- und die Endbaugruppe ist unterschiedlichen Ressourcen zugeordnet. Eine Besonderheit bilden Tasks, die Transportvorgänge zwischen Stationen beschreiben und folglich nicht eindeutig einer Station zugeordnet werden können. Die eindeutige Zuordnung der AFP von Transport-Tasks zu den am Vorgang beteiligten Ressourcen bewirkt eine eindeutige Zuordnung des Tasks zu zwei Stationen. Die Notwendigkeit, diese Task-Definition zu ergänzen, verdeutlicht die starke Abstraktion der Planung im Bereich der Austaktung, die Tasks stets eindeutig einer Station zuweist (vgl. BECKER & SCHOLL 2006, BOYSEN ET AL. 2009).

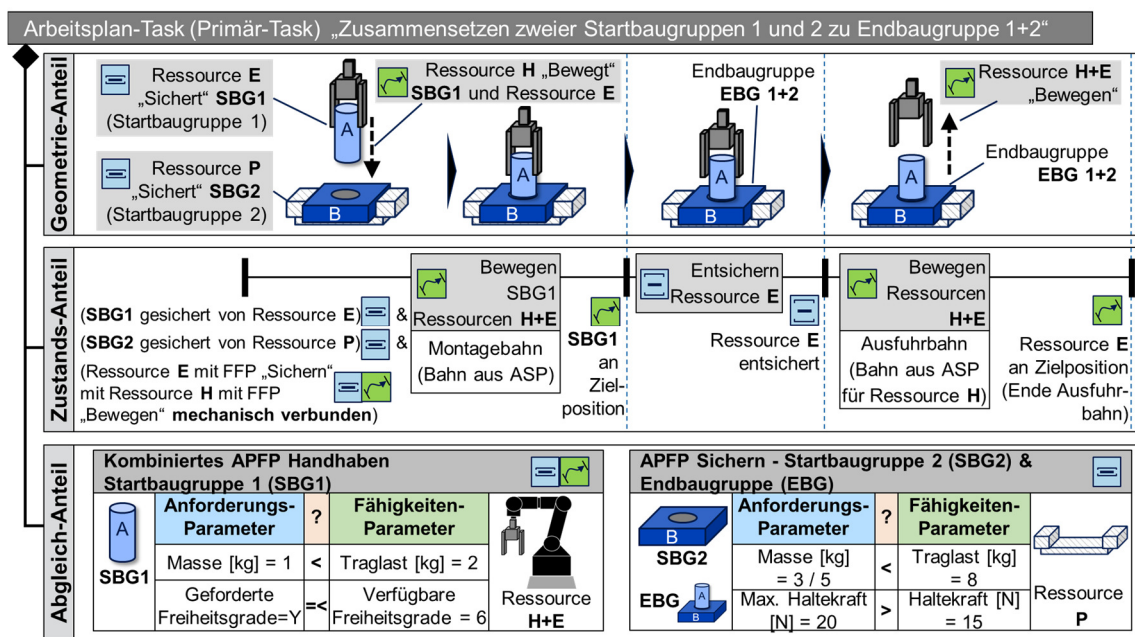


Abbildung 22: Arbeitsplan-Task abgeleitet aus dem Anforderungs-Task aus Abb. 20. Alle AFP des Anforderungs-Tasks sind mit geeigneten FFP der Ressourcen der beispielhaften Station aus Abb. 18 verknüpft und bilden somit Arbeitsplan-Funktionsprimitiva (APFP).

4.3 Modellierung und Methoden in der Ressourcendomäne

In diesem Abschnitt wird zunächst auf die digitale Modellierung von Ressourcen eingegangen. Im Anschluss daran wird in Abschnitt 4.3.2 das Fähigkeitenmodell zur Beschreibung kompletter Montagesysteme vorgestellt, das auf dem skillbasierten Informationsmodell aufbaut. Die Analysemethoden zur automatischen Generierung des Fähigkeitenmodells aus einem Umweltmodell des Montagesystems werden in Abschnitt 4.3.3 eingeführt.

4.3.1 Digitale Modellierung von Ressourcen

Zur Beschreibung der Eigenschaften und Fähigkeiten von Ressourcen wurde bei MICHNIEWICZ & REINHART (2016) und REINHART ET AL. (2017) ein *digitales Ressourcenmodell* eingeführt, das im Folgenden vorgestellt und ergänzt wird.

Die Ressourcenmodelle aller bekannten Ressourcen sind in der Ressourcenbibliothek gespeichert. Die Ressourcenbibliothek kann in drei Teile untergliedert werden. Der *produktionssystemspezifische* Teil der Ressourcenbibliothek umfasst ausschließlich Ressourcen, die bereits Teil des betrachteten Montagesystems sind. Werden alternative Ressourcen ausschließlich im produktionssystemspezifischen Teil gesucht, werden dem Produktionssystem keine Ressourcen hinzugefügt. Der *physisch verfügbare* Teil der Bibliothek umfasst Ressourcen, die im Unternehmen physisch vorhanden und verfügbar sind, etwa wenn sie sich in einem Lager befinden. Diese können mit geringem Aufwand zu dem betrachteten Montagesystem gebracht werden.

Des Weiteren wird der *physisch nicht verfügbare* Teil der Bibliothek definiert. Dieser umfasst Ressourcen, die vor ihrer Anwendung entweder im eigenen Unternehmen produziert oder entsprechend extern beschafft werden müssen. Die Rekonfiguration eines Montagesystems mittels Ressourcen aus dem physisch nicht verfügbaren Teil ist mit entsprechend höheren zeitlichen und monetären Aufwänden verbunden. An dieser Stelle sei die Möglichkeit einer Cloud-Plattform mit Ressourcenmodellen unterschiedlicher Hersteller genannt, die mit Hilfe einer geeigneten Semantik maschinenlesbar und -verstehbar sind (KAGERMANN 2017) und so direkt in die Planungsmethodik integriert werden können. Grundlage dafür bilden normkonforme Datenstandards wie eCl@ss oder eOTD, die eine merkmalsbasierte Klassifizierung und Beschreibung von Produkten und Ressourcen ermöglichen (HEPP ET AL. 2006, ECL@SS 2017). Ziel ist der branchen- und unternehmensübergreifende digitale Austausch von Daten. Geometrische Modelle und skillbasierte Beschreibungen werden von diesen Normen nicht berücksichtigt.

Das digitale Ressourcenmodell umfasst die individuellen *Ressourcen-Eigenschaften*, ihre *Schnittstellen und Fähigkeits-Funktionsprimitiva*, ein *3D-CAD-Modell der Ressource mitsamt Kinematik-, Verhaltens- und Arbeitsraummodell* sowie ein *Zustandsmodell*, vgl. Abb. 23.

Die *Ressourcen-Eigenschaften* enthalten Informationen, die nicht Teil der Fähigkeits-FP sind. Sie beinhalten Verwaltungs-Eigenschaften zur Einbindung des Modells in das Planungssystem, allgemeine physische Eigenschaften der Ressource wie deren Masse, technische Eigenschaften, die bei der Planung berücksichtigt werden sollen, wie z. B. die Eignung für die Nutzung in einem Reinraum, sowie monetäre

Eigenschaften, die die Grundlage für die monetäre Bewertung von Arbeitsplänen bilden.

Die *Schnittstellenbeschreibung* der *Eingangs-* und *Ausgangs-Schnittstellen* dient zur Abbildung der möglichen Relationen zwischen den Ressourcen. Diese können an ihren jeweiligen Eingangs- und Ausgangs-Schnittstellen miteinander verbunden werden. Die Schnittstellen werden analog zu den in Abschnitt 2.3.4.1 vorgestellten Arten von Schnittstellen kategorisiert und anhand entsprechender Schnittstellen-Normen beschrieben (vgl. MICHNIEWICZ & REINHART (2016)).

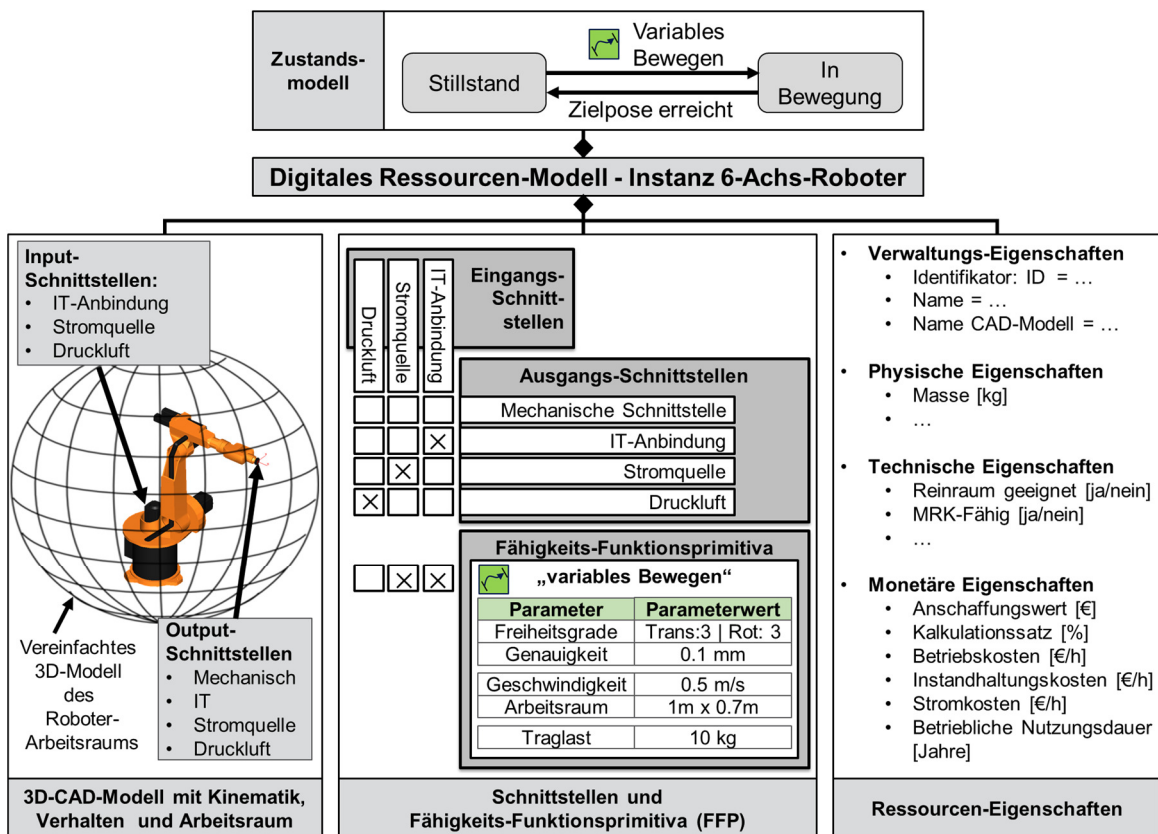


Abbildung 23: Digitales Ressourcen-Modell am Beispiel eines 6-Achs-Roboters.

Die *Schnittstellen* und *Fähigkeits-Funktionsprimitiva* beinhalten die Relationen zwischen den Eingangs-Schnittstellen und den Fähigkeits-Funktionsprimitiva sowie den Ausgangs-Schnittstellen, vgl. Abb. 23. Eine Ressource ist *aktiv*, wenn sie zur Durchführung ihrer Fähigkeits-FP in der Lage ist oder Ausgangs-Schnittstellen anbietet. *Passive* Ressourcen sind Teil des Montagesystems, ihre Eingangs-Schnittstellen sind jedoch nicht mit geeigneten Ausgangs-Schnittstellen verbunden. Somit sind passive Ressourcen in der betrachteten Konfiguration nicht zur Durchführung von Montage-vorgängen nutzbar. Voraussetzung für die Durchführbarkeit der Fähigkeits-FP sowie die Funktionsfähigkeit der Ausgangs-Schnittstellen der Ressource ist das Anbinden der geforderten Eingangs-

Schnittstellen einer Ressource an geeignete Ausgangs-Schnittstellen einer anderen aktiven Ressource. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 23 für eine beispielhafte Ressource dargestellt. So kann der Roboter das FFP „variables Bewegen“ nicht ohne die Eingangs-Schnittstellen „IT-Anbindung“ an eine Steuerung und ohne eine geeignete „Stromquelle“ durchführen. Des Weiteren kann der Roboter an seinem Flansch die Ausgangs-Schnittstelle für „Druckluft“ nur dann anbieten, wenn dessen Eingangs-Schnittstelle an eine geeignete „Druckluft“-Ausgangs-Schnittstelle angeschlossen ist. Die Fähigkeits-FP beschreiben die von der Ressource angebotenen Funktionsprimitiva analog zum vorgestellten Informationsmodell.

Das *Zustandsmodell* beschreibt Zustände und Zustandsübergänge einer Ressource in einem Zustandsübergangsdiagramm, wobei die Zustandsübergänge mittels Funktionsprimitiva beschrieben sind (vgl. z. B. THOMAS ET AL. (2013), BACKHAUS ET AL. (2014), STENMARK ET AL. (2015)).

Das 3D-CAD-Modell der Ressource bildet deren Geometrie, Kinematik sowie Verhalten ab. Die Kinematik der Ressourcen wird mit Hilfe von translatorischen und rotatorischen Gelenken beschrieben. Zum Beschreiben des Verhaltens werden zusätzliche Informationen bezüglich der maximalen Beschleunigungen, Geschwindigkeiten sowie der Beschränkungen der Verfahrrwege und -richtungen abgebildet. Die Verhaltensbeschreibung wird auf die Geometrie- und Kinematikbeschreibung der Ressource abgebildet (BERGERT ET AL. 2007). Des Weiteren sind die Lagen der Schnittstellen der Ressource ebenfalls in deren 3D-Modell beschrieben. Das 3D-CAD-Modell der Ressourcen ist zusätzlich um ein vereinfachtes Modell des Arbeitsraums ergänzt, das relativ zur Lage der Ressource gespannt wird. Im Falle von Handhabungseinrichtungen wie Industrierobotern und Menschen entspricht dessen Form der vereinfachten Darstellung der vom Endeffektor erreichbaren Punkte und ist somit abhängig von dessen Kinematik sowie von der Geometrie der Armteile (LOTTER & WIENDAHL 2012, FELDMANN ET AL. 2014).

4.3.2 Fähigkeitsmodell des Montagesystems

Das Fähigkeitsmodell des Montagesystems besteht aus zwei miteinander verknüpften Graphenmodellen, dem *Resource-Graph (RG)* und dem *Station-Graph (SG)*. Der RG beschreibt die Fähigkeiten eines Produktionssystems auf Ebene der Ressourcen und kombinierten Ressourcen (vgl. Abschnitt 2.3.4.1). Der SG dient der Abstraktion des Produktionssystems auf Stationsebene, die bei der Austaktung sowie bei der Berechnung der Taktzeit Anwendung findet (BECKER & SCHOLL 2006, BOYSEN ET AL. 2009). Zur Modellierung werden Graphen verwendet, da diese eine vereinfachte Erfassung von Zusammenhängen in Systemen erlauben und somit zur Visualisierung komplexer Problemstellungen geeignet sind (LINDEMANN ET AL.

2009). Graphen ermöglichen die Anwendung unterschiedlicher Suchalgorithmen, etwa zur Berechnung kürzester Pfade (DIESTEL 2010, CORMEN ET AL. 2013).

4.3.2.1 Resource-Graph

Die Knoten des RG (*RG-Knoten*, abgekürzt *RG-K*) (in den Veröffentlichungen von MICHNIEWICZ & REINHART (2015) und MICHNIEWICZ ET AL. (2016B) *Production-Graph* genannt), repräsentieren die im Montagesystem verfügbaren aktiven Ressourcen und die kombinierten Ressourcen mitsamt den von ihnen angebotenen Fähigkeits-Funktionsprimitiva, vgl. Abb. 24.

Im Falle von kombinierten Ressourcen mit der Möglichkeit zum automatischen Ressourcenwechsel (z. B. Roboter mit Wechselsystem und mehreren Endeffektoren zur Auswahl aus einem Werkzeugbahnhof) kann zu einem Zeitpunkt stets nur eine Konfiguration der kombinierten Ressource aktiv sein. Die unterschiedlichen angebotenen konfigurationsabhängigen Funktionsprimitiva werden in einem RG-Knoten zusammengefasst (in Abb. 24: RG-Knoten 2 besitzt drei mögliche Konfigurationen aufgrund der drei verfügbaren Greifer A, B und C im Arbeitsraum des Roboters 1). Zur Aktivierung einer anderen Konfiguration muss ein Werkzeugwechsel erfolgen, der einer automatischen Rekonfiguration entspricht. Unterschiedliche, vom Menschen zu führende Betriebsmittel an einer manuellen Station werden analog modelliert.

Die Kanten des RG repräsentieren mögliche Kooperationen zwischen den durch RG-Knoten repräsentierten Ressourcen. Beispielsweise seien der Materialfluss und die Handhabung von Baugruppen zwischen RG-Knoten genannt. Die Richtung der Kanten stellt die möglichen Richtungen der Weitergabe von Baugruppen dar.

4.3.2.2 Station-Graph

Die Knoten des Modells, *SG-Knoten* genannt, repräsentieren die Stationen des Montagesystems. Die RG-Knoten sind eindeutig SG-Knoten zugeordnet, siehe Abb. 24. Des Weiteren beschreiben SG-Knoten die Fähigkeiten-Tasks der Stationen. Die gerichteten Kanten im Station-Graph repräsentieren mögliche Transportvorgänge zwischen den Stationen des Montagesystems. Die Richtung der Kanten stellt die Hauptrichtung des Materialflusses dar. SG-Knoten, die keine auf sie zeigenden Kanten besitzen, stellen die Eingangs-Stationen der Montagelinie dar (siehe SG-Knoten 1 in Abb. 24). Der SG-Knoten, von dem keine gerichtete SG-Kante ausgeht, repräsentiert die Ausgangs-Station jener Linie, an der die Abnahme des Fertigproduktes erfolgt (siehe SG-Knoten 3 in Abb. 24).

4 Entwicklung eines Systems zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung

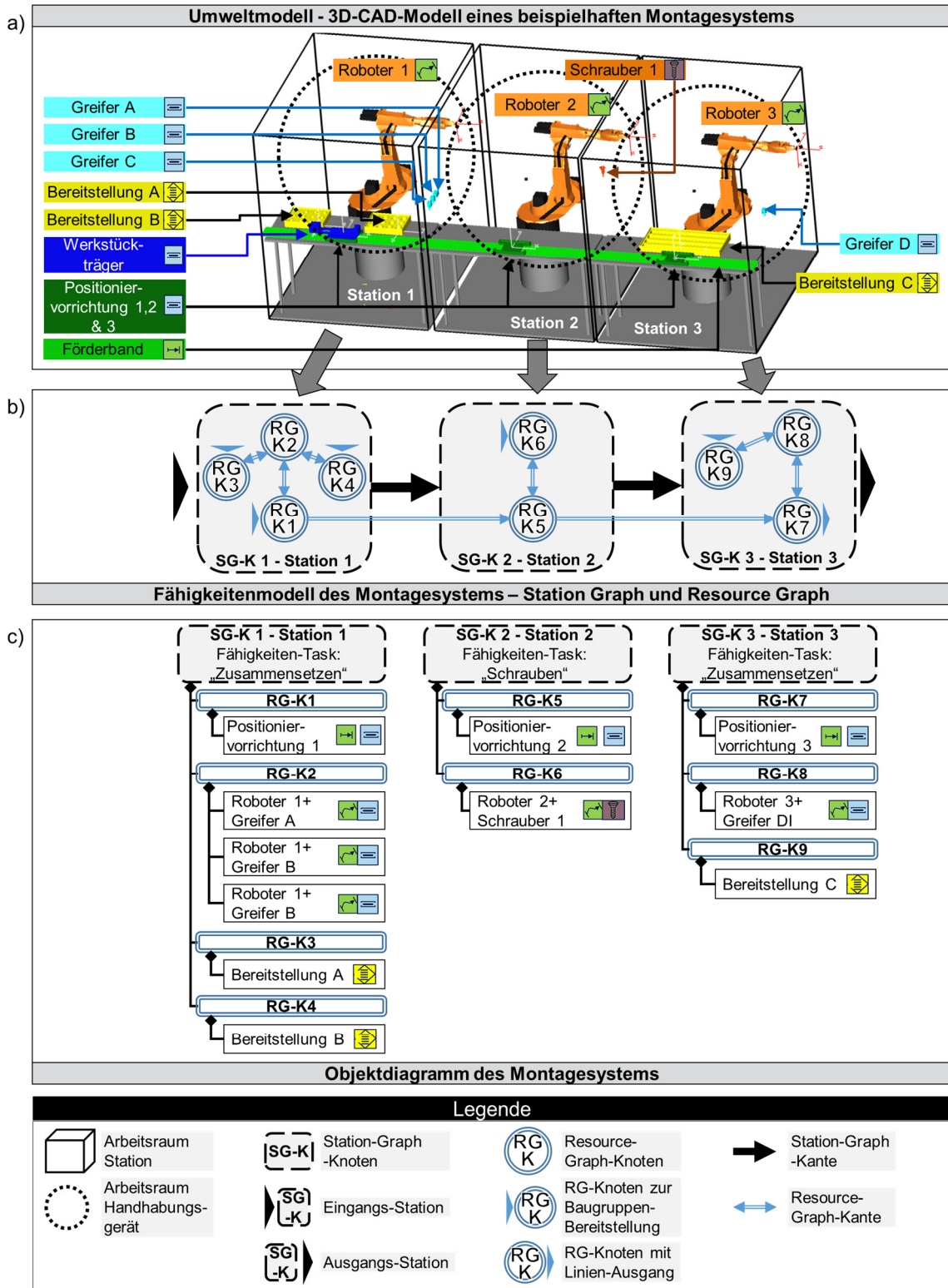


Abbildung 24: a) Umweltmodell eines Montagesystems mit drei Stationen und dargestellten Arbeitsräumen von Stationen und Handhabungsgeräten. b) Fähigkeitsmodell bestehend aus Station-Graph (SG) und Resource-Graph (RG). c) Objektdiagramm zur Darstellung der Abhängigkeiten zwischen Station-Graph, Resource-Graph und den Ressourcen des Montagesystems.

4.3.3 Analysemethoden zur Generierung des Fähigkeitenmodells

4.3.3.1 Generierung des Resource-Graph

Die Generierung des Resource-Graph erfolgt auf Basis einer Analyse der räumlichen Anordnung der Ressourcen im Umweltmodell des Produktionssystems (MICHNIEWICZ & REINHART 2015, 2016). Die Generierung der RG-Knoten erfolgt automatisiert. Initial wird für jede aktive Ressource im Montagesystem ein RG-Knoten generiert und mit den Fähigkeits-FP der Ressource verknüpft.

Die Generierung von RG-Knoten mit der Möglichkeit der automatischen Rekonfiguration geschieht wie folgt. Für Ressourcen mit der Möglichkeit des Wechsels des Endeffektors, wie z. B. Menschen oder Industrieroboter, erfolgt eine Prüfung des Vorhandenseins von passiven Ressourcen in ihrem Arbeitsraum, deren Eingangs-Schnittstellen entsprechend mit den Ausgangs-Schnittstellen kompatibel sind. Die unterschiedlichen validen kombinierten Ressourcen sowie die zugehörigen FFP werden in RG-Knoten gespeichert, siehe RG-Knoten 2 in Abb. 24.

In Abhängigkeit von der Art der Bewegung der Ressourcen, die die Grundlage für die Weitergabe von Baugruppen darstellt, werden zwei grundlegende Mechanismen bei der Erstellung von Kanten zwischen den RG-Knoten unterschieden. Befinden sich im Arbeitsraum des RG-Knotens einer aktiven Ressource mit dem FFP „Bewegen“ weitere RG-Knoten aktiver Ressourcen die Baugruppen „Speichern“ können, wird angenommen, dass ein Materialfluss zwischen den Ressourcen zumindest theoretisch möglich ist. Folglich werden die RG-Knoten miteinander verbunden. Beispielhaft sei die Verknüpfung der RG-Knoten 3 und 4 der Bereitstellungen A und B in Station 1 mit dem RG-Knoten 2 des Roboters 1 in Abb. 24 genannt.

Im Falle von Verkettungsmitteln erfolgt die Generierung der RG-Kanten durch eine Analyse der Positioniervorrichtungen. Jede Positioniervorrichtung kann einem Verkettungsmittel zugeordnet werden. Die Positioniervorrichtungen, die aktive RG-Knoten darstellen, werden mit RG-Kanten verbunden, wenn diese Teile desselben Verkettungsmittels sind und ein direkter Transport möglich ist (siehe RG-Knoten 1, 5 und 7 in Abb. 24). Die Richtung der Kanten ist abhängig von der Kinematik der Ressourcen. So sind etwa die RG-Kanten zwischen den RG-Knoten der Positioniervorrichtungen eines Förderbandes gerichtet, wenn dieses ausschließlich eine „Verschiebung“ in eine Richtung durchführen kann.

4.3.3.2 Generierung des Station-Graph

Die Generierung von Knoten des Station-Graph basiert auf der Annahme, dass jede Station ein eigenes Strukturelement besitzt und alle Ressourcen sowie kombinierte Ressourcen, die sich innerhalb des Arbeitsraums eines Strukturelements befinden, diesem zugeordnet werden.

Der Arbeitsraum von Stationen im Umweltmodell wird durch die räumliche Ausdehnung der Strukturelemente von Stationen definiert. Im Falle von manuellen Arbeitsstationen wird dieser als Quader angenommen, der den Arbeitstisch umschließt. Analog dazu wird das Volumen einer Umhausung eines Robotersystems als Stations-Arbeitsraum definiert, siehe Abb. 24. Die Fähigkeiten-Tasks der Stationen resultieren aus der Zusammenführung der Funktionsprimitiva der RG-Knoten im Arbeitsraum des Strukturelements der Station.

Ein Fähigkeiten-Task setzt laut 4.2.3 die Fähigkeit der Kooperation der am Task beteiligten Ressourcen voraus. Die Fähigkeit zur Kooperation wird als gegeben angenommen, wenn die den Ressourcen zugehörigen RG-Knoten mit RG-Kanten verbunden sind. Ressourcen, deren RG-Knoten nicht mit einer Kante verbunden sind, können nicht Teil eines Fähigkeiten-Tasks sein.

Die Generierung der SG-Kanten zwischen den SG-Knoten erfolgt durch eine Überprüfung der Überschneidung der Arbeitsräume der Stationen. Es wird angenommen, dass ein Transport zwischen direkt nebeneinander befindlichen Stationen möglich sein kann. Dabei können die Seiten der Station hinsichtlich ihrer Zugänglichkeit differenziert beschrieben werden. Des Weiteren werden Stationen, deren zugehörige RG-Knoten bereits mittels RG-Kanten verbunden sind, ebenfalls über einen SG-Knoten verknüpft, da bereits ein möglicher Materialfluss zwischen den beiden Ressourcen angenommen wird, z. B. im Falle von Verkettungsmitteln. Die Richtungen dieser SG-Kanten entsprechen jenen der dazugehörigen RG-Kanten.

4.4 Modellierung und Methoden in der Produktdomäne

In diesem Abschnitt erfolgt zunächst eine Bewertung der in Abschnitt 3.1.2 vorgestellten Ansätze zur Modellierung von Montagereihenfolgen, um eine begründete Modellauswahl für das System zur automatischen Arbeitsplanung durchzuführen. Aufbauend darauf wird in Abschnitt 4.4.2 das Aufgabenmodell zur Abbildung der Produkthanforderungen vorgestellt, das auf dem skillbasierten Informationsmodell aufbaut. Abschnitt 4.4.3 zeigt Ansätze zur effizienten Strukturierung des Aufgabenmodells, während Abschnitt 4.4.4 die Analysemethode zur Generierung des Aufgabenmodells aus 3D-CAD-Produktdaten einführt.

4.4.1 Auswahl eines Ansatzes zur Modellierung von Montagereihenfolgen

Der Schwerpunkt bei der Modellierung von Montagereihenfolgen liegt auf Füge- bzw. Primärvorgängen. Daher soll eine Bewertung der Ansätze hinsichtlich ihrer Erweiterbarkeit um Sekundärvorgänge wie Transport und Handhabung unter der Einhaltung der Modellierungskonventionen der unterschiedlichen Graphen erfolgen. Der vorgestellte Ansatz zur Beschreibung von Produkthanforderungen in Form von Tasks und Funktionsprimitiva soll mit den bestehenden Modellierungsansätzen verknüpft werden. Des Weiteren ist für eine simulative Absicherung die Kenntnis des Montagezustandes des Produktes vor und nach jedem Montagevorgang notwendig. Zusätzlich soll die Möglichkeit erörtert werden, Vormontagen, die parallel zu anderen Montagevorgängen durchgeführt werden können, sowie Cluster und Modul-Baugruppen zu modellieren.

Der Vorranggraph bietet unterschiedliche Möglichkeiten der Untergliederung zur vereinfachten Modellierung von Clustern und Vormontagen. Die Knoten des Vorranggraphen entsprechen Montagevorgängen, sodass eine Integration lösungsneutraler Prozessbeschreibungen in Form von Skills auf einfache Weise möglich ist. Die Montagezustände des Produktes sind nicht explizit in den Knoten festgelegt. Dies erfolgt erst nach der Auswahl einer Montagereihenfolge. Eine Ergänzung des Vorranggraphen um Sekundärvorgänge ist leicht möglich. Die Darstellung sämtlicher Montagereihenfolgen eines Produktes in einem Vorranggraphen ist jedoch nicht möglich (HOMEN DE MELLO & SANDERSON 1990).

Der gerichtete Graph valider Montagezustände und der Diamant-Graph können Vormontagen abbilden. Allerdings können aufgrund der zwingend sequentiellen Abbildung aller Montagezustände Vor- und Endmontagen nicht unabhängig voneinander geplant bzw. als gleichzeitig durchführbar modelliert werden.

Der gerichtete Graph valider Montagezustände, der Diamant-Graph, UND/ODER-Graphen sowie Petri-Netze können sämtliche Montagereihenfolgen in einem Graphen abbilden. Die Möglichkeit diese Verfahren ineinander zu überführen, wurde von HOMEN DE MELLO & SANDERSON (1991) nachgewiesen.

Im gerichteten Graphen valider Montagezustände, beim Diamant-Graph und beim UND/ODER-Graphen dienen Kanten zur Darstellung von Montagezustandsänderungen bzw. primären Montagevorgängen. Sie verbinden stets unterschiedliche Montagezustände. Die Modellierung von Sekundärvorgängen, bei denen sich der Montagezustand des Produktes nicht ändert, in Form von Kanten erfordert somit die direkte Verbindung von Primärvorgangs-Kanten und Sekundärvorgangs-Kanten. Dies ist durch die formelle Definition der Graphen ausgeschlossen.

Das Petri-Netz eignet sich zur Darstellung von parallelen sowie sequentiellen Montagevorgängen. Die Darstellung von Sekundärvorgängen in Form von Transitionen wäre möglich. Dabei müssten zur Darstellung aufeinander folgender Primär- und Sekundärvorgänge Transitionen direkt mit einer Kante miteinander verknüpft werden. Dies widerspricht der formalen Definition eines Petri-Netzes.

Fazit: Aufgrund der Erweiterbarkeit der Modellierung um Skills und Sekundärvorgänge ohne Verstöße gegen die Modellierungskonvention wird zur Abbildung von Montagereihenfolgen der Vorranggraph gewählt. Ein weiteres Argument für diese Entscheidung ist die Tatsache, dass sich der Vorranggraph gut in Teilgraphen aufteilen lässt, etwa um Baugruppen, Vormontagen und Cluster zusammenzufassen. Das Defizit des Vorranggraphen, nicht sämtliche Montagereihenfolgen abbilden zu können, wird nicht als kritisch angesehen. Diese Anforderung wird nicht als zwingend notwendig betrachtet, da eine manuelle Einschränkung des Lösungsraumes hinsichtlich zu betrachtender Montagereihenfolgen durch den Anwender zielführend ist, vgl. Abschnitt 2.3.2.

4.4.2 Aufgabenmodell des Produktes

Das graphenbasierte Modell der Produkthanforderungen wird bei MICHNIEWICZ & REINHART (2015) und HEUSS ET AL. (2017) *erweiterter Montagevorranggraph (eMVG)* genannt. Der eMVG ist ein gerichteter Graph, der auf dem skillbasierten Informationsmodell aus Abschnitt 4.2 aufbaut. Der eMVG bildet das Aufgabenmodell und ist Ausgangspunkt für das PPR-Datenmodell bzw. das integrierte Produktmodell (vgl. Abschnitt 2.7.2), das in den folgenden Planungsphasen unterschiedliche Stufen durchläuft und durch die Synthese mit dem Fähigkeitenmodell des Produktionssystems letztendlich alternative Arbeitspläne abbildet. Der eMVG dient zur Speicherung und Bewertung von Planungsalternativen.

Die Knoten des eMVG (*eMVG-Knoten*) sind Instanzen der Klasse Task. Je nach Planungsfortschritt entsprechen sie Anforderungen-Tasks, Alternativen-Tasks oder Arbeitsplan-Tasks. Tasks können in einer vereinfachten Form dargestellt werden, die den Task auf seinen Namen sowie die Namen der Startbaugruppen und der Endbaugruppe reduziert (vgl. Abb. 25). Montagezustände dieser Baugruppen werden als Abfolge der Baugruppenamen, jeweils getrennt durch einen Punkt, beschrieben.

Das Aufgabenmodell, das die Produkthanforderungen hinsichtlich der Primärvorgänge beschreibt, wird durch den $eMVG_0$ abgebildet. Dessen eMVG-Knoten sind ausschließlich *Primär-Anforderungs-Tasks*, vgl. Abb. 25. In jedem eMVG-Knoten des $eMVG_0$ wird eine Baugruppe zum Produkt hinzugefügt. Zur Montage jedes Einzelteils eines Produktes entspricht die minimale Anzahl an notwendigen

Anforderungs-Tasks daher der Anzahl an Einzelteilen minus eins. Der eMVG wird im Laufe des Planungsvorgehens vervollständigt und ergänzt, bis alle Anforderungs-Tasks eindeutig mit geeigneten Fähigkeiten-Tasks zu Arbeitsplan-Tasks verknüpft sind. Der Index des eMVG gibt dessen aktuelle Stufe an.

Die gerichteten Kanten des eMVG repräsentieren die Vorrangbeziehungen zwischen den eMVG-Knoten, vgl. Abb. 25. Eine gerichtete Kante verbindet die Endbaugruppe eines Vorgänger-eMVG-Knotens mit einer Startbaugruppe eines nachfolgenden eMVG-Knotens. Die Endbaugruppe des letzten eMVG-Knotens repräsentiert das fertige Produkt. Bei der Abbildung sämtlicher Montagevorgänge eines Produktes in einem eMVG entsprechen die Startbaugruppen der ersten eMVG-Knoten den Einzelteilen des Produktes. Die Montage eines Produktes ist abgeschlossen, wenn alle Tasks durchgeführt wurden. Aufgrund der Tatsache, dass die Darstellung aller Montagereihenfolgen eines Produktes in einem einzigen Vorranggraphen unmöglich sein kann (vgl. Abschnitt 4.4.1), kann das Aufgabenmodell mehrere eMVG enthalten.

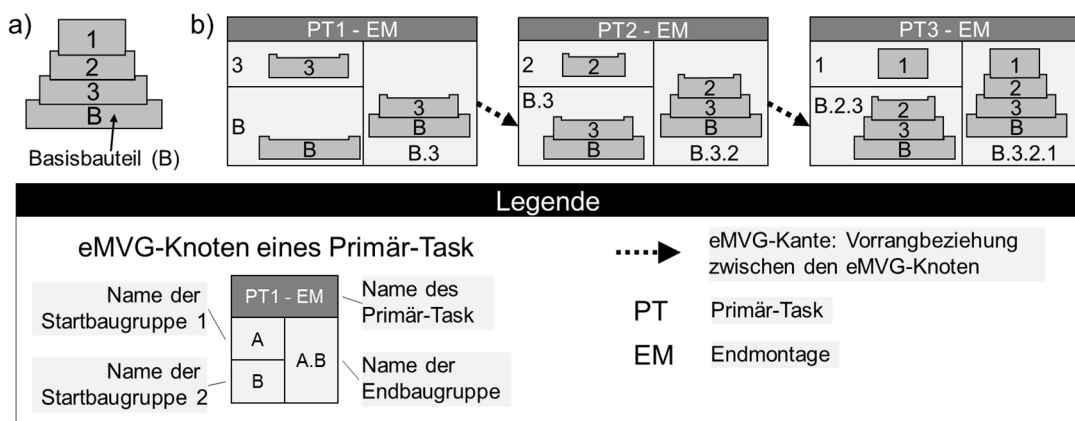


Abbildung 25: a) Beispielhaftes Produkt „B.3.2.1“. b) Zugehöriger eMVG₀ des Produktes, zusammengesetzt aus 3 eMVG-Knoten, die Primär-Tasks (PT) entsprechen. Die Tasks sind vereinfacht dargestellt.

Voraussetzung für die Durchführbarkeit eines eMVG-Knotens ist die Erreichung der geforderten Montagezustände der zugehörigen Startbaugruppen. Daher müssen alle vorhergehenden eMVG-Knoten mit in den durchzuführenden eMVG-Knoten eingehenden Kanten abgeschlossen sein. Die Reihenfolge bei der Durchführung der Vorgänger-eMVG-Knoten ist beliebig.

Zur Darstellung von Oder-Entscheidungen existieren in der Literatur zwei Möglichkeiten: Entweder wird ein neuer Knoten-Typ zur Repräsentation der Oder-Entscheidung eingeführt (ALTEMEIER ET AL. 2010) oder die entsprechende Information wird an den Kanten des Graphen hinterlegt (HOMEM DE MELLO & SANDERSON 1991). Um die Komplexität bei der Modellierung der Produkthanforderungen nicht durch die Einführung eines unnötigen weiteren Elements

zu erhöhen, werden mögliche Oder-Entscheidungen an den eMVG-Kanten gespeichert. Dazu werden die gerichteten eMVG-Kanten, die auf eine Startbaugruppe in einem eMVG-Knoten zeigen und die in einer Oder-Beziehung stehen, um ein Attribut *Alt* ergänzt, das die alternativen Vorgänger durchnummeriert.

4.4.3 Strukturierung des Aufgabenmodells des Produktes

Zur effizienteren Strukturierung der Vorrangbeziehungen zwischen den Montagevorgängen im eMVG werden unterschiedliche Teilgraphen eingeführt. Die Teilgraphen heißen *Endmontage-Teilgraph*, *Cluster-Teilgraph*, *Modul-Baugruppen-Teilgraph* sowie *Vormontage-Teilgraph*. Sie werden im Folgenden an einem Beispielfprodukt, dargestellt in Abb. 26 a), erläutert.

Teilgraphen setzen sich aus einer Teilmenge an eMVG-Knoten und eMVG-Kanten des gesamten eMVG eines Produktes zusammen. Innerhalb eines eMVG kann es mehrere Teilgraphen geben. Die zu einem Teilgraphen zugehörigen eMVG-Knoten können zu Teilgraphen-eMVG-Knoten zusammengefasst und als einzelne Knoten im eMVG dargestellt werden. Um eine vereinfachte Darstellung von Tasks zu erzielen, werden bei Teilgraphen-eMVG-Knoten die Namen aller innerhalb des Teilgraphen montierten Baugruppen im Feld der Startbaugruppe 1 zusammengefasst.

Die Vorrangbeziehungen zwischen den eMVG-Knoten des Teilgraphen-eMVG-Knotens und der vor- bzw. nachgelagerten eMVG-Knoten außerhalb des Teilgraphen-eMVG-Knotens können aggregiert dargestellt werden. Teilgraphen-eMVG-Knoten können mittels der aggregierten eMVG-Kanten direkt mit früheren oder späteren eMVG-Knoten verbunden werden, vgl. Abb. 26.

Die Gliederung des eMVG in Teilgraphen vereinfacht die Modellierung von Produkt-Varianten. Falls die Baugruppe eines Produktes getauscht wird, kann auf die Generierung eines komplett neuen eMVG verzichtet werden. In diesem Fall genügt es, den alten Teilgraphen durch einen neuen Teilgraphen, der die Montagevorgänge der neuen Baugruppe repräsentiert, zu ersetzen. Des Weiteren wird durch die Teilgraphen das Hinzufügen neuer Montagereihenfolgen für Baugruppen eines Produktes vereinfacht, da auch hier das Hinzufügen von Montagereihenfolgen zu Teilgraphen im eMVG genügt und so die Erstellung eines komplett neuen eMVG vermieden wird.

4.4.3.1 Endmontage-Teilgraph

Die Strukturierung des eMVG mit Hilfe der *Endmontage-Teilgraphen* dient der unabhängigen Betrachtung der Endmontage eines Produktes. Diese erfolgt oftmals in

einem separaten Montagesystem, an der die Baugruppen zur Variantenbildung bereitgestellt werden, vgl. LOTTER & WIENDAHL (2012). Der *Endmontage-Teilgraph* enthält alle eMVG-Knoten, bei denen das Basisbauteil des Gesamtproduktes Teil der Startbaugruppen ist. Die eMVG-Kanten, die diese eMVG-Knoten verbinden, sind ebenfalls Teil des Endmontage-Teilgraphen.

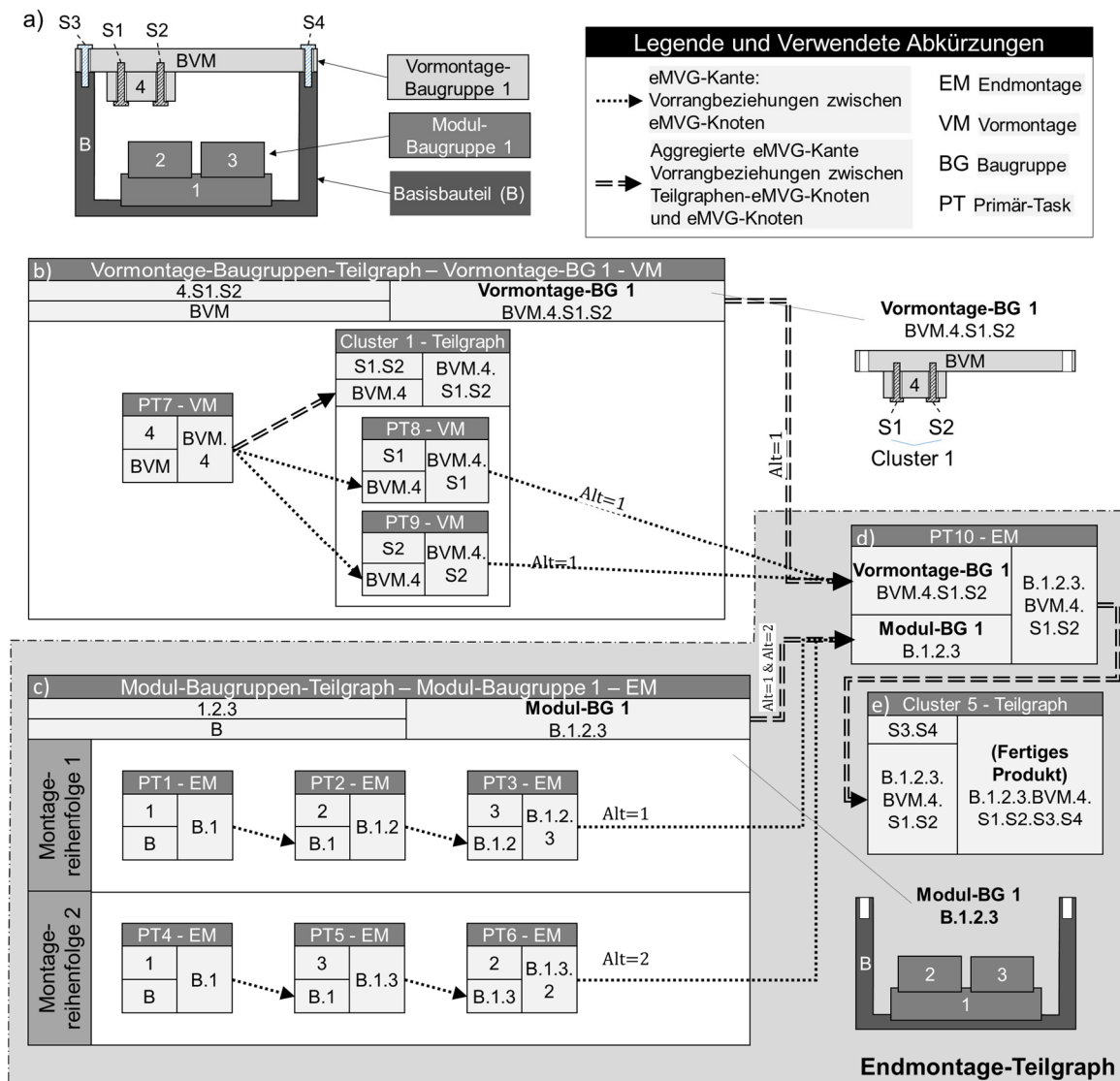


Abbildung 26: a) Beispielprodukt „Kiste“ mit einer zwingenden Vormontage „BVM.4.S1.S2“ und einer Modul-Baugruppe „B.1.2.3“. Einzelteile S1-S4 sind Schraubverbindungen. Abbildungen b-e) zeigen den gesamten eMVG₀ des Beispielproduktes. b) Vormontage-Teilgraph der Vormontage-Baugruppe. c) Modul-Baugruppen-Teilgraph der Modul-Baugruppe mit zwei Montagereihenfolgen. d) Primär-Task zur Montage der Modul-Baugruppe und der Vormontage. e) Cluster-Teilgraph der Schrauben S3 und S4.

4.4.3.2 Cluster-Teilgraphen

Der *Cluster-Teilgraph* dient der Gruppierung von Clustern, also von Bauteilen, die zwingend nacheinander, jedoch in beliebiger Reihenfolge montiert werden können (siehe Abb. 26 b)). Die dazugehörigen Anforderungs-Tasks weisen keine Vorrangbeziehung zueinander auf und sind daher nicht mit eMVG-Kanten verbunden. Sie besitzen alle die gleichen Vorrangbeziehungen zu früheren und späteren eMVG-Knoten, die nicht Teil des Clusters sind. Die aggregierten Kanten des Cluster-Teilgraphen-eMVG-Knotens übernehmen folglich die Attribute der eMVG-Kanten seiner eMVG-Knoten. Die Bestimmung der Montagereihenfolge innerhalb eines Cluster-Teilgraphen ist ein nachgelagerter Planungsprozess.

4.4.3.3 Modul-Baugruppen-Teilgraphen

Modul-Baugruppen-Teilgraphen dienen zur Gruppierung der zur Montage einer Modul-Baugruppe durchzuführenden Anforderungs-Tasks (siehe Abb. 26 c)). Der Modul-Baugruppen-Teilgraph-eMVG-Knoten erlaubt die Abbildung mehrerer alternativer Montagereihenfolgen einer Modul-Baugruppe in einem einzelnen Teilgraphen-eMVG-Knoten. Die unterschiedlichen Montagereihenfolgen stehen in einer Oder-Beziehung zueinander.

4.4.3.4 Vormontage-Teilgraphen

Der *Vormontage-Teilgraph* bündelt die eMVG-Knoten und eMVG-Kanten, welche die Vorgänge zur Montage einer Vormontage-Baugruppe beschreiben und folglich nicht das Basisbauteil des Endproduktes enthalten (siehe Abb. 26 b)). Die Endbaugruppe des Vormontage-Teilgraphen ist die fertig montierte Vormontagebaugruppe, die anschließend als Einzelteil betrachtet werden kann. Vormontage-Teilgraphen haben keine vorgelagerten eMVG-Knoten. Dies erlaubt, den gesamten Vormontage-Teilgraphen als eine fertig vorliegende Startbaugruppe zu betrachten. Des Weiteren erlaubt die Unterteilung des eMVG in Vormontage-Teilgraphen die isolierte Betrachtung und Arbeitsplanung von Vormontagen, die in der Praxis oftmals auf separaten Montagelinien montiert oder zugekauft werden. Zusätzlich kann im Falle der Verwendung von Vormontagen bei unterschiedlichen Produktvarianten auf bestehende Planungsergebnisse zurückgegriffen werden, um unnötige Aufwände durch wiederholte Planungen zu vermeiden. Der Vormontage-Teilgraph kann mehrere unterschiedliche eMVG zur Darstellung unterschiedlicher Montagereihenfolgen enthalten. In diesem Falle sind die unterschiedlichen finalen Endbaugruppen mittels eMVG-Kanten mit einer Oder-Beziehung mit der Startbaugruppe des nachfolgenden eMVG-Knoten verbunden.

4.4.4 Analysemethode zur Generierung des Aufgabenmodells aus Produkt-Daten

In diesem Abschnitt wird eine Methode zur teilautomatisierten ASP-Analyse des 3D-CAD-Modelle des Produktes vorgestellt. Ergebnis der Analyse ist das parametrisierte Aufgabenmodells in Form des $eMVG_0$. Abb. 27 zeigt den Ablaufplan der Methode. Grundlage des Ansatzes bildet die automatisierte virtuelle Demontage des 3D-CAD Modells anhand des Assembly-by-Disassembly-Ansatzes, ausgehend vom vollständig montierten Produkt. Die Demontierbarkeit einer Baugruppe in einem Montagezustand wird als gegeben angenommen, wenn die Baugruppe auf einer kollisionsfreien Bahn aus dem 3D-Produktmodell, das die restlichen montierten Baugruppen im entsprechenden Montagezustand enthält, demontiert werden kann (vgl. Abschnitte 2.3.2 und 3.1). Die im Folgenden beschriebenen Ansätze wurden bereits in MICHNIEWICZ ET AL. (2016) und REINHART ET AL. (2017) veröffentlicht und werden in dieser Arbeit weiterentwickelt und näher ausgeführt.

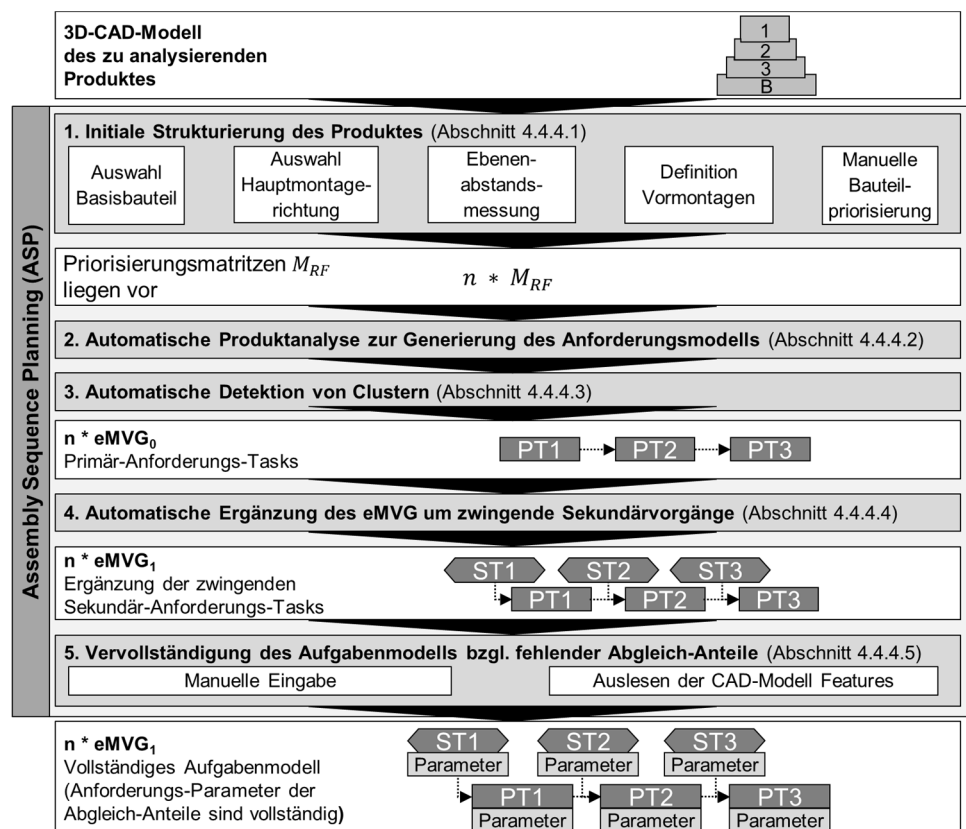


Abbildung 27: Ablaufplan der Methode zur Generierung des Aufgabenmodells.

Abschnitt 4.4.4.1 widmet sich den manuellen Methoden zur *initialen Strukturierung* des Produktes vor der virtuellen Demontage des Produktes. Ziel ist hierbei die Steigerung der Effizienz der virtuellen Demontage durch eine Reduktion der Anzahl rechenaufwändiger Kollisionsprüfungen und Verschiebungen der Baugruppen im

3D-CAD-Modell des Produktes. Voraussetzung hierfür ist, dass die durch die Strukturierung bestimmte initiale Montagereihenfolge einer validen Montagereihenfolge möglichst ähnlich ist. Daher werden dem Nutzer unterschiedliche Methoden zur initialen Strukturierung des Produktes bereitgestellt. Abschnitte 4.4.4.2 bis 4.4.4.4 stellen die ASP-Methode zur automatischen Produktanalyse zur Generierung des Aufgabenmodells vor. Abschnitt 4.4.4.5 erläutert die nötigen Schritte zur manuellen Vervollständigung des Aufgabenmodells.

4.4.4.1 Initiale Strukturierung des Produktes

Ein notwendiger Schritt ist die Auswahl des Basisbauteils (Abb. 28 a)), das den Montagezustand des Produktes vor Durchführung jeglicher Tasks darstellt. Zur einheitlichen Beschreibung der Einbaulagen und Bewegungen der anderen Baugruppen wird während der Generierung des Aufgabenmodells das Koordinatensystem des Basisbauteils verwendet.

Die Vorgabe einer Hauptmontagerichtung für das Produkt im Koordinatensystem des Basisbauteils erlaubt die Priorisierung einer Bewegungsrichtung bei der virtuellen Demontage, vgl. Abb. 28 a). Der Annahme folgend, dass ein Großteil der Baugruppen eines montagegerecht gestalteten Produktes in der Hauptmontagerichtung montiert wird, kann für diese eine kollisionsfreie Bahn mit hoher Wahrscheinlichkeit bereits bei der ersten geprüften Verschiebungsrichtung entgegen der Hauptmontagerichtung generiert werden. Dies hat eine Reduktion der Anzahl zu prüfender Verschiebungsrichtungen beim APP zur Folge.

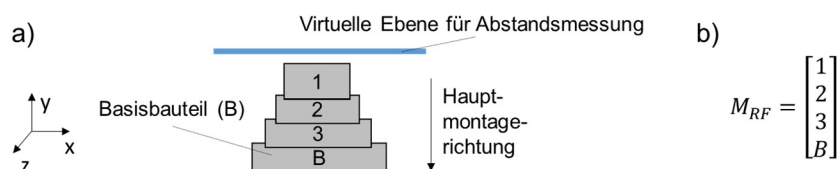


Abbildung 28: a) Beispielprodukt „B.1.2.3“ in Schichtbauweise mit eingezeichneter virtueller Ebene für Abstandsmessung, Hauptmontagerichtung und Basisbauteil. b) Valide Priorisierungsmatrix für das Beispielprodukt, ermittelt durch die Abstandsmessung mit der virtuellen Ebene.

Eine Aufgabe der initialen Strukturierung ist die initiale Reihenfolgebildung zur Reduktion des Lösungsraumes der zu prüfenden Montagereihenfolgen durch eine Vorsortierung der Baugruppen des Produktes. Ergebnis der initialen Reihenfolgebildung ist die *Priorisierungsmatrix* M_{RF} , welche die Reihenfolge, in der die virtuelle Prüfung der Demontierbarkeit der Baugruppen des Produktes erfolgen soll, beschreibt, vgl. Abb. 28 b). Die Baugruppen-Bezeichnungen werden analog zu ihrer initialen Priorisierung Spalte für Spalte und Zeile für Zeile eingetragen. Das bei der

virtuellen Prüfung der Demontierbarkeit am höchsten priorisierte Bauteil steht in der ersten Zeile der ersten Spalte. Die so abgebildete initiale Montagereihenfolge wird an die automatische Produktanalyse zur Generierung des Aufgabenmodells weitergegeben.

Eine von MICHNIEWICZ ET AL. (2016) vorgestellte Methode, genannt *Ebenenabstandsmessung*, ermöglicht eine Sortierung der Bauteile anhand ihrer relativen Lage im Produkt. Grundlage für die Sortierung bildet die Messung des Abstandes der Bauteile zu einer virtuellen Ebene außerhalb des Produkts (Abb. 28 a) und Abb. 29). Je geringer der Abstand zwischen Bauteil und Ebene ist, desto eher liegt dieses außen und desto höher wird es priorisiert. Dementsprechend wird es auch in einer höheren Zeile der Priorisierungsmatrix eingetragen. Bauteile mit demselben Abstand zur Ebene werden in der Matrix in derselben Zeile eingetragen. Die Ausrichtung der Ebene in Bezug auf das Produkt erfolgt manuell durch den Nutzer und ermöglicht so die Berücksichtigung unterschiedlicher Produktstrukturen, vgl. Abb. 29.

Im Falle von Produkten, deren Aufbau der Schichtbauweise entspricht und deren Montagereihenfolge nicht wählbar ist (vgl. LOTTER & WIENDAHL (2012), S. 26), kann der Normalenvektor der virtuellen Ebene parallel zur Hauptmontagerichtung gewählt werden. Damit wird die Ebene über dem Produkt platziert. Dies ermöglicht die Bestimmung der außen liegenden Baugruppen, die hinsichtlich ihrer Demontage priorisiert werden (vgl. Abb. 28 sowie Abb. 29 a) und b)).

Für Produkte in Nestbauweise, bei denen die Montagereihenfolge frei wählbar ist (vgl. LOTTER & WIENDAHL (2012), S. 26), kann die Ebenenabstandsmessung zur Vorgabe einer Aufbaurichtung für die Baugruppen genutzt werden. Dafür kann die Ebene an jener Seite außerhalb des Produktes platziert werden, die bei der virtuellen Demontage bevorzugt werden soll (vgl. Abb. 29 c) und d)).

Eine Herausforderung bei der initialen Strukturierung des Produktes besteht bei der Definition von Vormontagen. Aufgrund der sehr hohen Anzahl möglicher Unterteilungen des Produktes (vgl. Abschnitt 2.3.2) erfolgt die Zuordnung von Einzelteilen zu Vormontagen manuell durch den Nutzer und dient zur Reduktion des Lösungsraumes. Die Vormontagedefinition erfolgt, indem ein *Vormontage-Basisbauteil* ausgewählt (vgl. Einzelteil „BVM“ in Abb. 26 a)) und zugehörige Einzelteile diesem zugeordnet werden. Das Koordinatensystem des Vormontage-Basisbauteils dient als Koordinatensystem der Vormontage-Baugruppe. Voraussetzung für die Definition der Vormontage ist, dass die Einzelteile, die der Vormontage zugeordnet sind, geometrisch zusammenhängen. Eine Vormontage ist nicht valide, wenn Einzelteile, die der Vormontage zugeordnet sind, in Kontakt mit keinem anderen Einzelteil der Vormontage stehen. Vormontagen, nach derer kollisionsfreien Demontage einzelne „schwebende“ Baugruppen im Produktmodell

verbleiben, die keinen Kontakt zu anderen im Produkt verbleibenden Baugruppen haben, sind nach Definition ebenfalls nicht valide. Definierte Vormontagen werden im Folgenden wie ein Einzelteil betrachtet. Vormontagen besitzen eine eigene Priorisierungsmatrix, die zur virtuellen Demontage der Vormontage unabhängig vom Rest des Produktes verwendet wird.

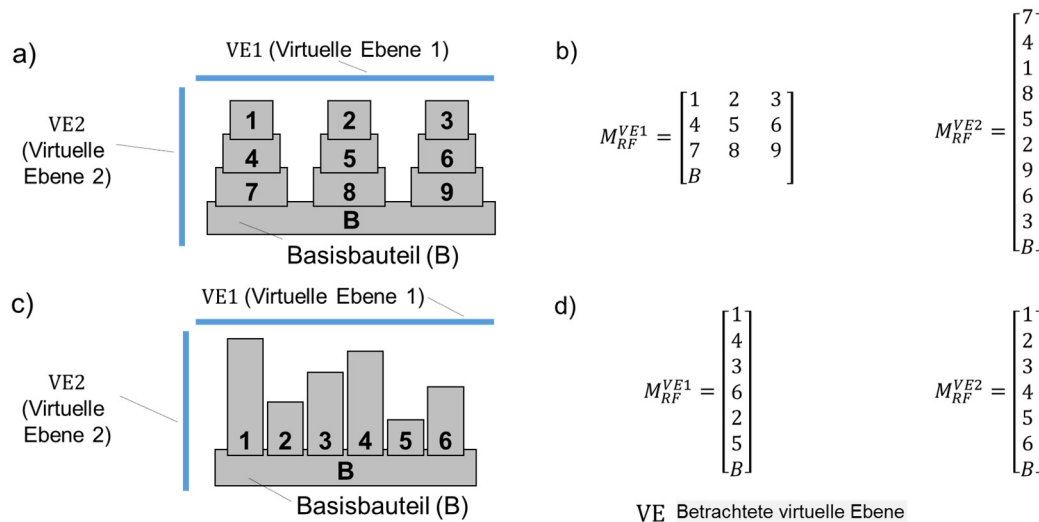


Abbildung 29: a) Beispielprodukt „B.1-9“ mit drei Modul-Baugruppen in Schichtbauweise mit zwei eingezeichneten virtuellen Ebenen. b) Zwei Priorisierungsmatrizen für Beispielprodukt „B.1-9“ für die beiden virtuellen Ebenen. M_{RF}^{VE1} entspricht dabei einer parallelen Demontage der Module, wobei mit dem Versuch der Demontage von Einzelteil 1 begonnen wird. M_{RF}^{VE2} hat eine sequentielle Demontage der Module zur Folge, beginnend mit dem nicht demontierbaren Einzelteil 7. d) Beispielprodukt „B.1-6“ in Nestbauweise mit zwei eingezeichneten virtuellen Ebenen. b) Zwei Priorisierungsmatrizen für Beispielprodukt „B.1-6“ für die beiden virtuellen Ebenen. M_{RF}^{VE1} hat eine ungeordnete Demontage der Baugruppen zur Folge, während bei M_{RF}^{VE2} die Demontage von geordnet von links nach rechts, beginnend mit Einzelteil „1“, verläuft.

Um der Anforderung der Abbildung beliebiger Montagereihenfolgen gerecht zu werden, wird des Weiteren die Möglichkeit einer beliebigen manuellen Priorisierung der Bauteile in der Priorisierungsmatrix eingebunden. Dies ist notwendig, da Montagereihenfolgen sich nicht nur ausschließlich aus der Geometrie des Produktes ergeben und daher nicht ausschließlich aus dem 3D-CAD-Modell des Produktes generiert werden können. Beispielhaft seien aufgrund von elektromagnetischen Wechselwirkungen oder Beschädigungsrisiken beim Einbau vorgegebene Vorrangbeziehungen zwischen Baugruppen genannt. Daher muss die Möglichkeit der manuellen Manipulation der Priorisierung der Bauteile gegeben sein.

4.4.4.2 Automatische Produktanalyse zur Generierung des Aufgabenmodells

Das gesamte Vorgehen zur automatischen Produktanalyse zur Generierung des Aufgabenmodells ist in Abb. 30 dargestellt. Als Eingangsinformationen dienen das CAD-Produktmodell und die zuvor generierte Priorisierungsmatrix M_{RF} . Ergebnis der Analyse ist das Aufgabenmodell in Form des $eMVG_0$ (vgl. Abschnitt 4.4.2).

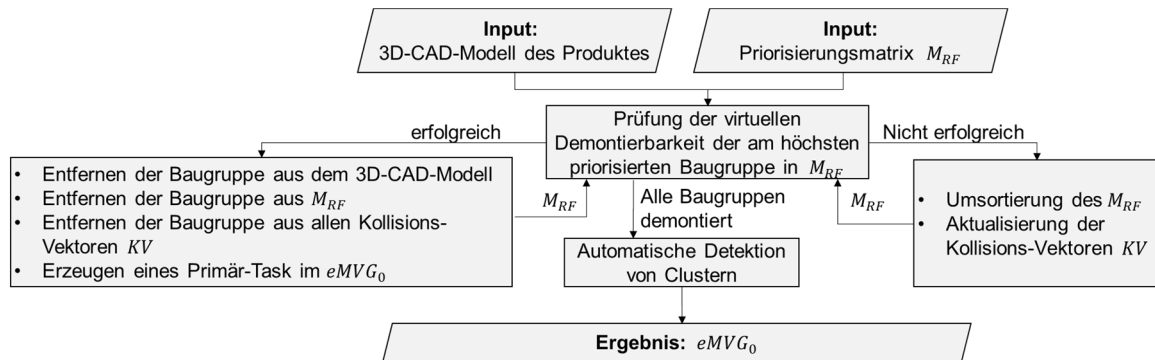


Abbildung 30: Programmablaufplan der automatischen Produktanalyse zur Generierung des Aufgabenmodells.

Die Reihenfolge der sequentiellen virtuellen Verschiebung der Baugruppen zur Bestimmung ihrer Demontierbarkeit erfolgt analog zur Priorisierungsmatrix. Die kollisionsfreie Montagebahn wird bestimmt, indem die Baugruppe schrittweise relativ zum Rest des Produktes verschoben und auf Kollisionen mit anderen Baugruppen geprüft wird. Die schrittweise Verschiebung der Baugruppen erfolgt in unterschiedlichen Richtungen. Die Demontierbarkeit wird als gegeben angenommen, wenn ein Mindestabstand der Baugruppe zum Rest des Produktes erreicht worden ist. Die von der Baugruppe abgefahrene Bahn wird gespeichert und entspricht in umgekehrter Richtung der Montagebahn.

Kann keine valide kollisionsfreie Verschiebungsrichtung gefunden werden, wird die Baugruppe an ihrer ursprünglichen Position platziert und der Versuch der virtuellen Demontage wird mit der nächsten Baugruppe in der Priorisierungsmatrix unternommen (vgl. Abb. 31 a) und b)). Zur Verdeutlichung dieses Sachverhalts wurde in Abb. 31 eine initiale Priorisierungsmatrix gewählt, die für eine erfolgreiche virtuelle Demontage des Produktes umsortiert werden muss. Das CAD-Modell der erfolgreich demontierten Baugruppe wird im Anschluss aus dem CAD-Modell des Produktes entfernt. Danach wird mit der virtuellen Demontage der nächsten Baugruppe in der Reihenfolgematrix fortgefahren (vgl. Abb. 31 c), d) und e)).

Zur Reduktion des Lösungsraumes möglicher Verschiebungsrichtungen werden zur Priorisierung der Demontagebewegungen folgende Informationsquellen genutzt:

- manuell vorgegebene Hauptmontagerichtung

- Bewegungsrichtungen die aus den Bedingungen zwischen den Baugruppen resultieren (vgl. z. B. OU & XU (2013) und PINTZOS ET AL. (2016))
- Richtungen der Achsen der Koordinatensysteme der zu demontierenden Baugruppe (MICHNIEWICZ ET AL. 2016)
- Richtungen der Achsen der Koordinatensysteme des Basisbauteils

Ist die virtuelle Demontage einer Baugruppe erfolgreich, wird ein eMVG-Knoten instanziiert, der den Anforderungs-Task des primären Montagevorgangs der Baumgruppe repräsentiert (vgl. Abb. 31 c), d) und e). Die Differenzierung zwischen „Zusammensetzen“ und „Verschrauben“ erfolgt anhand der Namen der Einzelteile im CAD-Produktmodell. Wenn der Name Begriffe wie „Schraube“ oder „Screw“ enthält, wird das Einzelteilmodell als Schraube erkannt und folglich der Anforderungs-Task als „Verschrauben“-Task instanziiert. Der Geometrie-Anteil der FP eines Anforderungs-Tasks ist durch die Verknüpfung aller FP mit den 3D-CAD-Modellen der Baugruppen im Startzustand und Endzustand der virtuellen Demontage mitsamt Montagebahn vollständig beschrieben.

Die finale Position der betrachteten Baugruppe im Produkt repräsentiert den Endzustand des Tasks. Zwei Startbaugruppen werden zu einer Endbaugruppe gefügt. Die generierte kollisionsfreie Montagebahn wird zur Parametrierung der Aktionen im Zustands-Anteil des FP „Bewegen“ genutzt. Die Zustandsänderungen der FP „Öffnen“ bzw. „Verschrauben“ der zu diesem Zeitpunkt unbekanntes Fügeeinheiten erfolgen, nachdem die Endeinbaulage erfolgreich erreicht wurde. Der Zustands-Anteil des Primär-Tasks ist bis auf die Parametrierung des Ausfahrpfades der Fügeeinheit, die ohne Kenntnis ihrer Geometrie und Kinematik zu diesem Zeitpunkt nicht bestimmt werden kann, vollständig beschrieben (vgl. Abb. 20).

Zur Steigerung der Effizienz bei der Generierung valider Montagereihenfolgen wurde eine Methode eingeführt, die eine Sortierung der Baugruppen im Falle von nicht erfolgreich abgeschlossenen virtuellen Demontagen von Baugruppen erlaubt. Für jede Baugruppe, die ohne Erfolg hinsichtlich ihrer Demontierbarkeit geprüft wurde, werden in einem *Kollisionsvektor KV* für jede geprüfte Verschiebungsrichtung diejenigen Baugruppen gespeichert, mit denen die geprüfte Baugruppe in den unterschiedlichen Bewegungsrichtungen kollidiert ist. Wird die Baugruppe zu einem späteren Zeitpunkt erneut auf ihre Demontierbarkeit geprüft, werden bereits geprüfte Verschiebungsrichtungen, deren zugehörige Baugruppen noch nicht aus dem 3D-CAD-Modell des Produktes entfernt wurden, nicht wiederholt, um die Effizienz der Analyse zu steigern (vgl. durchgestrichene Baugruppennamen im Kollisionsvektor KV in Abb. 31 d) und e)).

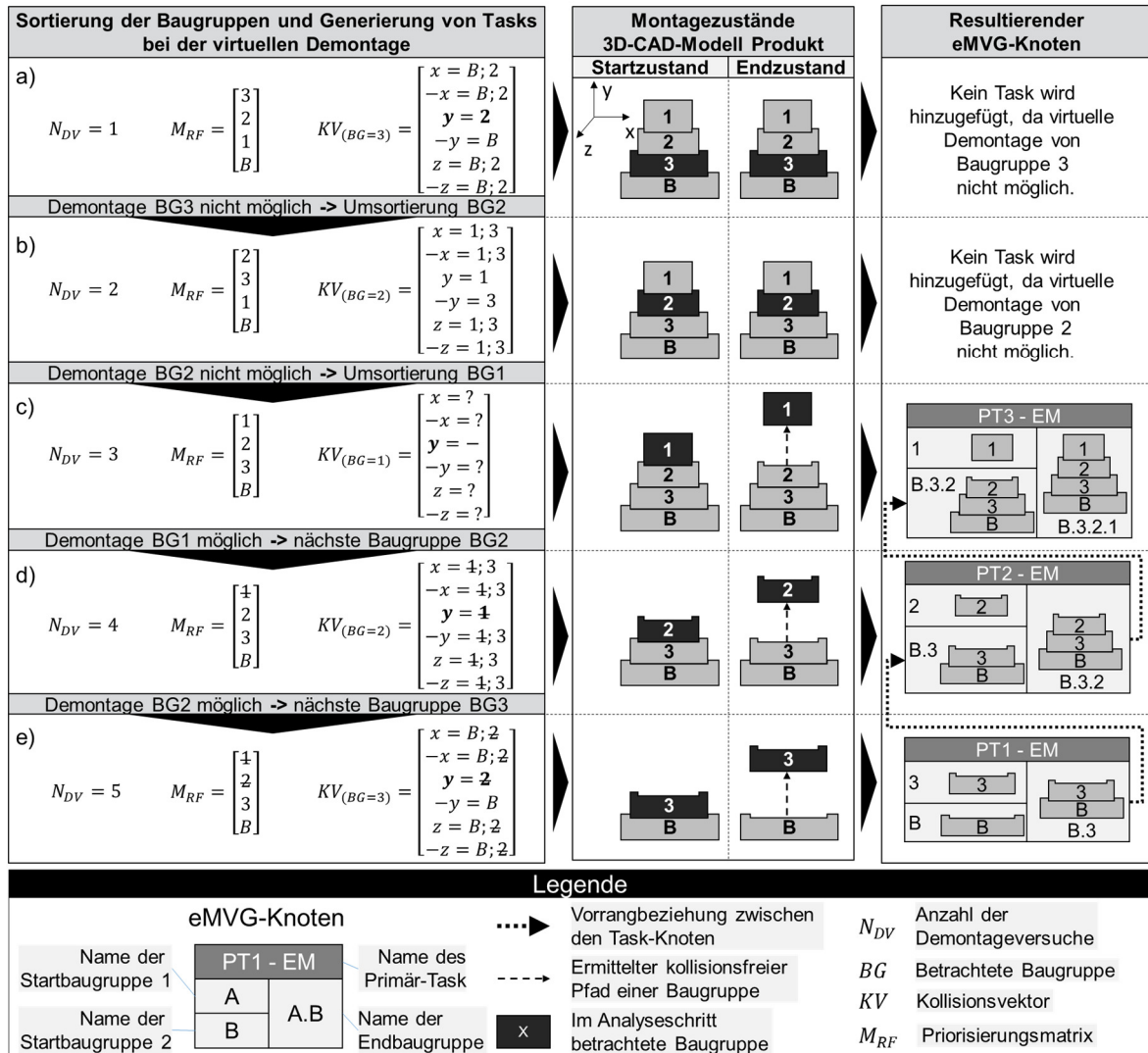


Abbildung 31: Analyseschritte und Ergebnisse der automatischen Produktanalyse zur Generierung des Aufgabenmodells in Form des eMVG₀, dargestellt am Beispielprodukt „B.3.2.1“.

Auf Basis der Analyse der Kollisionen zwischen jener Baugruppe, die ohne Erfolg auf ihre Demontierbarkeit geprüft wurde, und den anderen Baugruppen im Produkt erfolgt eine Umsortierung der Reihenfolgematrix, vgl. Abb. 31 c) und d). Die Umsortierung folgt der Annahme, dass eine Baugruppe erst dann demontiert werden kann, wenn die ihre Montagebahn versperrenden Baugruppen zumindest teilweise entfernt worden sind. Daher werden diejenigen Baugruppen, mit denen die zu prüfende Baugruppe im aktuellen Analyseschritt kollidiert, an die erste Stelle der Priorisierungsmatrix verschoben und im nächsten Analyseschritt hinsichtlich ihrer Demontierbarkeit geprüft. Es wird als zielführend betrachtet, die Ursache für eine nicht durchführbare virtuelle Demontage direkt zu analysieren, da so die Priorisierung der Baugruppen möglichst unverändert bleibt und nacheinander zu montierende Baugruppen stets detektiert werden.

Im Falle einer Kollision mit mehreren Baugruppen werden alle Baugruppen an den Anfang der Priorisierungsmatrix verschoben, wobei die Reihenfolge zwischen diesen Baugruppen in der Priorisierungsmatrix unverändert bleibt. Können eine oder mehrere der verschobenen Baugruppen erfolgreich demontiert werden, ist durch ihre Priorisierung bereits eine valide Vorrangbeziehung zwischen den Teilen ermittelt worden. Kann die Baugruppe nicht demontiert werden, so wird für sie ein Kollisionsvektor erstellt und die vorgestellte Methode zur Umsortierung wiederholt.

Besitzt eine zu prüfende Baugruppe bereits einen Demontagevektor, dessen sämtliche Verschiebungsrichtungen durch andere weiterhin im 3D-CAD-Produktmodell befindliche Baugruppen blockiert sind, so wird diese Baugruppe nicht auf Demontierbarkeit getestet. Existiert zum Zeitpunkt der Analyse des Produktes keine Baugruppe mit einer freien Richtung im Kollisionsvektor, wird die Analyse abgebrochen und eine Überprüfung der theoretischen Montierbarkeit des Produktes durch den Produktentwickler wird erforderlich.

Das zu analysierende Produkt wird sequentiell demontiert, bis nur noch das Basisbauteil im digitalen CAD-Modell des Produktes enthalten ist. Für jede Baugruppe wird ein individueller Primär-Anforderungs-Task generiert und zum $eMVG_0$ hinzugefügt. Die Anforderungs-Tasks von Baugruppen, die erfolgreich nacheinander virtuell demontiert werden, werden mittels einer gerichteten $eMVG$ -Kante miteinander verbunden. Ergebnis eines Durchlaufes der automatisierten Analyse ist ein Vorranggraph in Form des $eMVG_0$, der eine valide Montagereihenfolge des Produktes repräsentiert. Zur Erzeugung weiterer Montagereihenfolgen wird die vorgestellte Sequenz mit anderen Strukturierungsvorgaben wiederholt. Definierte Vormontagen werden anschließend separat analysiert, wobei deren $eMVG_0$ -Teilgraph mit dem $eMVG_0$ -Teilgraph der Endmontage mittels $eMVG$ -Kanten verbunden wird.

4.4.4.3 Automatische Detektion von Clustern

Zur automatisierten Strukturierung der zuvor generierten Montagereihenfolge wurde eine Methode zur Detektion von Clustern von Verbindungselementen wie Schrauben eingeführt, die nach der erfolgreichen virtuellen Demontage erfolgt, vgl. Abb. 32. Die Anforderungs-Tasks von Verbindungselementen in Clustern sollen in Cluster-Teilgraphen zusammengefasst werden. Dafür werden ausgehend vom Zustand des komplett montierten Produktes die 3D-CAD-Modelle der Baugruppen, die keine Verbindungselemente sind, auf ihren individuellen Montagebahnen virtuell bewegt und auf Kollisionen mit den 3D-CAD-Modellen der Verbindungselemente geprüft (vgl. Abb. 32 d)). Die Reihenfolge der Verschiebung entspricht der zuvor generierten validen Demontagereihenfolge. Im Falle einer detektierten Kollision zwischen dem

3D-CAD-Modell des verschobenen Bauteils und den Modellen der Verbindungselemente wird angenommen, dass die Montage der Verbindungselemente direkt nach der Montage jenes Bauteils, das mit den Schrauben kollidiert ist, zu erfolgen hat. Die Anforderungs-Tasks dieser Verbindungselemente werden daher in einem Cluster-Teilgraphen-eMVG-Knoten im eMVG₀ gruppiert und deren 3D-CAD-Modelle aus dem Produktmodell entfernt. Dies wird wiederholt, bis das Produkt komplett demontiert ist. Abb. 32 e) zeigt die Verbesserung der Montagereihenfolge durch Anwendung der Methode.

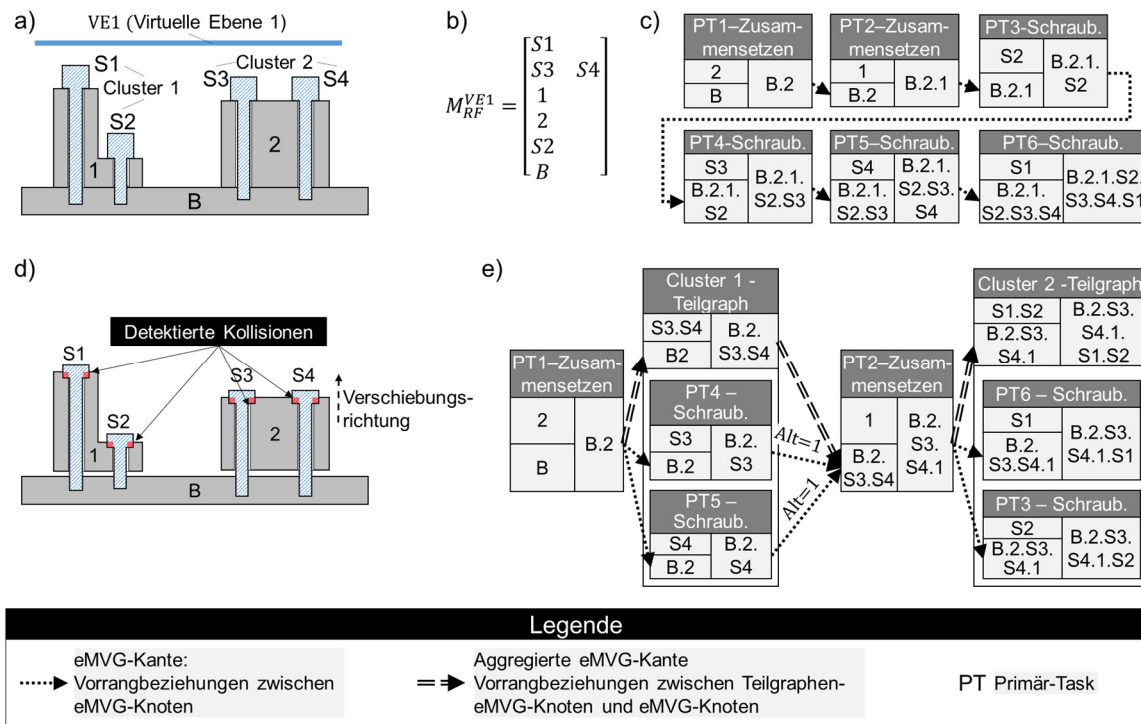


Abbildung 32: a) Endzustand Beispielprodukt „Platte“. b) Initiale Priorisierungsmatrix nach Ebenenabstammung. c) Der resultierende eMVG₀ berücksichtigt den Cluster 1 nicht. Schraube S2 wird vor dem Cluster 2 montiert, S1 danach. Einzelteile 1 und 2 werden nacheinander verbaut, ohne mit Schrauben gesichert zu werden. d) Verschiebung der in Kontakt mit den Schrauben stehenden Einzelteile und Detektion von Kollisionen zur Zuordnung der Einzelteile zu den Schrauben. e) Aktualisiertes eMVG₀ mitsamt Gruppierung der Schrauben in Cluster-Teilgraphen. Die Einzelteile 1 und 2 werden direkt nach dem Fügen verschraubt.

4.4.4.4 Automatische Ergänzung des eMVG um zwingende Sekundärvorgänge

Zu diesem Zeitpunkt der Produktanalyse besteht der eMVG₀ ausschließlich aus Primär-Tasks, vgl. Abb. 32 a) und b). Ausgehend von der Betrachtung der Standardstrukturen von Montagevorgängen können zwingende sekundäre

4 Entwicklung eines Systems zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung

Montagevorgänge definiert werden, die stets vor den Primär-Vorgängen erfolgen. Beispielhaft sei die Notwendigkeit der Bereitstellung und Zuführung einer Baugruppe vor der eigentlichen wertschöpfenden Montagebewegung genannt. Das Vorgehen zur Ergänzung des eMVG₀ um zwingende Sekundärvorgänge ist beispielhaft in Abb. 33 dargestellt und wird im Folgenden erläutert.

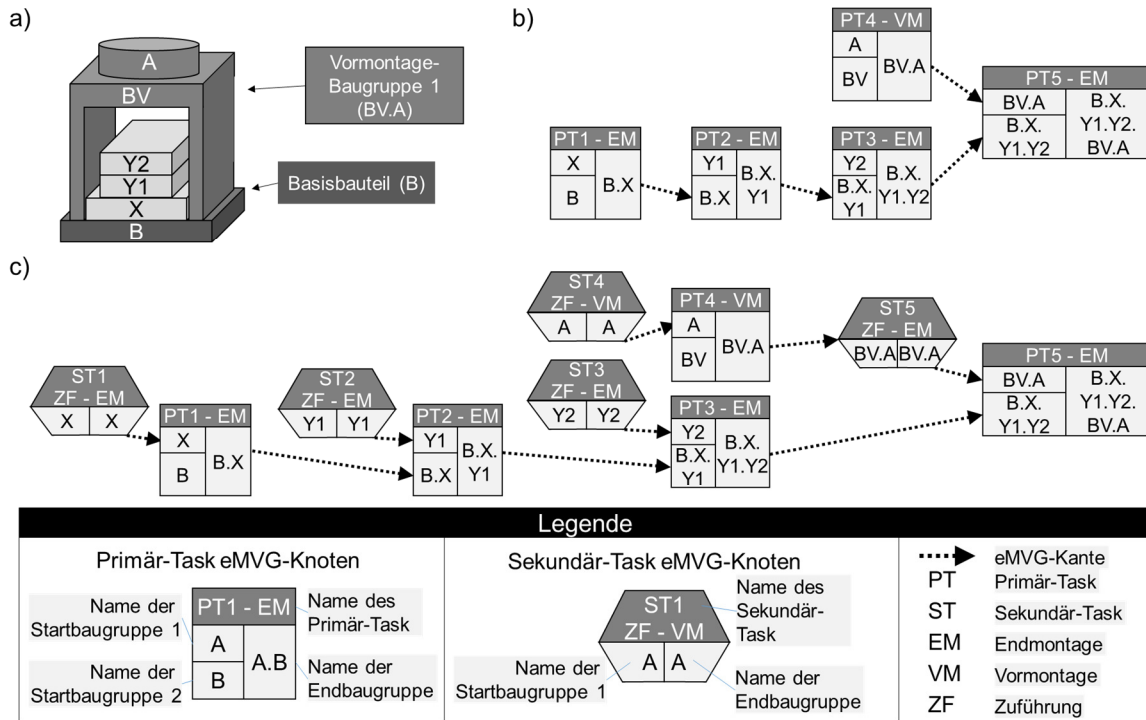


Abbildung 33: a) Beispielprodukt „Gehäuse“. b) eMVG₀ des Beispielproduktes „Gehäuse“. c) eMVG₁ des Beispielproduktes „Gehäuse“. Der eMVG₁ ist um zwingende Sekundärvorgänge ergänzt.

Die Zuweisung eines Primär-Tasks zu einer Station ist nur dann valide, wenn die zwingend vorgelagerten Sekundärprozesse ebenfalls an dieser Station durchgeführt werden können. Folglich muss der zu diesem Zeitpunkt unbekannte Weg einer Baugruppe vom Ort der Bereitstellung zum unbekanntem Handhabungsgerät ebenfalls zum Aufgabenmodell hinzugefügt werden. Daher werden den Primär-Anforderungs-Task-eMVG-Knoten automatisiert entsprechende Sekundär-Anforderungs-Tasks-eMVG-Knoten vorangestellt und zum eMVG₀ hinzugefügt. In Abb. 33 c) wird der eMVG₀ des Beispielproduktes um „Zuführungs“-Tasks (abgekürzt mit ZF) ergänzt. Im Sinne der Standardstrukturen in der Montage werden diese als Handhabungsvorgänge modelliert. Der so ergänzte eMVG₀ wird eMVG₁ genannt.

Der Endzustand des Handhabungs-Task entspricht der Positionierung der bereitzustellenden Baugruppe im Ausgangszustand, der für die Durchführung des Primärvorgangs in der Station ausgewählt worden ist. Der Endzustand des

hinzugefügten Handhabungs-Task im eMVG₁ ist folglich mittels einer gerichteten Kante mit der Startbaugruppe des zugehörigen Primär-Tasks verbunden.

4.4.4.5 Vervollständigung des Aufgabenmodells

Der letzte Schritt bei der Generierung des Aufgabenmodells eines Produktes betrifft dessen Vervollständigung bezüglich fehlender Parameterwerte in den Abgleich-Anteilen. Je nach Informationsgehalt des zur Produktanalyse verwendeten 3D-CAD-Modells können Abgleich-Anteile automatisiert bestimmt werden. Dabei können Informationen verwendet werden, die in Form von Features beschrieben sind, die mit dem CAD-Modell verknüpft sind. Des Weiteren können Informationen aus den individuellen Namen der Baugruppen gewonnen werden, etwa um den Baugruppen-Typ „Schraube“ bzw. „Screw“ zu detektieren. Voraussetzung hierfür ist die Einhaltung einer vordefinierten Semantik bei der Namensgebung sowie der Beschreibung der Features. Des Weiteren können physikalische Eigenschaften der Baugruppen, wie die Masse, bei einer vorliegenden Materialzuweisung zu ihrem CAD-Modell direkt aus dem CAD-Modell des Produktes bestimmt werden. Abgleich-Anteile der Anforderungs-FP, die nicht automatisiert aus dem 3D-CAD-Modell des Produktes bestimmt werden konnten, müssen vom Nutzer manuell vorgegeben werden. Das Ergebnis der Vervollständigung ist ein komplettes Aufgabenmodell des Produktes in Form des eMVG₁.

4.4.4.6 Zusammenfassung

Die vorgestellte ASP-Analysemethode zeigt ein Vorgehen zur teilautomatisierten Generierung eines Aufgabemodells in Form eines Vorranggraphen aus dem 3D-CAD-Produktmodell. Der eingeführte eMVG ist ein PPR-Datenmodell und verknüpft das Produkt, beschrieben als 3D-CAD-Modell, mit dem Aufgabenmodell. Der eMVG baut auf dem in Abschnitt 4.2 eingeführten Informationsmodell auf, wobei primäre und sekundäre Vorgänge als Tasks und Funktionsprimitiva beschrieben sind. Die ASP-Methode zur automatisierten Generierung der Montagereihenfolgen kann nach JONES ET AL. (1998) als monoton, nicht-linear und zweihändig kategorisiert werden (vgl. Abschnitt 2.3.2).

4.5 Synthesemethode zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung

Im nachfolgenden Abschnitt wird die Methode zur schrittweisen Synthese des Aufgabenmodells des Produktes in Form des eMVG₁ und dem Fähigkeitenmodell des

4 Entwicklung eines Systems zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung

Produktionssystem, abgebildet als Ressource-Graph (RG) und Station-Graph (SG), vorgestellt. Ergebnis des Vorgehens zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung in der Synthese-Domäne sind im Falle einer erfolgreichen Zuweisung aller geforderten Montagevorgänge zu geeigneten Stationen und Ressourcen alternative, evaluierte und vollständige Arbeitspläne. Ein besonderes Augenmerk liegt auf dem Umgang des Planungssystems im Falle von geforderten Montagevorgängen, die in der gegenwärtigen Konfiguration des Montagesystems nicht durchgeführt werden können. Die Generierung von Handlungsempfehlungen für die unterschiedlichen Rollen in den Planungsschritten wird im Detail erklärt. Abb. 34 gibt eine Übersicht über alle Schritte der Methode in der Synthese-Domäne. Das Vorgehen wird am Beispielprodukt „Gehäuse“ aus Abb. 33 erläutert, für das eine Arbeitsplanung für ein beispielhaftes Montagesystem, dessen Fähigkeitenmodell in Abb. 35 abgebildet ist, erfolgen soll. Die Darstellung beschränkt sich zum einfacheren Verständnis auf eine Montagereihenfolge.

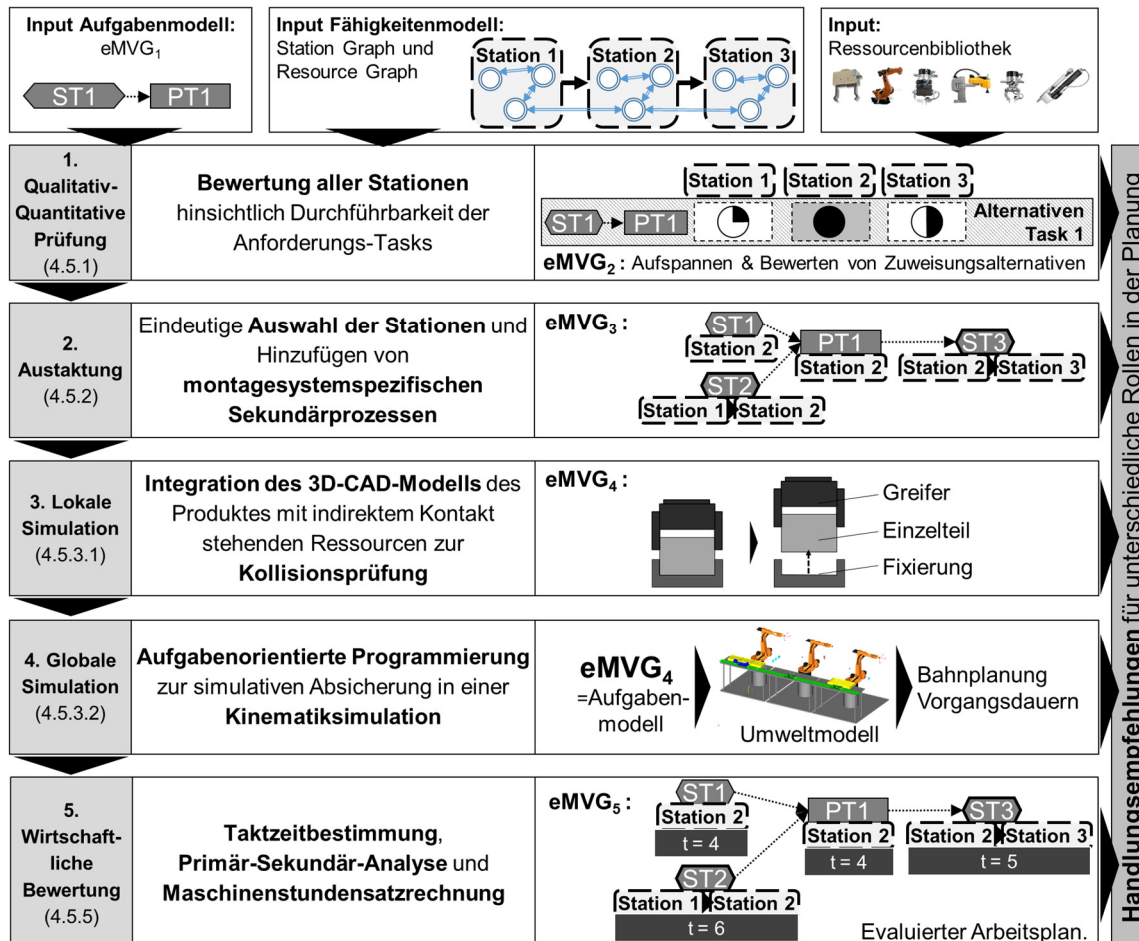


Abbildung 34: Schritte der Synthesemethode zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung in der Synthese-Domäne.

4.5.1 Qualitativer und quantitativer Abgleich der Anforderungen und Fähigkeiten

Der qualitative und quantitative Abgleich ist der erste Schritt in der Synthesedomäne und dient der Synthese des Aufgabenmodells in Form des eMVG₁ mit dem Fähigkeitenmodell des Montagesystems, bestehend aus RG und SG. Ziel ist das Aufspannen des kompletten Lösungsraumes und die Bewertung möglicher Zuweisungsalternativen. Der eMVG₁ wird automatisch in den eMVG₂ überführt, der sich ausschließlich aus Alternativen-Tasks zusammensetzt. Der eMVG₂ ist *produktionssystemspezifisch*, da Ressourcen und Stationen eines konkreten Montagesystems Teil des eMVG₂ sind. Der Vorgang wird für jede Montagereihenfolge durchgeführt.

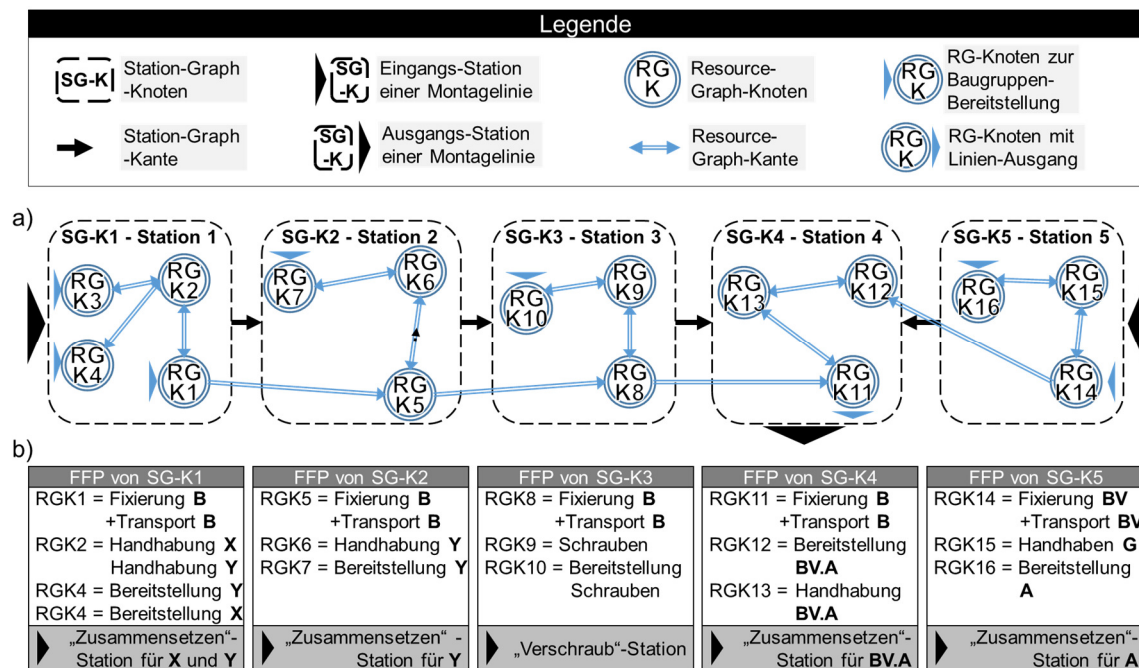


Abbildung 35: a) Fähigkeitenmodell des beispielhaften Montagesystems, das zur Montage des Produktes „Gehäuse“ verwendet werden soll. b) Zusammenfassung der Fähigkeits-Funktionsprimitiva und –Tasks in den Stationen.

Alle Stationen des Montagesystems werden hinsichtlich ihrer Eignung zur Durchführung der geforderten Montagevorgänge bewertet. Das Vorhandensein der geforderten FP-Typen sowie die Einhaltung der geforderten Relationen zwischen den Parameterwerten der Anforderungs-FP der Anforderungs-Tasks und den Parameterwerten der Fähigkeits-FP der Stationen wird analog zu den geforderten Relationen automatisch überprüft (vgl. *Matchmaking* in Abschnitt 4.2.2). Abb. 36 zeigt den Abgleich zwischen zwei exemplarischen, zwingend aufeinanderfolgenden

4 Entwicklung eines Systems zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung

Anforderungs-Tasks (ST4 und PT4) aus dem lösungsneutralen eMVG₁ des Produktes „Gehäuse“ aus Abb. 33 mit zwei ausgewählten SG-Knoten (SG-Knoten 3 und 5) und dazugehörigen RG-Knoten des Montagesystems aus Abb. 35.

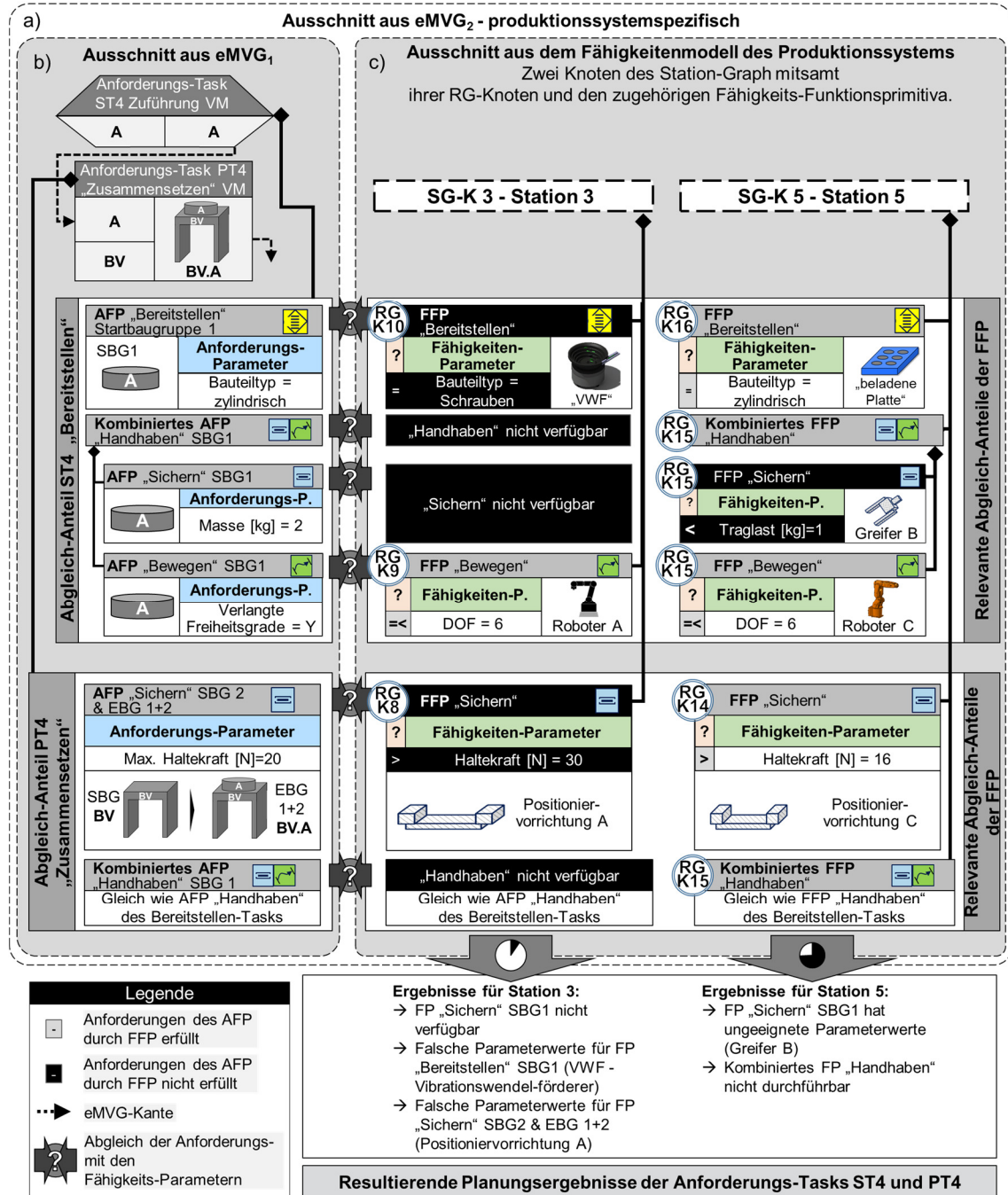


Abbildung 36: a) Visualisierung des qualitativen und quantitativen Abgleiches am Beispiel der zwingend direkt aufeinanderfolgenden Anforderungs-Tasks ST4 und PT4 (a), abgeglichen mit den Stationen 3 und 5 (c). Unten sind zudem die aus dem Abgleich resultierenden Planungsergebnisse dargestellt. Vom Produkt geforderte Parameterwerte der AFP, die von den FFP der RG-Knoten nicht erfüllt werden, sind schwarz gekennzeichnet.

Zur Durchführung jedes Anforderungs-Tasks werden zwei durch eine RG-Kante verbundene RG-Knoten benötigt, da jeder zweihändige Montagevorgang zwei kooperierende Ressourcen verlangt. Jede valide Zuweisung eines Tasks erfordert, dass eine der Startbaugruppen und die Endbaugruppe unterschiedlichen benachbarten RG-Knoten zugewiesen werden. Als Bedingung für die Zuweisung eines Primärvorgangs zu einer Station müssen die zugehörigen, zwingend vorgelagerten Sekundärvorgänge innerhalb dieser Station durchführbar sein. Daher werden die Ergebnisse des qualitativ-quantitativen Abgleiches der AFP eines Primär-Anforderungs-Tasks und des dazugehörigen, zwingend vorgelagerten Sekundär-Anforderungs-Tasks mit den Fähigkeiten-Funktionsprimitiva in einer Station zusammengefasst bewertet.

Abb. 37 zeigt den kompletten Lösungsraum mitsamt der Bewertung der Eignung der Stationen in dem eMVG₂ für das Produkt „Gehäuse“ (Abb. 33), der sich durch den Abgleich aller Anforderungs-Tasks mit den im Montagesystem verfügbaren Fähigkeiten-Tasks der Stationen ergibt. Folgende Bewertungen der Stationen können aus dem Abgleich resultieren (vgl. Abb. 37):

1. *Vollständige Erfüllung der gestellten Anforderungen durch Station:* Alle geforderten FP-Typen der zwingend aufeinander folgenden Anforderungs-Tasks sind in einer Station in Form benachbarter RG-Knoten mit entsprechenden FFP enthalten. Die geforderten Relationen beim Vergleich der Parameterwerte der Abgleich-Anteile sind erfüllt. Im Falle von RG-Knoten mit der Möglichkeit zum automatischen Ressourcenwechsel kann eine automatische Rekonfiguration notwendig sein. Die entsprechenden Stationen können als *valide* zur Durchführung des Montagevorgangs angenommen werden, siehe Station 4 in Abb. 36.
2. *Nicht-Erfüllung der Abgleich-Anteil-Parameterwerte eines AFP durch Station:* Alle geforderten FP-Typen sind in einer Station enthalten, jedoch werden die Parameterwerte eines oder mehrerer Abgleich-Anteile eines AFP von den FFP der RG-Knoten in einer Station nicht erfüllt. Die Rekonfiguration mindestens einer Ressource in der Station ist daher notwendig, siehe FFP „Sichern“ in RG-Knoten 15 in Station 5 in Abb. 36.
3. *Nicht-Erfüllung von Abgleich-Anteil-Parameterwerten mehrerer AFP durch Station:* Die geforderten FP-Typen sind in einer Station enthalten, jedoch werden die Parameterwerte mehrerer AFP von einer Station nicht erfüllt. Die Rekonfiguration mehrerer Ressourcen ist daher notwendig.
4. *Fehlen eines geforderten FP-Typs in der Station:* Mindestens eine Rekonfiguration der Station ist nötig, siehe Station 3 in Abb. 36.

4 Entwicklung eines Systems zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung

5. *Fehlen mehrerer geforderter FP-Typen in der Station, sodass mehrere Rekonfigurationen nötig sind.*

Es wird angenommen, dass die Rekonfiguration einer Station, die zur Durchführung desselben Task-Typen verwendet wird, niedrigere Aufwände mit sich bringt, als die Befähigung einer Station zur Durchführung neuer Task- und FP-Typen.

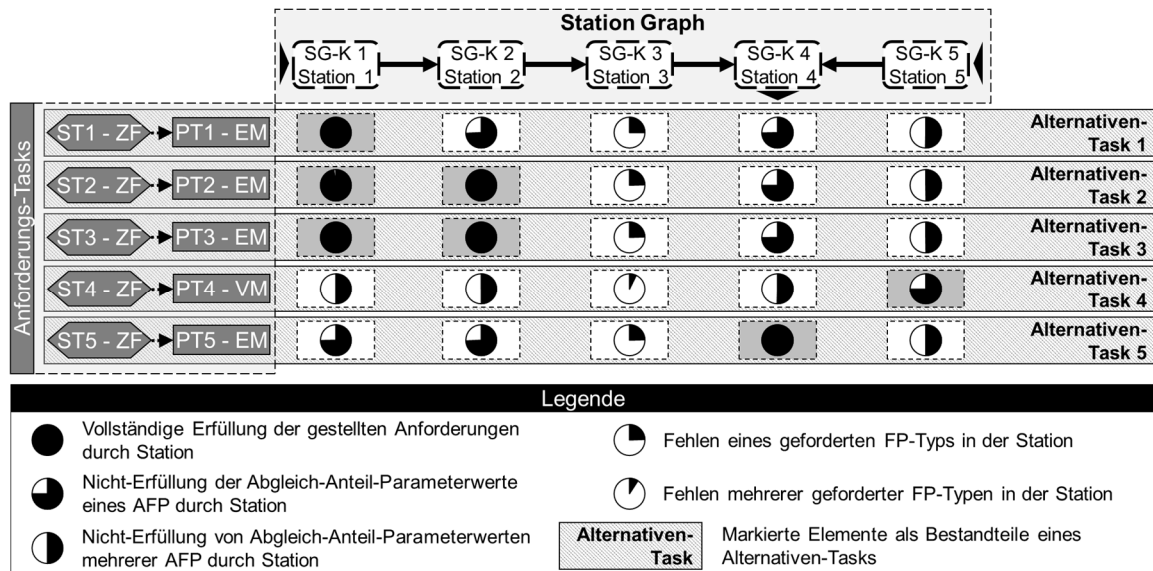


Abbildung 37: Vereinfachte Darstellung des eMVG₂ (unvollständige Vorrangbeziehungen zwischen Anforderungs-Tasks) des Produktes „Gehäuse“ als Ergebnis des vollständigen qualitativen und quantitativen Abgleiches. Die Eignung jeder Station im Montagesystem wird für jeden der zwingend aufeinanderfolgenden Sekundär- und Primär-Anforderungs-Tasks bewertet.

Kann die Baugruppe nicht direkt von der Bereitstellung durch die Ressource, die zur Durchführung des Primärvorgangs ausgewählt wurde, aufgenommen werden, müssen weitere Handhabungs-Tasks zum eMVG hinzugefügt werden. Ausgehend von den RG-Knoten mit dem Bereitstellungs-FP wird mittels eines Algorithmus zur Suche kürzester Wege in Graphen (z. B. Dijkstra-Algorithmus, vgl. DIESTEL (2010)) ein Weg zum RG-Knoten gesucht, der zur Durchführung des Primärvorgangs ausgewählt wurde. Für jede notwendige Übergabe zwischen zwei RG-Knoten wird ein Handhabungs-Task zum eMVG₂ hinzugefügt. (MICHNIEWICZ & REINHART 2015)

Ergebnis des automatischen qualitativ-quantitativen Abgleiches ist der produktionssystemspezifische eMVG₂, bei dem jeder Anforderungs-FP der Anforderungs-Tasks mit den Fähigkeiten-FP der Stationen des Produktionssystems abgeglichen und hinsichtlich der Anforderungserfüllung bewertet wurde. Die Vorrangbeziehungen zwischen den eMVG-Knoten aus dem eMVG₁ bleiben dabei unverändert erhalten.

Im Folgenden soll die Auswahl der Parameter der Abgleich-Anteile für den qualitativ-quantitativen Abgleich diskutiert werden. Die Parameter werden bei der initialen Definition der Funktionsprimitiva festgelegt. Eine vollständige Prüfung der Eignung von Ressourcen zur Durchführung von Montagevorgängen ausschließlich basierend auf einem Parameterabgleich ist aufgrund der geometrischen Komplexität von Baugruppen und Ressourcen nicht mit absoluter Sicherheit möglich, weshalb in den nachfolgenden Planungsschritten simulative Absicherungen erforderlich sind. Zur Reduktion der Modellierungsaufwände ist eine minimale Zahl an Parametern mit möglichst hoher Aussagekraft anzustreben. Die Parameter können entsprechend den relevanten geometrischen oder prozesstechnischen Eigenschaften ausgewählt werden, sofern diese für den Ausschluss von Ressourcen geeignet sind. Beispielhaft sei das Drehmoment von Verschraubungen genannt. Gegebenenfalls kann sogar eine eindeutige Zuordnung von Ressourcen zu Baugruppen-Typen erfolgen, etwa im Falle von Bereitstellungen und Greifern, die explizit für diese entwickelt wurden. Die AFP der Baugruppen und die FFP der entsprechenden Ressourcen können zur Reduktion des Lösungsraumes direkt miteinander verknüpft werden. Allerdings reduziert diese Art der Parameterauswahl die Allgemeingültigkeit und die abgebildete Veränderungsfähigkeit des Planungssystems.

4.5.2 Austaktung

Ausgehend von den bekannten validen Zuweisungsmöglichkeiten der geforderten Montagevorgänge zu den im Montagesystem verfügbaren Stationen in Form des eMVG₂ aus dem vorherigen Planungsschritt ist das Ziel der Austaktung die automatische Auswahl der Stationen für die Montagevorgänge, die im Nachgang simulativ geprüft werden sollen. Zur Minimierung der Anzahl an rechenzeitaufwändigen Simulationsaufrufen soll für jeden der Anforderungs-Tasks im Produkt-Aufgabenmodell jeweils ein SG-Knoten im Station-Graph bestimmt und an die nächsten Planungsschritte übergeben werden. Der eMVG₂ wird zum eMVG₃, indem die Alternativen-Tasks in Arbeitsplan-Tasks überführt werden. Nach der eindeutigen Auswahl der Stationen und Ressourcen für die geforderten Montagevorgänge werden die notwendigen Transportvorgänge zwischen den Stationen bestimmt und in Form von sekundären Arbeitsplan-Tasks zum eMVG₂ hinzugefügt. Die übergeordneten Zielstellungen des Planungsalgorithmus für die Austaktung, der im Folgenden vorgestellt wird, lauten:

1. Der Arbeitsplan soll möglichst einen unidirektionalen Materialfluss durch eine Montagelinie bewirken, um die Auslastung der Stationen zu maximieren.
2. Es wird eine minimale Anzahl an Transportvorgängen zwischen den Stationen angestrebt, um Sekundärvorgänge zu vermeiden.

3. Das Hinzufügen und Entfernen der Ressourcen in Montagestationen sollte vermieden werden, um Rekonfigurationsaufwände zu vermeiden.
4. Die Montagevorgänge sollen auf möglichst viele Stationen eines Montagesystems verteilt werden, um eine möglichst geringe und gleichmäßige Taktzeit zu gewährleisten.
5. Es wird eine Zuordnung von Cluster-Baugruppen, bei denen dieselbe Baugruppe mehrfach montiert wird (z. B. mehrfache Montage derselben Schraube), zu einer Station priorisiert, um die Anzahl der notwendigen unterschiedlichen Ressourcen möglichst gering zu halten.

Abschnitt 4.5.2.1 stellt unterschiedliche *Restriktionen* vor, die dem Nutzer eine Anpassung der in Abschnitt 4.5.2.2 vorgestellten automatischen Planungs-Sequenz zur Austaktung und Generierung von Handlungsempfehlungen erlaubt.

4.5.2.1 Restriktionen zur Anpassung der Austaktung

Das Planungsvorgehen kann mittels *Restriktionen* manuell angepasst werden, um die automatische Planungs-Sequenz der Austaktung an unterschiedliche Rahmenbedingungen anzupassen. Die Restriktionen schränken die Freiheitsgrade der Planung ein und stellen eine Erweiterung der Kategorisierung der Austaktung nach BOYSEN ET AL. (2007) dar.

Restriktion 1 – unidirektionaler Materialfluss

Die Restriktion des *unidirektionalen Materialflusses* lässt ausschließlich Transportvorgänge zwischen den SG-Knoten in Richtung der gerichteten SG-Kanten zu. Transportvorgänge entgegen der bevorzugten Materialflussrichtung werden somit nicht betrachtet. Die Restriktion des unidirektionalen Materialflusses sollte genutzt werden, wenn eine hohe Auslastung des Montagesystems gefordert ist, etwa um eine getaktete Fließmontage mit paralleler Durchführung von Montagevorgängen an den Stationen an unterschiedlichen Instanzen des Produktes zu ermöglichen.

Ist hingegen ein besonders hohes Maß an Flexibilität gefordert, etwa weil eine seltene Variante eines Produktes in einer kleinen Losgröße mit minimalen Anpassungen am Montagesystem montiert werden soll, kann die Berücksichtigung von Materialflüssen entgegen der Hauptrichtung zielführend sein. Ohne die Restriktion des unidirektionalen Materialflusses kann bei der Austaktung für jeden Anforderungs-Task jede Station eines Montagesystems in Betracht gezogen werden. Allerdings kann dies eine erheblich geringere Auslastung des Montagesystems zur Folge haben, da der kontinuierliche Materialfluss im Sinne einer Fließmontage unterbrochen wird.

Restriktion 2 – keine automatische Berücksichtigung von manuellen Rekonfigurationen des Montagesystems

Das im Folgenden vorgestellte Planungssystem erlaubt die automatische Ableitung von auszutauschenden bzw. hinzuzufügenden Ressourcen für die Montage eines Produktes ausgehend von der momentanen Konfiguration eines Montagesystems. Dies kann mittels der Restriktion *keine automatische Berücksichtigung von manuellen Rekonfigurationen des Montagesystems* (vgl. Abschnitt 2.4.1) ausgeschlossen werden, um die Montage eines Produktes mit der vorliegenden Konfiguration „zu erzwingen“ und so die Aufwände für die Arbeitssystemplanung zu minimieren. Dies kann beispielsweise für eine einmalig herzustellende Produktvariante der Fall sein, für die Veränderungen am Montagesystem als nicht zielführend angesehen werden.

Restriktion 3 – Einschränkung des betrachteten Teils der Ressourcenbibliothek

In Abhängigkeit von dem bei der Suche nach alternativen Ressourcen eingebundenen Teils der Ressourcenbibliothek ergeben sich potentiell unterschiedliche Lösungsräume (vgl. Abschnitt 4.3.1), die durch Restriktion 3 festgelegt werden. Die Restriktion ist nur sinnvoll, wenn eine Rekonfiguration der Anlage möglich ist (siehe Restriktion 2). Im Falle einer Einschränkung auf den *produktionssystemspezifischen* Teil sind ausschließlich Rekonfigurationen innerhalb der Anlage möglich. Durch die Einbindung des *physisch verfügbaren* Teils werden sämtliche im Unternehmen oder am Produktionsstandort physisch vorhandene Ressourcen bei der Suche nach alternativen Ressourcen eingebunden. Der größte Lösungsraum und die größten monetären und zeitlichen Aufwände ergeben sich bei der Einbindung des *physisch nicht verfügbaren* Teils der Bibliothek. Die Entscheidung hinsichtlich der einzubindenden Ressourcenbibliotheks-Teile ist folglich abhängig vom zeitlichen Planungshorizont sowie von den akzeptablen Mehrkosten zur Befähigung des Montagesystems zur Montage des Produktes.

Restriktion 4 – Ausschluss unterschiedlicher Rollen

Im Falle von Aufgabenmodellen des Produktes, die nicht vollständig durch ein Montagesystem durchgeführt werden können, kann sowohl die Anpassung eines Produktes an die Fähigkeiten des Montagesystems als auch die Anpassung des Montagesystems an die Anforderungen des Produktes zielführend sein, vgl. CUIPER (2000). Das Planungssystem generiert dabei automatisiert Handlungsempfehlungen sowohl für den Produktentwickler als auch für die Arbeitssystemplanung und die Betriebsmittelplanung. Restriktion 4 verhindert die Generierung der Handlungsempfehlungen für die unterschiedlichen Rollen, was in Abhängigkeit vom Planungsszenario zielführend sein kann. So kann es etwa bei einem Produkt in

geringer Stückzahl in einer frühen Produktentwicklungsphase vorteilhaft sein, Änderungen des Montagesystems zu vermeiden. Andererseits kann eine Anpassung des Montagesystems bei Produkten, die möglichst zeitnah hergestellt werden sollen und deren Produktgestalt nicht mehr verändert werden darf, zweckmäßig sein.

4.5.2.2 Planungs-Sequenz zur Austaktung

Im Folgenden wird die automatische Planungs-Sequenz zur Austaktung (vgl. Abb. 38) vorgestellt und schrittweise erläutert. Zur Veranschaulichung dienen dabei weiterhin das Produkt „Gehäuse“ (Abb. 33) sowie das Montagesystem aus Abb. 35.

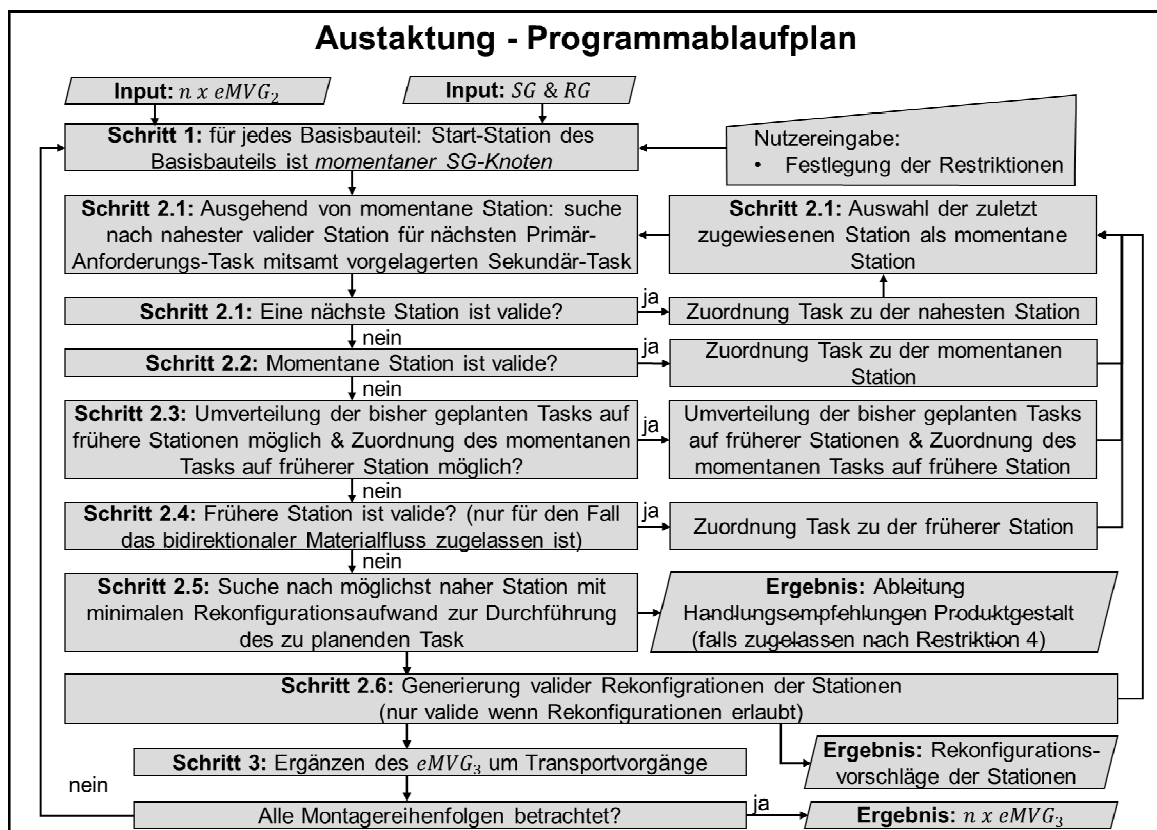


Abbildung 38: Programmablaufplan der Planungs-Sequenz zur Austaktung.

Grundsätzlich erfolgt die eindeutige Zuordnung der Anforderung-Tasks zu den SG-Knoten sequentiell. Einleitend sollen zwei Begriffe eingeführt werden, die im Folgenden wiederkehrend verwendet werden. Als *zu planender Anforderungs-Task* werden der Primär-Anforderungs-Task mitsamt den zwingend vorgelagerten Sekundär-Tasks bezeichnet, deren eindeutige Zuweisung zu einer Station im Moment der Betrachtung erfolgt. Der *momentane SG-Knoten* bezeichnet denjenigen SG-

Knoten, dem zuletzt ein Anforderungs-Task zugewiesen wurde und von dem aus die Suche nach einem SG-Knoten für den *zu planenden Anforderungs-Task* erfolgt.

Zur Ermittlung des minimalen Abstandes zwischen Knoten in den Graphen wird eine angepasste Version des Dijkstra-Algorithmus verwendet, die zusätzlich die Zugänglichkeit von mechanischen Schnittstellen von Baugruppen bei der Übergabe zwischen Ressourcen einbezieht, vgl. MICHNIEWICZ & REINHART (2015, 2016). Das Planungsvorgehen wird für alle Endmontage-Teilgraphen sowie für die Vormontage-Teilgraphen separat durchgeführt, da diese unterschiedliche Basisbauteile besitzen. Als Ort der Bereitstellung der Basisbauteile werden die Eingangs-Stationen des Montagesystems angenommen, die in der Lage sind, das Basisbauteil zu fixieren. Die Abb. 39 und 40 zeigen das Ergebnis der Planungs-Sequenz der Austaktung und dienen im Folgenden zur Erläuterung der Planungsschritte.

Schritt 1 – Festlegen der initialen *Momentanen SG-Knoten*

Im ersten Planungsschritt erfolgt die Bestimmung der initialen *Momentanen SG-Knoten*. Jedes Basisbauteil wird an einer Eingangs-Station bereitgestellt. Der Ausgangszustand des Basisbauteils ist der RG-Knoten in der Eingangs-Station, welcher zur Fixierung des Basisbauteils in der Lage ist. Für jedes Basisbauteil sind eine oder mehrere Eingangs-Stationen bekannt, die den momentanen SG-Knoten zu Beginn der Austaktung bilden (siehe SG-Knoten 1 für Basisbauteil *B* und SG-Knoten 5 für Basisbauteil *BV* der Vormontage in Abb. 39 und 40).

Schritt 2 –Zuordnung der Stationen zu den Anforderungs-Tasks

Die Regeln des Such-Algorithmus für die Auswahl der SG-Knoten in den Alternativen-Tasks sind im Folgenden erklärt. Die aufeinanderfolgenden Alternativen-Tasks werden dabei sequentiell abgearbeitet und jedem Anforderungs-Task werden eindeutig ein SG-Knoten sowie die entsprechenden RG-Knoten zugewiesen. Die Schritte 2.1-2.6 werden durchgeführt, bis alle Anforderungs-Tasks jeweils eindeutig einem SG-Knoten des Montagesystems zugeordnet worden sind. Der so generierte eMVG₃ besteht ausschließlich aus Arbeitsplan-Tasks.

Schritt 2.1 - Suche der nächsten validen Station

Ausgehend vom momentanen SG-Knoten wird für den zu planenden Anforderungs-Task mittels des angepassten Dijkstra-Algorithmus der Abstand zu den unterschiedlichen validen SG-Knoten im Station-Graph bestimmt und der naechste valide SG-Knoten ausgewählt, vgl. MICHNIEWICZ & REINHART (2015, 2016) und (MICHNIEWICZ ET AL. 2016). Der momentane SG-Knoten wird dabei nicht berücksichtigt, da eine Verteilung der Primär-Tasks auf unterschiedliche Stationen zur Senkung der Taktzeiten grundsätzlich als vorteilhaft angesehen wird (siehe PT1

und PT2, die beide auf Station 1 montierbar sind, allerdings wird PT2 Station 2 zugewiesen in Abb. 39 und 40).

Schritt 2.2 – Prüfung der momentanen Station

Für den Fall, dass der zu planende Anforderungs-Task nicht durch einen nachfolgenden SG-Knoten valide durchgeführt werden kann, aber eine Durchführung des zu planenden Task durch den momentanen SG-Knoten möglich ist, wird der zu planende Task ebenfalls dem momentanen SG-Knoten zugewiesen. (siehe PT2 und PT3, die beide Station 2 zugewiesen werden, da keine spätere Station zur Durchführung der Tasks geeignet ist, in den Abb. 39 und Abb. 40).

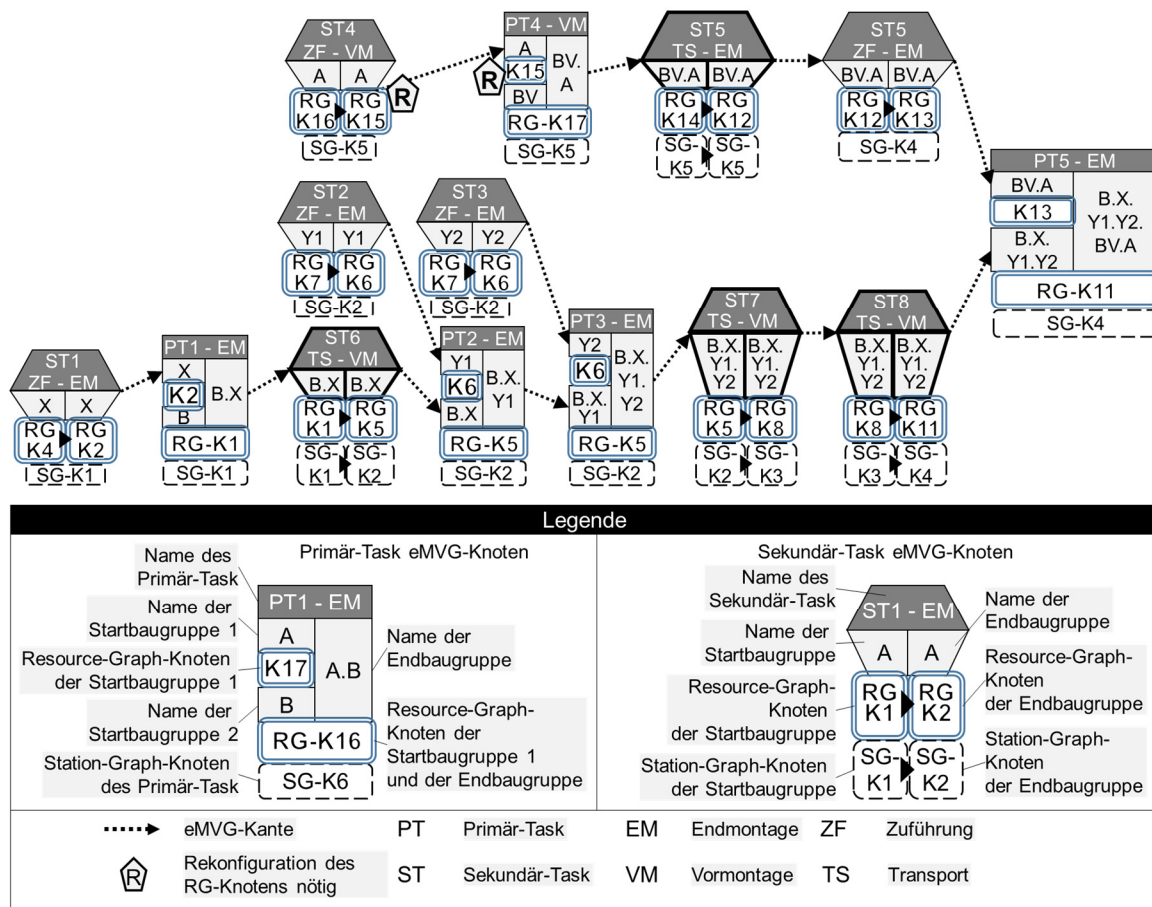


Abbildung 39: eMVG₃ des Produktes „Gehäuse“ mitsamt einer Zuweisung der RG- und SG-Knoten zu den eMVG-Knoten für den Fall einer unidirektionalen Austattung und erlaubten Rekonfigurationen. Die neu hinzugefügten Transport-Vorgänge sind mit stärkeren Linien hervorgehoben. Zur Durchführung des Arbeitsplans ist eine Rekonfiguration an RG-Knoten 15 nötig.

Schritt 2.3 - Umverteilung bereits geplanter Tasks auf frühere Stationen

Kann ein zu planender Anforderungs-Task weder dem momentanen SG-Knoten noch einem nachfolgenden SG-Knoten zugewiesen werden, wird im ersten Schritt überprüft, ob eine Zuordnung der vorherigen, bereits zugeordneten Anforderungs-Tasks zu früheren SG-Knoten möglich ist. Dies hat gegebenenfalls eine Zuordnung bisher geplanter Primärvorgänge zu einer geringeren Anzahl an Stationen zur Folge, sodass mehr alternative Stationen zur Zuordnung des zu planenden Anforderungs-Tasks zur Verfügung stehen. Der Planungsalgorithmus folgt der Regel, dass aufeinanderfolgende Anforderungs-Tasks denselben oder aufeinanderfolgenden Montagestationen zugewiesen werden. Schritt 2.3 wird iterativ wiederholt, bis dem zu planenden Anforderungs-Task ein valider SG-Knoten zugewiesen wird oder bis trotz Umplanung der vorherigen Tasks der zu planende Anforderungs-Task keiner Station zugewiesen werden kann.

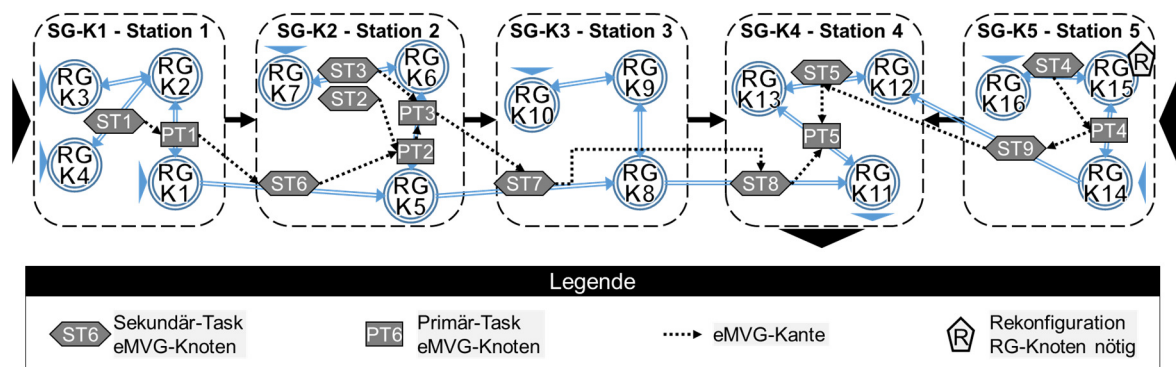


Abbildung 40: Fähigkeitenmodell des beispielhaften Produktionssystems mitsamt den dargestellten Zuordnungen der Tasks des eMVG₃ des Produktes „Gehäuse“ zu den SG-Knoten und RG-Knoten für den Fall einer unidirektionalen Austaktung und erlaubten Rekonfigurationen. Die Tasks werden zwischen jenen RG-Knoten dargestellt, die an dem von ihnen beschriebenen Vorgang beteiligt sind.

Schritt 2.4 – Prüfung einer früheren Station

Für den Fall, dass Schritt 2.3 keine Lösung findet und der folgende Anforderungs-Task auf einem vorhergegangenen SG-Knoten durchgeführt werden kann, wird der Anforderungs-Task dem nächsten validen, vorhergegangenen SG-Knoten zugewiesen. Dies ist nur möglich, wenn ein bidirektionaler Materialfluss (vgl. Restriktion 1) entgegen der Hauptrichtung des Materialflusses zwischen den SG-Knoten erlaubt ist.

Schritt 2.5 – Suche einer Station mit minimalem Rekonfigurationsaufwand

Kann für einen zu planenden Anforderungs-Task kein valider SG-Knoten im gesamten SG gefunden werden, wird ein SG-Knoten gesucht, der möglichst geringe Rekonfigurationsaufwände zur Befähigung der Durchführung der Anforderungs-Tasks verlangt und möglichst nahe an der momentanen Station ist. Daher werden für die Auswahl des zu rekonfigurierenden SG-Knotens folgende Kriterien angewandt:

1. Die Station soll möglichst viele der geforderten FP-Unterklassen anbieten. Die Annahme dahinter ist, dass in einer Station, die für dieselbe Unterklasse von Tasks verwendet wird, geringere Änderungsaufwände zu erwarten sind, als in einer Station mit anderen FFP-Unterklassen und somit einer anderen Task-Unterklasse.
2. Die Station soll die Abgleich-Anteile möglichst vieler Anforderungs-FP der Anforderungs-Tasks vollständig erfüllen. Je mehr unterschiedliche Fähigkeits-FP einer Station nicht zur Durchführung des geforderten Montagevorgangs geeignet sind, desto mehr Ressourcen sind nicht geeignet und desto mehr Rekonfigurationen der Station sind nötig.
3. Die Station sollte möglichst nah an der momentanen Montagestation sein, um Transportvorgänge zu vermeiden. Im Falle der Restriktion des unidirektionalen Materialflusses werden ausschließlich Stationen geprüft, die ausgehend von der momentanen Station erreichbar sind.

Die so ausgewählte Station dient im Falle der Einbeziehung der Rolle der Produktentwickler (Restriktion 4) der Generierung der Handlungsempfehlungen für das zu montierende Produkt. Die Handlungsempfehlungen werden im eMVG abgebildet. Die betroffenen nicht durchführbaren Montagevorgänge können mitsamt der Ursache direkt dem Produktentwickler kommuniziert werden, um gegebenenfalls eine zielgerichtete Anpassung des Produktes zu ermöglichen. Durch die Auswahl einer Station mit möglichst vollständiger Erfüllung der Produkthanforderungen kann angenommen werden, dass im Vergleich zu anderen Stationen geringe Änderungen am Produkt notwendig sind, um die Montagevorgänge an der Station durchführbar zu gestalten. Die Handlungsempfehlungen für die Produktentwicklung ergeben sich aus den nicht erfüllten Parameterwerten der Abgleich-Anteile oder den gegebenenfalls fehlenden FP-Typen, die gegebenenfalls durch andere Montagevorgänge substituiert werden können.

Schritt 2.6 – Generierung valider Rekonfigurationen der Stationen

Ausgehend von der in Schritt 2.5 bestimmten Station mit minimalen Rekonfigurationsaufwänden werden in Schritt 2.6 valide Rekonfigurationen der

Station bestimmt. Ziel dieses Planungsschritts ist die Bestimmung möglicher hinzuzufügender oder auszutauschender Ressourcen der Stationen des Montagesystems als Planungsergebnis für die Arbeitssystemplanung. Des Weiteren soll die Bestimmung der Anforderungen hinsichtlich neuer, bisher in der Ressourcenbibliothek nicht enthaltener Ressourcen für die Betriebsmittelplanung, welche die vom Produkt gestellten Anforderungen erfüllen, erfolgen. Die Vorgehensweise zur automatischen Bestimmung der Rekonfigurationen sowie der zu beschaffenden, bisher unbekanntenen Ressourcen wird im Folgenden erläutert und ist in Abb. 41 dargestellt. Schritt 2.6 erfolgt nur, wenn die automatische Rekonfiguration der Betriebsmittel in den Stationen gestattet ist (vgl. Restriktion 2) sowie die entsprechenden Rollen nicht aus der Generierung von Handlungsempfehlungen ausgeschlossen sind (vgl. Restriktion 4).

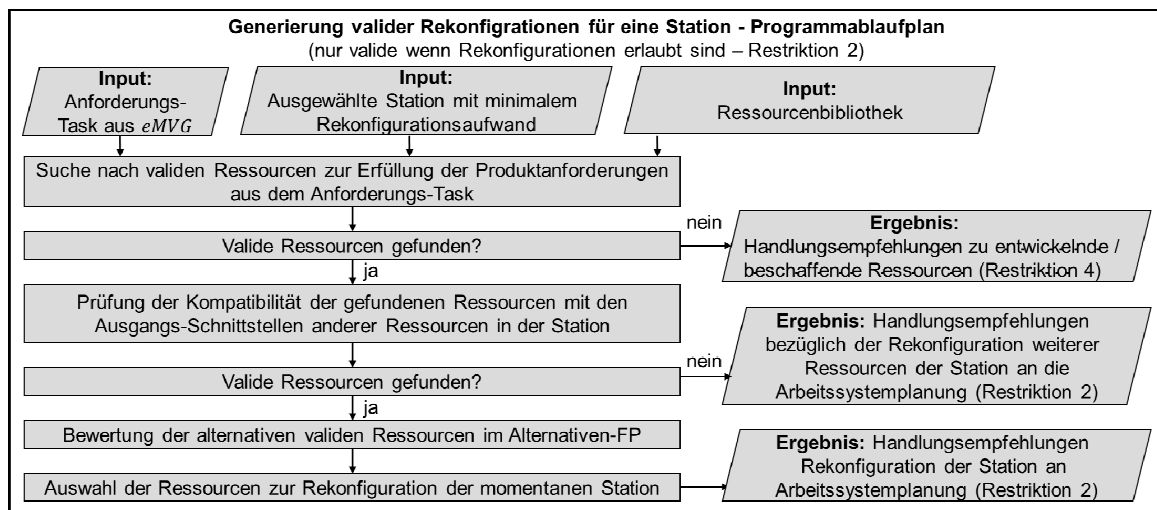


Abbildung 41: Programmablaufplan zur Generierung valider Rekonfigurationen für eine Station.

Die automatisierte Bestimmung der hinzuzufügenden oder auszutauschenden Ressourcen für die ausgewählte Station mit den minimalen Rekonfigurationsaufwänden erfolgt, indem in der Ressourcenbibliothek analog zu den festgelegten eingebundenen Bibliotheks-Teilen (vgl. Restriktion 3) nach geeigneten Ressourcen gesucht wird. Die Ressourcen müssen dabei folgende Kriterien einhalten, um als valide in Betracht gezogen werden zu können:

- *Bedingung 1:* Die Fähigkeits-FP der Ressource müssen dem Anforderungs-FP-Typen entsprechen und sämtliche geforderten Relationen der Abgleich-Anteile einhalten, siehe Abb. 42.
- *Bedingung 2:* Die Kompatibilität zwischen den Eingangs-Schnittstellen der neuen Ressource und den Ausgangs-Schnittstellen der in der Station

befindlichen Ressourcen muss gegeben sein, um weitere Rekonfigurationen der Station zu vermeiden.

Kann eine Ressource in der Ressourcenbibliothek Bedingung 1 zwar erfüllen, ist jedoch aufgrund ihrer Schnittstellenbeschreibung nicht mit den anderen Ressourcen in der Station kompatibel, sind weitere Rekonfigurationen der Station nötig. Die Auswahl der Ressourcen für diese weiteren Rekonfigurationen kann ebenfalls automatisiert werden, indem die Anforderungen an die Eingangs-, Ausgangs- und den Abgleich-Parameter des Anforderungs-Task berücksichtigt werden. Die Handlungsempfehlungen bezüglich der Rekonfigurationen der Stationen werden im eMVG₃ in den betroffenen eMVG-Knoten gespeichert.

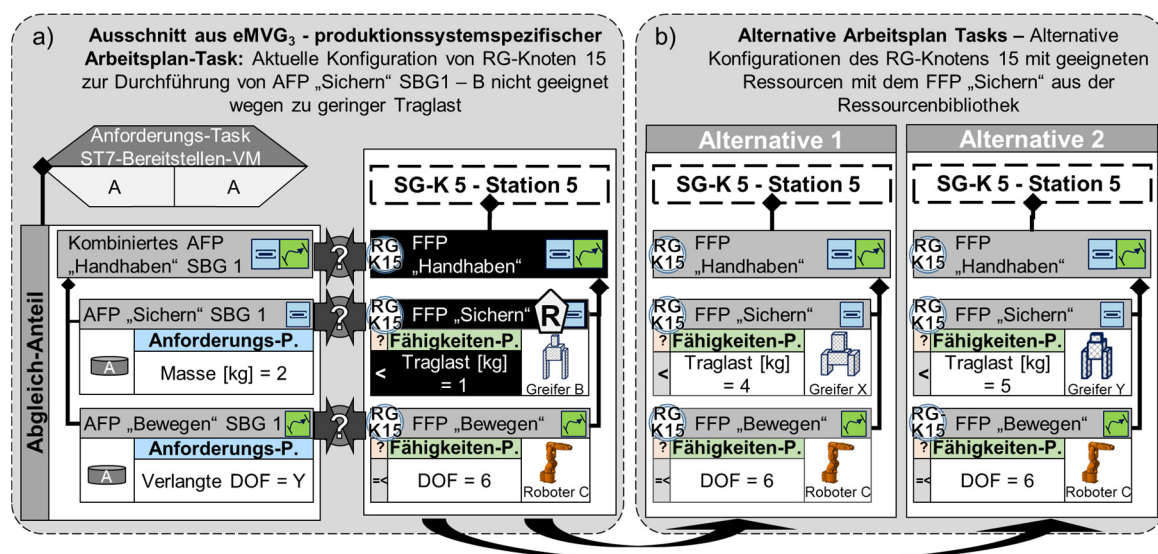


Abbildung 42: a) Darstellung eines Ausschnitts des eMVG₃ mit einem nicht validen Arbeitsplan-Task ST7. b) Zwei alternative Ressourcen mit dem FFP „Sichern“ wurden ausgewählt, deren Fähigkeits-Parameter die Anforderungs-Parameter des AFP erfüllen.

Stehen mehrere alternative valide Betriebsmittel zur Verfügung, so wird jenes ausgesucht, das eine minimale Anzahl an Wechseln von weiteren Ressourcen in der Station verlangt. Um bei mehreren geeigneten Ressourcen eine endgültige Auswahl zu treffen, können weitere Bewertungskriterien, wie die Kosten der Ressource, ressourcenspezifische Aufwände zur Rekonfiguration der Station, Übererfüllung der vom Produkt gestellten Anforderungen oder die Prozessgeschwindigkeit der Ressource betrachtet werden. Zur detaillierteren Bewertung der Rekonfigurationsaufwände können komplexere Ansätze wie z. B. jene von PACHOW-FRAUNHOFER (2012) und KARL (2015) einbezogen werden.

Existiert in der Ressourcenbibliothek keine Ressource, die den Abgleich-Anteil des Anforderungs-FP erfüllen kann, muss die Betriebsmittelplanung eingebunden

werden, vgl. Abb. 41. Die Beschreibung des geforderten Montagevorgangs erlaubt eine zielgerichtete Betriebsmittelplanung, da die Anforderungen des Produktes an die Ressource in Form der Anforderungs-FP bereits präzise formuliert sind. Des Weiteren erlaubt die Vorauswahl einer Station die Berücksichtigung spezifischer Restriktionen wie etwa der verfügbaren Ausgangs-Schnittstellen der ausgewählten Station.

Das beschriebene Vorgehen soll am Beispielprodukt verdeutlicht werden. Im Falle der unidirektionalen Austaktung mit Rekonfiguration wurde für die Anforderungs-Tasks ST4 und PT4 Station 5 gewählt, da diese die Abgleich-Anteile am besten erfüllt, vgl. Abb. 37. Allerdings ist zur Befähigung der Station 5 eine Rekonfiguration von RG-Knoten 15 nötig, da der dort vorhandene Greifer nicht die Anforderungen des Produktes erfüllt, vgl. Abb. 36 und Abb. 42.

Schritt 3 - Ergänzen des eMVG₃ um Transportvorgänge

Anschließend erfolgt eine Erweiterung des eMVG₃ um weitere Sekundär-Tasks, die den Transportvorgängen zwischen den ausgewählten Stationen in den Arbeitsplan-Tasks entsprechen. Dafür werden im ersten Schritt alle notwendigen Transportvorgänge zwischen den ausgewählten Positioniervorrichtungen des Basisbauteils bzw. des Werkstückträgers generiert. Dabei kommt erneut der angepasste Dijkstra-Algorithmus zum Einsatz (vgl. Abschnitt 4.5.1). Die Anzahl der Transportvorgänge zwischen zwei Positioniervorrichtungen, denen aufeinanderfolgende Arbeitsplan-Tasks zugewiesen wurden, ist abhängig von der Länge des Weges zwischen den RG-Knoten der Positioniervorrichtungen im Resource-Graph. Der Transport zwischen zwei benachbarten SG-Knoten entspricht einem Sekundär-Task, der eindeutig den am Vorgang beteiligten RG-Knoten zugewiesen ist. Hinzugefügte Sekundär-Task-eMVG-Knoten der Transport-Tasks sind in den Abb. 39 und Abb. 40 fett dargestellt und mit *TS* abgekürzt.

4.5.2.3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse des vorgestellten Planungsvorgehens werden im Folgenden zusammengefasst. Das automatische Durchlaufen der Planungs-Sequenz generiert den produktionssystemspezifischen eMVG₃ für eine Montagereihenfolge in einer Montagelinie. Alternative Arbeitspläne für ein Montagesystem werden generiert, indem das Planungsvorgehen mit anderen Montagereihenfolgen oder mit anderen manuell vorgegebenen Restriktionen bezüglich der Austaktung wiederholt wird. Die Knoten des eMVG₃ sind Arbeitsplan-Tasks, bei denen die primären- und sekundären Anforderungs-Tasks eindeutig Stationen und Ressourcen zugeordnet sind. Es entsteht ein integriertes PPR-Datenmodell, das die Vorrangbeziehungen zwischen

den Montagevorgängen sowie den Stationen des Montagesystems miteinander verknüpft.

Im Falle von Anforderungs-Tasks, für die keine geeigneten SG-Knoten im Produktionssystem vorhanden sind, können automatisiert drei Arten von Handlungsempfehlungen generiert werden. Die Handlungsempfehlungen sind zielgerichtet, da die Ursachen für die Nicht-Erfüllung, beschrieben als fehlende Funktionsprimitiva mitsamt den dazugehörenden, im 3D-CAD-Modell des Produktes dargestellten Montagezuständen, bekannt sind. Die Handlungsempfehlungen werden in den betroffenen eMVG-Knoten abgebildet. Folgende Arten von Handlungsempfehlungen werden automatisiert bestimmt:

1. Die betroffenen Anforderungs-Tasks werden dem Produkt-Konstrukteur kommuniziert, um das Produkt zielgerichtet an die Restriktionen des Montagesystems anpassen zu können.
2. Die betroffenen Anforderungs-Tasks werden im Falle von validen alternativen Ressourcen in der Ressourcenbibliothek der Arbeitssystemplanung als durchzuführende manuelle Rekonfigurationen an der realen Anlage oder am digitalen Modell der Anlage vorgeschlagen.
3. Können in der Ressourcenbibliothek keine validen, zur Durchführung der Anforderungs-Task geeigneten Ressourcen gefunden werden, werden die zu erfüllenden Anforderungen an neu zu entwickelnde bzw. zu beschaffende Ressourcen an die Betriebsmittelplanung kommuniziert.

4.5.3 Automatische Simulation der Arbeitspläne

Die automatische simulative Prüfung der Arbeitspläne ist in zwei Phasen aufgeteilt, die *lokale* und die *globale Simulation*, vgl. REINHART ET AL. (2017). Die lokale Simulation (Abschnitt 4.5.3.1) fokussiert die Kollisionsprüfung zwischen dem Produkt und direkt in Kontakt mit diesen stehenden Ressourcen. Die globale Simulation (Abschnitt 4.5.3.2) nutzt eine Kinematiks simulation, die aufgabenorientiert programmiert wird. Sie dient der Absicherung der Kollisionsfreiheit und der Erreichbarkeit aller Ressourcen im Produktionssystem sowie der Bestimmung der Dauer der Montagevorgänge als Grundlage für eine nachgelagerte wirtschaftliche Bewertung der Arbeitspläne, die in Abschnitt 4.5.5 erklärt wird. Die Gründe für die Aufteilung in zwei Simulations-Phasen sind im Abschnitt 4.5.3.3 erläutert. Als Eingangsinformationen für die Simulation dienen der zuvor generierte eMVG₃, das 3D-CAD-Modell des Produktes, die Ressourcenbibliothek und das Umweltmodell des Montagesystems.

4.5.3.1 Lokale Simulation

Die *lokale Simulation* dient der automatischen simulativen Prüfung der Kollisionsfreiheit zwischen dem Produkt und den in direktem Kontakt mit dem Produkt stehenden Ressourcen, im Folgenden *lokale Ressourcen* genannt, bei der Durchführung der Arbeitsplan-Tasks an den ausgewählten Stationen des eMVG₃. Die zu prüfenden lokalen Ressourcen sind aufgrund der eindeutigen Zuordnung der Anforderungs-FP zu den Fähigkeits-FP der RG-Knoten in den ausgewählten SG-Knoten im eMVG₃ bekannt.

Die Zuordnung einer Ressource zu einem Anforderungs-FP wird als valide angenommen, wenn keine Kollision während der lokalen Simulation festgestellt worden ist. Können alle Tasks des eMVG₃ kollisionsfrei durchgeführt werden, ist das Ergebnis der lokalen Simulation der eMVG₄. Dieser beschreibt räumlich und geometrisch alle Zustände und Aktionen, an denen das Produkt sowie die im direkten Kontakt damit stehenden Ressourcen beteiligt sind. Im Falle von detektierten Kollisionen zwischen Baugruppen und Ressourcen werden die zuvor ausgewählten Ressourcen als nicht valide betrachtet. Analog zum vorherigen Schritt der Austaktung werden ebenfalls Handlungsempfehlungen für die unterschiedlichen Rollen abgeleitet und im eMVG₄ abgebildet.

Bei der lokalen Simulation wird 3D-CAD-Modells des Produktes im jeweiligen Montagezustand um die 3D-CAD-Modelle der Ressourcen für jeden der durchzuführenden Arbeitsplan-Tasks des eMVG₃ erweitert, siehe Abb. 43. Die Geometrie-Anteile der Anforderungs-Tasks und Fähigkeiten-Tasks werden somit in einem Modell zusammengeführt. Die Positionierung der Modelle zueinander erfolgt anhand der Schnittstellenbeschreibungen der Baugruppen und der Ressourcen. Im Falle von Ressourcen mit mehreren validen Positionierungen und Orientierungen relativ zum Produkt, etwa im Falle mehrerer Greifpunkte oder rotations-symmetrischer Bauteile, werden diese geprüft und diejenigen, bei denen Kollisionen detektiert wurden, ausgeschlossen, siehe Abb. 43 d). Zur Auswahl einer relativen Lage zueinander können unterschiedliche Kriterien zur Anwendung kommen, wie beispielsweise resultierenden Haltekräfte oder Sicherheit und Präzision der Fixierung (vgl. z. B. RÖHRDANZ (1998), SCHMALZ ET AL. (2016)).

Der Zustands-Anteil der Tasks wird verwendet, um die Relativbewegung der Baugruppen und Ressourcen abzubilden. Im Falle von Primär-Tasks werden die Montagebewegungen der Baugruppen, die während des Assembly Sequence Planning generiert wurden, mitsamt der in Kontakt stehenden Ressource durchgeführt und auf Kollisionsfreiheit geprüft (vgl. Abb. 43 a) und c)).

Zusätzlich wird während der lokalen Simulation die bisher unbekannte Ausföhrbewegung der Ressource nach der Erreichung der Zielposition der zu montierenden Baugruppe bestimmt und zur Vervollständigung des Zustands-Anteils des Tasks genutzt. Dies erfolgt, indem die Methode zur Bestimmung kollisionsfreier Bahnen aus Abschnitt 4.4.4.2 auf das 3D-CAD-Modell der Ressource an der Zielposition bezüglich des 3D-CAD-Modells des Produktes in entsprechenden Montagezustand angewandt wird, siehe Abb. 43 c). Die Bahnen der Ressourcen werden in Form von Aktionen im SFC des Zustands-Anteils des Tasks gespeichert. Diese Ergänzung überföhrt den eMVG₃ in den eMVG₄.

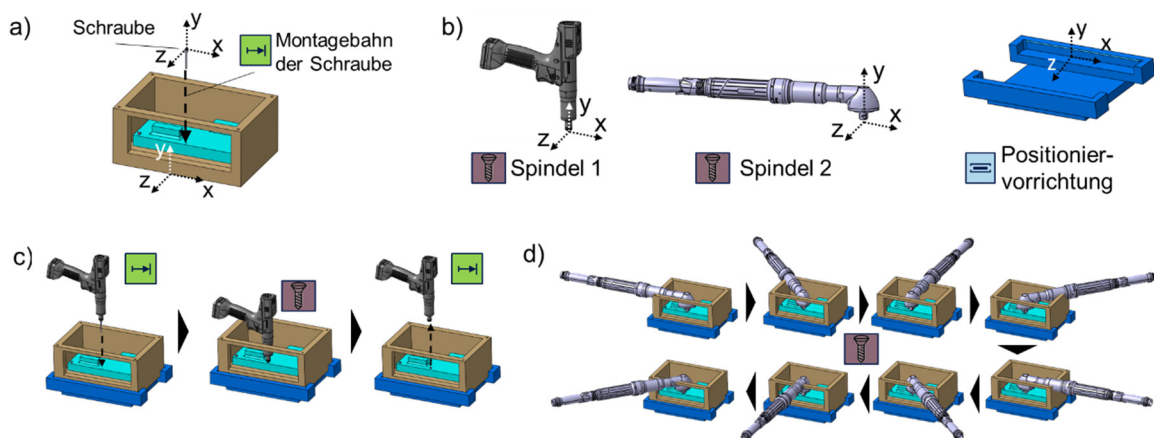


Abbildung 43: a) Beispielhaftes Produkt mitsamt einer zu montierenden Schraube, deren Montagebahn dargestellt ist. Die Schnittstellen der Baugruppen hin zu den Ressourcen sind als Koordinatensysteme dargestellt. b) 3D-CAD-Modelle von Ressourcen mit dargestellten Schnittstellen zur Positionierung relativ zu den Baugruppen. c) Erweiterung des 3D-CAD-Modells des Produktes um die Ressourcen. Die kollisionsfreie Montage- und Ausföhrbewegung der Ressource Spindel 1 ist dargestellt. d) Für die Ressource Spindel 2 kann keine kollisionsfreie Orientierung gefunden werden.

Ein ähnliches Vorgehen wird zur Bestimmung kollisionsfreier Bahnen im Falle von „Handhabungs“- und „Zuföhrungs“-Tasks angewandt. Daföür wird die Baugruppe an ihrer Startpose, beispielsweise in ihrer Bereitstellung, positioniert. Anschließend wird die Ausföhrbewegung der Baugruppe, erweitert um die in Kontakt stehenden lokalen Ressourcen, vgl. Abb. 44 a), sowie die Aufnahmebewegung der Ressource mittels der Methode zur Bestimmung kollisionsfreier Bahnen bestimmt. Ressourcen, die mit dem Produkt oder mit anderen Ressourcen kollidieren, werden im eMVG₄ als nicht valide gekennzeichnet.

Eine Besonderheit besteht in der Berücksichtigung der sich in Abhängigkeit vom Zustands-Anteil des Task verändernden Geometrie der Ressource. Beispielsweise sei

das FP-Entsichern eines mechanischen Backengreifers nach dem Erreichen der Zielpose einer Baugruppe genannt, siehe Abb. 44 b). Die vergrößerte räumliche Ausdehnung des geöffneten Greifers kann Kollisionen während der Ausfahrbewegung verursachen, die durch die zuvor genannte Methode simulativ detektiert werden können.

Analog zum vorherigen Planungsschritt 2.6 werden im Falle von Ressourcen, für die in der lokalen Simulation eine Kollision festgestellt wurde, entsprechende Handlungsempfehlungen abgeleitet. Ausgehend vom Modellzustand, in dem die Kollision detektiert wurde, kann exakt die geometrische Ursache für die Kollision bzw. Überschneidung der Bauteile im zusammengeführten 3D-CAD-Modell bestimmt und dem Nutzer angezeigt werden. Dies erlaubt eine zielgerichtete Anpassung des Produktes bzw. der Ressource. Für den Fall, dass Rekonfigurationen des Montagesystems erlaubt sind, erfolgt eine Suche nach validen alternativen Ressourcen in der Ressourcenbibliothek (vgl. Abschnitt 4.5.2.2). Nach der parametrischen Auswahl der validen Ressourcen werden diese ebenfalls mittels der lokalen Simulation hinsichtlich Kollisionsfreiheit geprüft. Valide alternative Ressourcen dienen als Rekonfigurationsvorschläge.

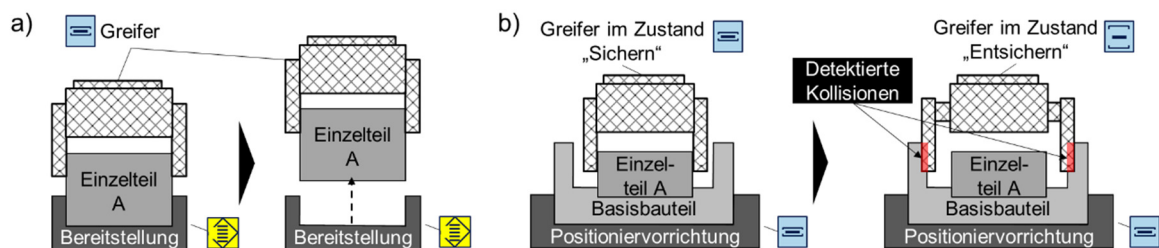


Abbildung 44: a) Bestimmung kollisionsfreier Bahn sowie lokale Simulation der Entnahme eines Einzelteils aus einer Bereitstellung. b) Lokale Simulation des Fügens eines Einzelteils. Während im Zustand „Sichern“ keine Kollision detektiert wird, ergibt sich im dargestellten Beispiel im Zustand „Entsichern“ eine Kollision.

Im Folgenden sollen unterschiedliche Fälle von detektierten Kollisionen zwischen Ressourcen und Baugruppen sowie die daraus ableitbaren Handlungsempfehlungen diskutiert werden.

- Im Falle einer Kollision zwischen einer Baugruppe und einer Ressource kann sowohl die Anpassung des Produktes als auch der Ressource zielführend sein.
- Im Falle einer detektierten Kollision zwischen zwei unterschiedlichen Ressourcen innerhalb eines Tasks muss die Entscheidung gefällt werden, welche der Ressourcen anzupassen bzw. auszutauschen ist.

Die Entscheidung darüber, welches Element angepasst werden soll, ist abhängig von den jeweils anfallenden Aufwänden, die nicht ohne weiteres automatisierbar zu bestimmen sind. Um die Komplexität dieser Entscheidung zu verdeutlichen sollen im Folgenden relevante Einflussfaktoren ohne Anspruch auf Vollständigkeit erwähnt werden:

- Dauer der Beschaffung geeigneter Ressourcen bzw. Verfügbarkeit alternativer Ressourcen am Produktionsstandort
- Aufwände zum Anpassen, Hinzufügen oder zum Tausch der Ressourcen
- nicht veränderbare Aspekte der Produktgestalt, etwa im Fall von Zukaufteilen oder aus funktionalen Gründen unveränderliche Elemente
- Aufwände, die zur Anpassung der Geometrie des Produktes in anderen Produktionsphasen, wie z. B. der Fertigung, notwendig sind

4.5.3.2 Globale Simulation

Zur Absicherung der Erreichbarkeit sowie der Kollisionsfreiheit der geforderten Posen erfolgt eine aufgabenorientierte Programmierung in einer Kinematiksimulation. Diese wird im Folgenden *globale Simulation* genannt (REINHART ET AL. 2017), weil sie neben den lokalen Ressourcen auch weitere an den Montagevorgängen beteiligte Ressourcen sowie die passive Umgebung der Montagelinie, etwa in Form von Hindernissen wie Strukturelementen, Wänden und Säulen, mit berücksichtigt. Das verwendete Umweltmodell entspricht jenem, das zur automatisierten Generierung des Fähigkeitenmodells verwendet wurde (vgl. Abschnitt 4.3.3).

Das zur aufgabenorientierten Programmierung verwendete Aufgabenmodell ist der im vorherigen Schritt generierte vollständige eMVG₄, der eine detaillierte Beschreibung der Relativbewegungen der Baugruppen und lokalen Ressourcen für jeden Arbeitsplan-Task enthält. Dabei müssen die bereits bekannten Bahnen der Bauteile und Ressourcen um die Transferbewegungen zwischen den Tasks erweitert werden, etwa vom Zielzustand einer Baugruppe nach der Entnahme aus der Bereitstellung bis zum Startzustand der Baugruppe zu Beginn eines Fügevorgangs. Dafür werden bestehende Algorithmen zur kollisionsfreien Bahnplanung verwendet. Die aufgabenorientierte Programmierung von Ressourcen in der Montage mittels SFC wurde von einer Vielzahl von Autoren adressiert und wird im Folgenden nicht im Detail erläutert (vgl. z. B. STENMARK & MALEC (2015) und BACKHAUS (2016)).

Die globale Simulation dient der automatischen Bestimmung der Zeiten der durchzuführenden Tasks und bildet so die Grundlage für die nachgelagerte

wirtschaftliche Bewertung. Sind die Bewegungsgeschwindigkeiten der Achsen und Gelenke der Ressourcen sowie die Dauern von Zustandsänderungen der Ressourcen bekannt (etwa durch Systeme vorbestimmter Zeiten wie Methods-Time Measurement MTM nach BOKRANZ & LANDAU (2006)), wird die Dauer jedes Arbeitsplan-Tasks deterministisch bestimmt.

Je nach Zustand des Tasks wird die jeweilige Vorgangsdauer Primärvorgängen oder Sekundärvorgängen zugeordnet. Die jeweilige Dauer der Sekundär-Tasks wird vollständig den Sekundärvorgängen zugeordnet. Im Falle von Primär-Tasks wird die Dauer der Montagebewegung der Baugruppe den Primärvorgängen zugeordnet, während die Dauer der Transfer- und Ausfahrbewegungen sowie des Entsicherns den Sekundärvorgängen zugeordnet wird (vgl. LOTTER 2012), siehe Abb. 45. Die Zeitangaben werden den Arbeitsplan-Tasks hinzugefügt und ergeben so den eMVG₅.

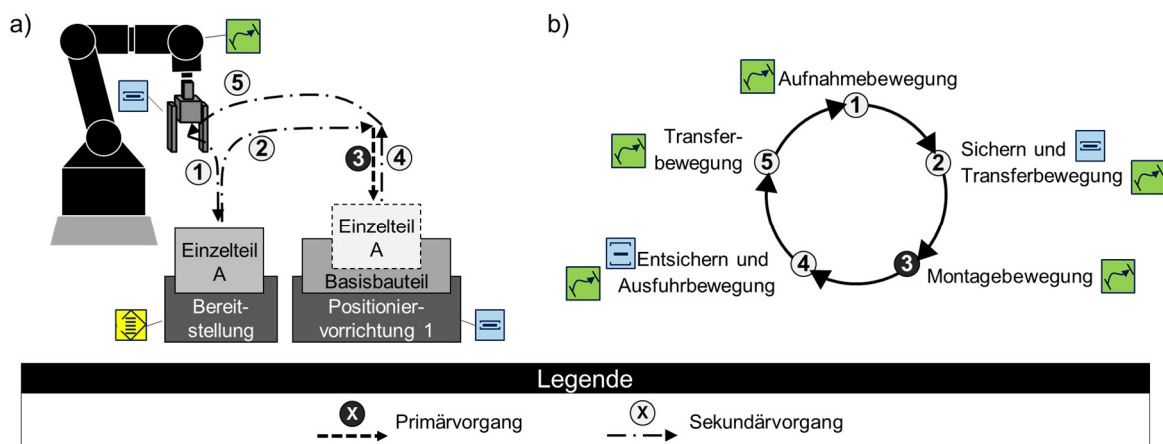


Abbildung 45: Darstellung der Grundbewegungen eines Fügevorgangs in Anlehnung an MTM nach BOKRANZ & LANDAU (2006).

Ist eine Ressource nicht zur Durchführung eines Prozesses geeignet, etwa weil eine erforderliche Pose nicht erreichbar ist oder eine unerwünschte Kollision detektiert wurde, wird der nicht durchführbare Prozess übersprungen und der Endzustand des aktuell simulierten Tasks im Gesamtmodell gesetzt. So können alle Tasks des eMVG₄ in der Kinematiksimulation überprüft werden, selbst wenn einzelne Montagevorgänge nicht durchführbar sind. Für nicht durchführbare Tasks kann keine Vorgangsdauer ermittelt werden.

Die Suche in der Ressourcenbibliothek nach alternativen Ressourcen für Ressourcen, die bei der globalen Simulation als ungeeignet befunden wurden, erfolgt analog zum Schritt 2.6 in Abschnitt 4.5.2.2. Die in Abschnitt 4.5.3.1 definierten Fallunterscheidungen möglicher Kollisionen zwischen Ressourcen und Baugruppen sind ebenfalls für die globale Simulation gültig.

4.5.3.3 Ursachen für die Aufteilung in lokale und globale Simulation

Die in der lokalen Simulation generierten Ausführungspfade der Ressourcen, die mittels des bereits vorgestellten Ansatzes zur Bestimmung kollisionsfreier Pfade erfolgten, bilden einen Teil der notwendigen Aufgabenbeschreibung zur aufgabenorientierten Programmierung. Des Weiteren kann die lokale Simulation ohne die dreidimensionale Modellierung des kompletten Montagesystems durchgeführt werden, da ausschließlich Modelle von Ressourcen benötigt werden, die in direktem Kontakt mit dem Produkt stehend. Dadurch können die Voraussetzungen für die lokale Simulation mit geringeren Aufwänden geschaffen werden. Zudem liegen im Falle von Montagesystemen, die von externen Unternehmen geplant und realisiert wurden, bei dem die Anlage betreibenden Unternehmen oftmals nur die 3D-CAD-Modelle der lokalen Ressourcen vor. Dazu kann die lokale Simulation direkt im CAD-Werkzeug des Konstrukteurs erfolgen, während die globale Simulation die Einbindung eines weiteren Software-Werkzeuges, einer Kinematiksimulation, erfordert. Da die lokalen Ressourcen oft diejenigen mit dem geringsten Rekonfigurationsaufwand sind, kann eine ausschließliche Betrachtung der Vorgänge auf dieser Betrachtungsebene ohne eine globale Simulation zielführend sein. Aufgrund der reduzierten Menge an betrachteten Elementen in der lokalen Simulation erfolgt die Bahnplanung und Kollisionsprüfung schneller, sodass Planungsergebnisse und nicht geeignete Ressourcen früher bekannt sind.

4.5.4 Berücksichtigung von Förderhilfsmitteln

Im Folgenden soll der Umgang der Planungsmethode im Falle der Verwendung von Förderhilfsmitteln wie Werkstückträgern erläutert werden. Diese können keiner Station des Produktionssystems eindeutig zugeordnet werden, da sie zusammen mit dem Produkt von Station zu Station bewegt werden. In der Regel wird das Basisbauteil im Werkstückträger fixiert und die Baugruppe bzw. das Produkt erst nach dessen Fertigstellung aus diesem entnommen. Der Werkstückträger wird von den Positioniervorrichtungen in den Stationen fixiert. Daher wird der Werkstückträger im Planungssystem für die automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung als Teil des Produkt-Modells betrachtet.

Die Prüfung der Eignung eines Werkstückträgers erfolgt im ersten Schritt basierend auf einem qualitativen und quantitativen Abgleich. Anschließend erfolgt analog zum gewohnten Planungsvorgehen eine lokale Simulation, bei der das 3D-CAD-Modell des Produktes um das 3D-CAD-Modell des Werkstückträgers erweitert wird, um Kollisionen zwischen den Elementen zu detektieren. Ist diese Prüfung erfolgreich, wird der Werkstückträger als neues Basisbauteil definiert und die bereits beschriebene Synthesemethode unverändert durchlaufen. Im Falle von

Werkstückträgern, die zusätzlich zur Bereitstellung der zu montierenden Teile dienen, entfällt die Notwendigkeit einer geeigneten Ressource zur Bereitstellung in der Station. Jede Bereitstellung am Werkstückträger entspricht dann einem RG-Knoten mit dem FP „Bereitstellung“, der zusammen mit dem Werkstückträger durch das Produktionssystem bewegt wird.

4.5.5 Wirtschaftliche Bewertung der Arbeitspläne

Zur wirtschaftlichen Bewertung der generierten Arbeitspläne werden die Taktzeitbestimmung, die Primär-Sekundär-Analyse sowie eine Maschinenstundensatz-Rechnung verwendet und im Folgenden vorgestellt. Die Integration der verbreiteten Methoden zur wirtschaftlichen Bewertung von Produktionsvorgängen mit dem Planungssystem dient dazu, alternative Arbeitspläne auf einfache Weise miteinander zu vergleichen. Außerdem wird damit eine verständliche Zusammenfassung der Planungsergebnisse sichergestellt. Die Generierung der Bewertungsergebnisse erfolgt dabei automatisiert, ausgehend von den vorliegenden Planungsdaten in Form des eMVG₅.

4.5.5.1 Taktzeitbestimmung

Voraussetzung für die Bestimmung der Taktzeit ist die Ermittlung der Dauer der Vorgänge an jeder Station des Produktionssystems. Daher wird für jede Station die Summe jeder einzelnen Dauer der nacheinander an der Station durchzuführenden Primär- und Sekundär-Tasks gebildet. Im Falle von parallel durchführbaren Tasks an einer Station wird nur der längere der Tasks berücksichtigt, da nur dieser Einfluss auf den Takt hat. Beispielhaft seien der Transport eines Basisbauteils von der vorherigen Station sowie die Zuführung der zu fügenden Baugruppe an einer Station genannt, die parallel ablaufen.

Die Dauern von Transportvorgängen zwischen Stationen werden vollständig der zu erreichenden Station zugeordnet, da diese im Falle einer getakteten Fließmontage erst nach dem Abschluss des Transportvorgangs den Primärvorgang durchführen kann. Parallel zu dem Transport kann die Station nur andere Sekundär-Tasks durchführen. Im Falle der Verwendung von Puffern zwischen den Stationen würde eine ausschließliche Betrachtung der Dauer des Transports der Baugruppe vom Puffer zur Positioniervorrichtung zur Bestimmung der Taktzeit einer Station genügen.

Bei der Bestimmung der Taktzeit eines Montagesystems werden je nach Art der Restriktion des Materialflusses (vgl. Restriktion 1 in Abschnitt 4.5.2.1) zwei Ansätze voneinander unterschieden. Bei einem unidirektionalen Materialfluss wird analog zur getakteten Fließmontage die Station mit der längsten Vorgangsdauer als taktgebend

angenommen. Im Falle des bidirektionalen Materialflusses wird angenommen, dass nur ein Produkt zur gleichen Zeit das Montagesystem durchläuft, um die gleichzeitige Zuordnung von Produkt-Instanzen zu denselben Stationen beim Durchfahren entgegen der Haupt-Materialflussrichtung zu vermeiden. Die Taktzeit des Montagesystems entspricht folglich der Gesamtdauer der Montage.

4.5.5.2 Primär-Sekundär-Analyse

Die Primär-Sekundär-Analyse nach (LOTTER 2012) dient zur Ermittlung der Effizienz eines Montagesystems. Der wirtschaftliche Wirkungsgrad W_M wird aus dem Verhältnis der Zeitdauern aller Primärvorgänge PV und der Summe der Zeitdauern der Primär- und Sekundärvorgänge SV bestimmt. Ausgehend von der Station mit dem längsten Takt ergibt sich an allen übrigen Stationen ein Taktzeitverlust, der ebenfalls als Zeitdauer von Sekundärvorgängen SV gewertet wird. Die Primär-Sekundär-Analyse kann ausgehend von den zuvor bestimmten Dauern der Primär- und Sekundärvorgänge aller Tasks eines eMVG₅ automatisiert erfolgen und zur Bewertung des eMVG₅ verwendet werden.

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

4.5.5.3 Maschinenstundensatzrechnung mit Personalkosten

Der Maschinenstundensatz beschreibt die Kosten eines Produktionssystems oder einer Ressource in Bezug auf ihre Laufzeit. Ausgehend von den individuellen monetären Eigenschaften jeder Ressource im betrachteten Montagesystem können durch die Vorgabe der betrieblichen Nutzungsdauer der Anlage für jede Ressource die Betriebskosten pro Stunde ermittelt werden (LOTTER 2012, HERING 2014). Im Nachfolgenden wird ein Ansatz vorgestellt, der die Verwendung des generierten PPR-Datenmodells zur Kostenabschätzung mittels Maschinenstundensatzrechnung unter Berücksichtigung der Restriktionen vorstellt.

Die Montagekosten pro Produkt ergeben sich aus der Summe aller Betriebskosten sowie der Lohnkosten pro Produkt. Die Betriebskosten pro Produkt ergeben sich aus der Multiplikation des Maschinenstundensatzes der Ressource mit der Nutzungsdauer der Ressource pro Produkt. Diese entspricht dem zuvor ermittelten, materiaflussabhängigen Takt des Montagesystems. Folglich wird bei der Berechnung eine maximale Auslastung des Produktionssystems angenommen.

Zur Ermittlung der Lohnkosten werden zwei Planungsfälle differenziert – der unidirektionale und bidirektionale Materialfluss (siehe Restriktion 1 in Abschnitt

4.5.2.1). Die zum Betrieb der unterschiedlichen manuellen Station notwendigen Personalkosten pro Zeiteinheit werden als bekannt angenommen.

Im Falle vom unidirektionalen Materialfluss wird eine Person an jeder manuellen Station angenommen. Die Lohnkosten pro Produkt entsprechen folglich den Personalkosten pro Zeiteinheit multipliziert mit dem Takt und der Anzahl der manuellen Stationen (HERING 2014). Bei einem bidirektionalen Materialfluss, bei dem die Montage nur einer Produkt-Instanz in der Anlage zur selben Zeit erfolgt, wird angenommen, dass die Durchführung der Montagevorgänge durch eine Person erfolgt, die sich zusammen mit dem Produkt durch das Produktionssystem bewegt. Die Dauer der manuellen Arbeit entspricht somit der Durchlaufzeit des Produktes. Ergebnis der Maschinenstundensatzrechnung unter Einbezug der Personalkosten sind die Montagekosten pro Produkt für einen validen Arbeitsplan im eMVG₅.

4.6 Zusammenfassung

Nach einem Überblick über das entwickelte System zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung wurde in Kapitel 4 zunächst das zugrundeliegende Informationsmodell beschrieben. Es wurden zwei Betrachtungsebenen von Skills eingeführt: Funktionsprimitiva, die zur Beschreibung von elementaren Teilvorgängen dienen, und Tasks, die sich aus wiederkehrenden Sequenzen von Funktionsprimitiva zusammensetzen. Unterschiedliche Instanzen von Tasks und Funktionsprimitiva wurden eingeführt, die zur Beschreibung von Produkthanforderungen, Ressourcenfähigkeiten, Planungsalternativen und Arbeitsplänen dienen.

Abschnitt 4.3 beschreibt das Fähigkeitenmodell von Montagesystemen auf den unterschiedlichen Betrachtungsebenen. Die Bestandteile des digitalen Ressourcen-Modells wurden definiert. Des Weiteren wurden die beiden miteinander verknüpften graphenbasierten Modelle Station-Graph (SG) und Resource-Graph (RG) eingeführt, die gemeinsam das Fähigkeitenmodell bilden. Der RG modelliert die Fähigkeiten und möglichen Materialflüsse auf Ebene von Ressourcen, der SG hingegen auf Ebene von Stationen. Die automatisierte Analyseverfahren generiert das Fähigkeitenmodell aus dem Umweltmodell des Montagesystems.

In Abschnitt 4.4 wurde zur Beschreibung des Aufgabenmodells des Produktes der Ansatz des Vorranggraphen gewählt und mit den eingeführten Tasks und Funktionsprimitiva verknüpft. Das Aufgabenmodell wurde erweiterter Montagevorranggraph (eMVG) genannt. Es wurde eine Analyseverfahren nach dem Ansatz des Assembly Sequence Planning zur teilautomatisierten Generierung und Parametrierung des eMVG, ausgehend vom 3D-CAD-Modell des zu montierenden

Produktes, vorgestellt. Unterschiedliche Ansätze zur teilautomatischen Strukturierung des Produktmodells vor dem ASP sowie zur Strukturierung des eMVG wurden eingeführt.

Abschnitt 4.5 stellt die Methode zur automatischen Synthese des Aufgabenmodells des Produktes in Form des eMVG mit dem Fähigkeitenmodell des Produktionssystems, abgebildet als SG und RG, vor. Das Planungssystem ordnet im Sinne einer Austaktung die geforderten Montagevorgänge geeigneten Ressourcen und Stationen zu, indem es die vom Produkt geforderten und die vom Montagesystem durchführbaren Funktionsprimitiva abgleicht. Die Arbeitspläne werden durch eine aufgabenorientierte Programmierung in einer Kinematiksimulation abgesichert und hinsichtlich wirtschaftlicher Kriterien bewertet. Ergebnis der Synthese sind valide Arbeitspläne oder Handlungsempfehlungen bezüglich etwaiger Anpassungen, die am Produkt oder am Montagesystem vorgenommen werden müssen. Primäre und sekundäre Montagevorgänge werden abgebildet. Manuell vom Nutzer festzulegende Restriktionen erlauben eine Anpassung der automatischen Synthese an unterschiedliche Rahmenbedingungen. Das mehrstufige Vorgehen berücksichtigt die Veränderungsfähigkeit in der Montage. Die Arbeitspläne dienen der nachgelagerten Arbeitssteuerung als Planungsgrundlage für die Auftragsabwicklung. Tabelle 2 fasst die unterschiedlichen Stufen der eMVG zusammen. Das Informationsmodell sowie die vorgestellten Methoden bilden die Grundlage für die Umsetzung und Erprobung.

Tabelle 2: Zusammenfassung der eMVG-Arten.

eMVG-Stufe	Kurzbeschreibung
eMVG ₀	eMVG-Knoten sind ausschließlich Primär-Anforderungs-Tasks.
eMVG ₁	eMVG-Knoten werden zur Abbildung zwingender Sekundär-Anforderungs-Tasks hinzugefügt.
eMVG ₂	eMVG-Knoten sind Alternativen-Tasks. Der eMVG ist nun montagesystemspezifisch.
eMVG ₃	Durch die Austaktung wird jeder Task eindeutig Stationen und Ressourcen zugewiesen. Die eMVG-Knoten sind Arbeitsplan-Tasks.
eMVG ₄	Informationen aus der lokalen Simulation werden zu den Arbeitsplan-Tasks hinzugefügt.
eMVG ₅	Informationen aus der globalen Simulation sowie die Ergebnisse der wirtschaftlichen Bewertung werden zu den Arbeitsplan-Tasks hinzugefügt. Der eMVG entspricht nun einem Arbeitsplan.

5 Umsetzung und Erprobung

Abschnitt 5.1 zeigt die softwaretechnische Umsetzung des Systems zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung. In Abschnitt 5.2 erfolgt die Erprobung der Umsetzung in Referenzszenarien zur Bewertung der Erfüllung der formulierten Anforderungen und Handlungsbedarfe (vgl. Abschnitte 2.10 und 3.4).

5.1 Softwaretechnische Umsetzung

5.1.1 Implementierung des Planungssystems

Die Umsetzung erfolgte unter Einbindung bestehender industrieller Software-Werkzeuge aus den Bereichen Konstruktion und Kinematiksimulation. Die entwickelten Methoden zur Analyse des 3D-CAD-Modells des Produktes, zur Analyse der Fähigkeiten von Montagesystemen sowie zur automatischen Synthese des Aufgabenmodells mit dem Fähigkeitenmodell im Sinne der Arbeitsplanung wurden in der Programmiersprache *C#* als Subsysteme des Planungssystems umgesetzt. Zur Erstellung sämtlicher Bedienoberflächen und Ausgabefenster wurde *Windows Forms* verwendet. Dabei handelt es sich um eine Programmbibliothek für graphische Bedienoberflächen.

Zur Speicherung und Verwaltung der Datenmodelle (alle Arten des eMVG, die Ressourcenbibliothek, der Station-Graph, der Resource-Graph), die zwischen den Subsystemen ausgetauscht werden, wurde durchgängig das XML-Format verwendet. Die Strukturierung der XML-Dateien entspricht den vorgestellten Informationsmodellen. Die verwendeten 3D-CAD-Modelle von Produkten und Ressourcen entsprechen alle dem Jupiter Tessellation Standard (JT), vgl. Abschnitt 2.7.3.

Der Programmablauf des Planungssystems ist in Abb. 46 in einem vereinfachten Sequenzdiagramm dargestellt, das die umgesetzten Methoden als Subsysteme zusammenfasst. Der Informationsaustausch zwischen den Subsystemen und den Benutzeroberflächen im Falle der Anwendung aller Methoden des Planungssystems wird visualisiert. Die Subsysteme sind in die Bedienoberflächen sowie in die Analyse- und Synthesemethoden untergliedert.

Zur Umsetzung des Assembly Sequence Planning sowie der lokalen Simulation wurde das Software-Werkzeug *Teamcenter Visualization Mockup 11.1.2 (TCV)* verwendet, das bei der manuellen Montage- und Arbeitsplanung Anwendung findet. Die globale Simulation erfolgt mittels der Kinematiksimulation *Tecnomatix Process Simulate 11.1 (PS)*. Beide Software-Werkzeuge stammen von der Firma Siemens. Die Software-Werkzeuge werden über ihre Schnittstellen zur *Anwendungs-*

programmierung (engl.: *application programming interface, API*) angesprochen. Es wurden funktionsorientierte APIs verwendet, sodass die entwickelte Methodik die bestehenden Funktionen der Software-Werkzeuge verwendet. Die API-Funktionen werden dabei zum Öffnen, Auslesen und zur Manipulation von Modellen genutzt. Die APIs sind als dynamische Bibliotheken (engl.: *dynamic link libraries, DLL*) eingebunden, sodass ein standardisierter Zugriff auf sie erfolgen kann. Dies vereinfacht den Umgang mit Software-Updates sowie die Übertragung der Analyse- und Synthesemethoden auf alternative Softwarewerkzeuge mit vergleichbaren Funktionen. Beispielhafte relevante API-Funktionen zum Auslesen von Modellinformationen, die im Falle von TCV genutzt wurden, sind das Auslesen der Bauteilnamen eines Einzelteil-Modells oder der detektierten Kollisionen und Überschneidungen zwischen den Einzelteilen. API-Funktionen zur Manipulation des Modells werden zum Hinzufügen, Entfernen und Verschieben von 3D-Modellen von Baugruppen und Ressourcen verwendet.

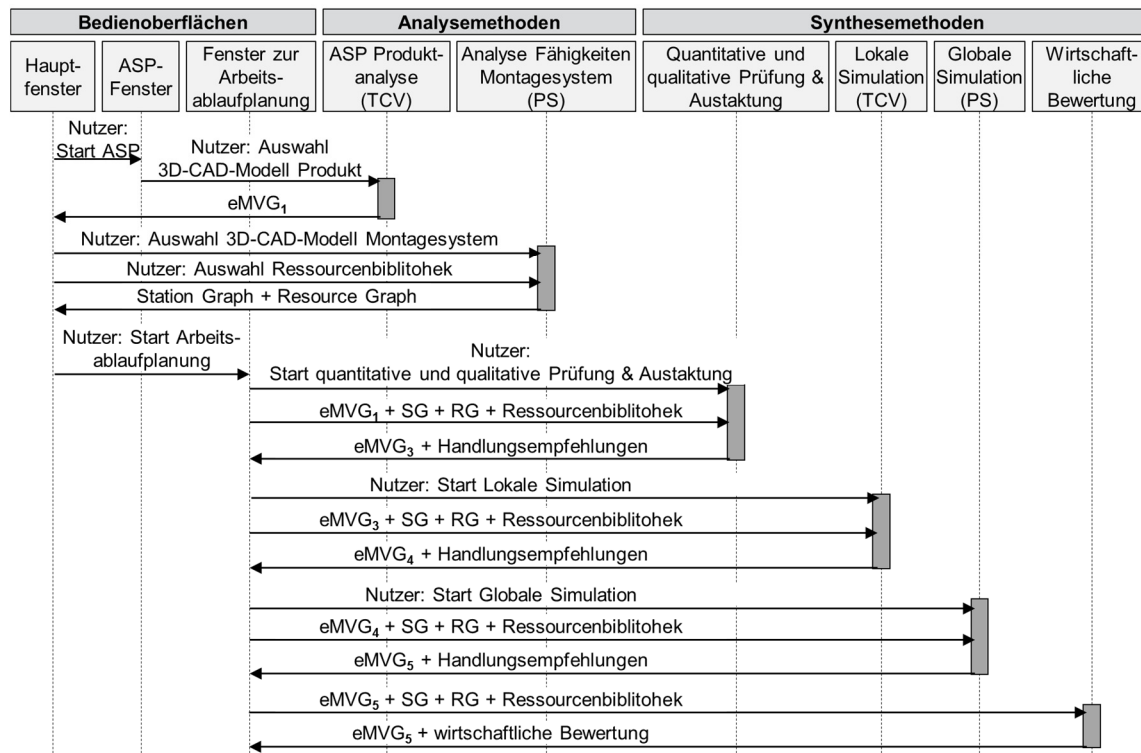


Abbildung 46: Vereinfachtes Sequenzdiagramm des Planungssystems.

Die API-Funktionalitäten von PS zum Auslesen von Modellinformationen werden zur Bestimmung der Namen und Positionen der Modelle der Ressourcen im 3D-Mehrkörpermodell genutzt und erlauben die automatisierte Generierung des Fähigkeitenmodells. Process Simulate bietet eine umfangreiche API zur Manipulation des 3D-Mehrkörpermodells an. Dabei können etwa Bahnen von Robotern anhand von Zielposen geplant und Zustände von Ressourcen mit diskreten

Zuständen, wie z. B. Greifer, umgeschaltet werden. Diese werden zur aufgabenorientierten Programmierung der Ressourcen in der Mehrkörpersimulation anhand der Informationen aus dem eMVG₄ verwendet. Nach Durchführung einer Kinematiksimulation erlaubt die API auch die Ausgabe von Simulationsergebnissen wie der Dauer einzelner Vorgänge, die in den eMVG₅ einfließen, sowie der detektierten Kollisionen zwischen Elementen des Modells.

Auf eine Integration von Mensch-Modellen in die Simulation wurde verzichtet. Eine simulative Prüfung der Greif- und Handhabungsvorgänge in PS ist möglich, wurde allerdings nicht realisiert.

5.1.2 Benutzeroberflächen

Die Softwareumsetzung des Planungssystems besitzt drei grafische Benutzeroberflächen, die im Folgenden vorgestellt werden. Im Anhang befinden sich detaillierte Darstellungen der Benutzeroberflächen in unterschiedlichen Schritten während der Anwendung des Planungssystems (vgl. Abschnitt 9.1 - Visualisierungen der Bedienoberflächen des Planungssystems).

5.1.2.1 Hauptfenster

Das Hauptfenster (vgl. Abb. 47) visualisiert die Daten aus der Produkt-Domäne und aus der Ressourcen-Domäne, deren Synthese bei der Arbeitsablaufplanung erfolgen soll. Die Analyse-Funktionen des ASP sowie der Generierung des Fähigkeitsmodells des Montagesystems und die Synthese-Funktion der automatischen Arbeitsplanung werden im Hauptfenster manuell gestartet.

Im linken Teil des Hauptfensters ermöglicht die Produkt-Domäne, das 3D-CAD-Modell eines Produktes auszuwählen, um die Analyse mittels Assembly Sequence Planning durchzuführen (1). Zur manuellen Strukturierung des Produktes im Rahmen des ASP wird das ASP-Fenster verwendet, siehe Abschnitt 5.1.2.2.

Der mittels ASP generierte eMVG₂ wird als Liste der sequentiell durchzuführenden Primär-Anforderungs-Tasks dargestellt (2). Die beiden Startbaugruppen sowie die Endbaugruppe jedes Tasks werden bildlich dargestellt, indem Abbildungen des 3D-CAD-Modells des Produktes während der virtuellen Demontage im entsprechenden Montagezustand automatisiert erstellt werden. Die Parameterwerte der Tasks werden ebenfalls im Hauptfenster manuell vervollständigt (3).

Bezüglich der Ressourcen-Domäne bietet das Hauptfenster auf Ressourcen- und Stationsebene verschiedene Funktionalitäten. Es erlaubt den Import der Ressourcenbibliothek (4). Diese enthält die digitalen Ressourcenmodelle aller

Ressourcen, die bei der Planung berücksichtigt werden sollen. Sie werden im Hauptfenster der Ressourcenbibliothek dargestellt und können hinzugefügt, parametrisiert oder entfernt werden (5). Die Generierung und Visualisierung des Fähigkeitenmodells des Produktionssystems in Form des Station-Graph erfolgt ebenfalls im Hauptfenster. Dafür muss im Hauptfenster das 3D-Modell eines Montagesystems ausgewählt werden (6). Die analog zur Methode aus Abschnitt 4.3.3 erkannten Stationen sowie die dazugehörigen Ressourcen werden in einer Tabelle dargestellt (7). Das Hauptfenster ermöglicht die Vorgabe der Personalkosten pro Zeiteinheit für manuelle Stationen.

Liegen alle erwähnten Eingangsdaten vor, kann die automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung gestartet werden (8), deren Ergebnisse in einem separaten Fenster gezeigt werden, siehe Abschnitt 5.1.2.3.

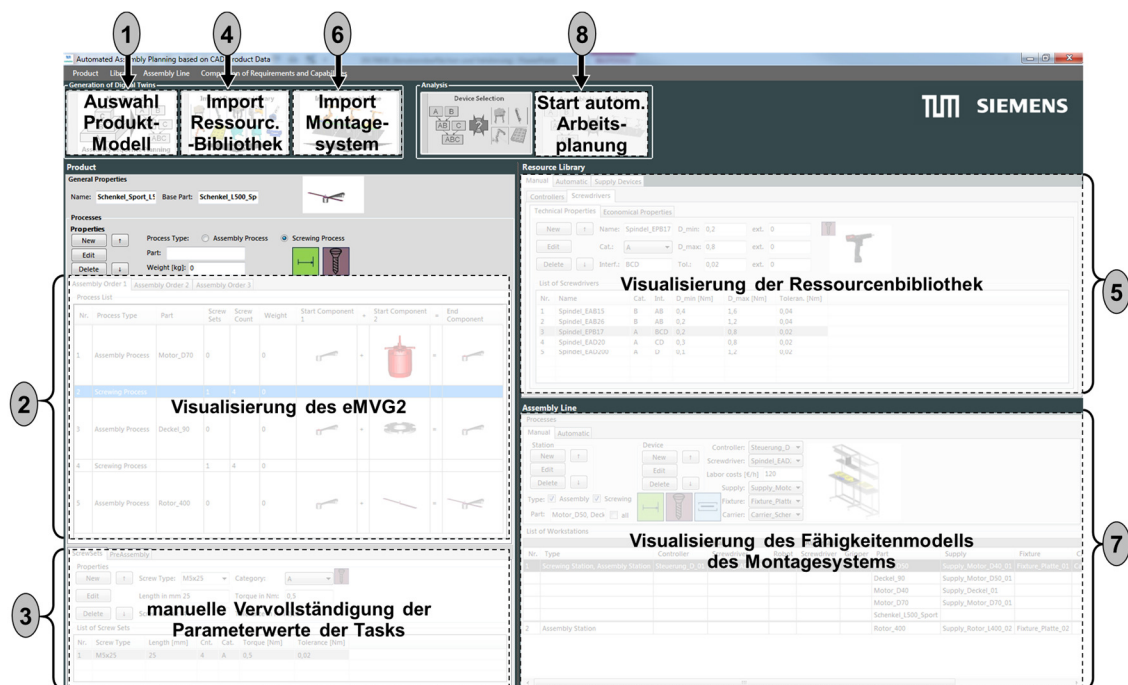


Abbildung 47: Hauptfenster der Softwareumsetzung des Planungssystems mit hervorgehobenen Schaltflächen und Visualisierungsbereichen.

5.1.2.2 Assembly Sequence Planning

Nach Auswahl des zu analysierenden Produkt-Modells wird das Programm Teamcenter Visualization sowie das ASP-Fenster geöffnet. Das ASP-Fenster ermöglicht die manuelle initiale Strukturierung des Produktes durch den Nutzer, analog zu den Methoden aus Abschnitt 4.4.3. Das ASP-Fenster ermöglicht die Festlegung des Basisbauteils, der Hauptmontagerichtung, der Orientierung der Ebene für die Ebenenabstandsmessung sowie die manuelle Priorisierung der Baugruppen

für die Demontage. Die Definition von Vormontagen erfolgt durch die Auswahl eines Vormontage-Basisbauteils und die Zuordnung weiterer Einzelteile. Es können automatisiert unterschiedliche Montagereihenfolgen generiert werden. Die Auswahl der unterschiedlichen Einzelteile und Baugruppen kann sowohl im Strukturbaum des Produktes als auch direkt durch Anklicken der Modelle in der 3D-Ansicht von Teamcenter Visualization erfolgen. Nach erfolgreicher, automatischer Analyse des Produktes erfolgt die Visualisierung des eMVG₂ im Hauptfenster.

5.1.2.3 Automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung

Das Fenster zur Arbeitsplanung dient der Visualisierung der phasenabhängigen Planungsergebnisse der Arbeitsplanung. Es visualisiert die Arbeitspläne in Form des eMVG₃, des eMVG₄ und des eMVG₅ für die unterschiedlichen Montagereihenfolgen und Restriktionen. Des Weiteren stellt es Handlungsempfehlungen für die unterschiedlichen Rollen sowie die Ergebnisse der wirtschaftlichen Bewertung der Arbeitspläne dar. Die Ausführung der sequentiell ablaufenden automatischen Planungsschritte qualitativer und quantitativer Abgleich, Austaktung sowie lokale und globale Simulation erfolgen in dem Fenster manuell durch den Nutzer.

5.2 Anwendung in Referenzszenarien

Im Folgenden soll durch die Anwendung des umgesetzten Planungssystems in Referenzszenarien geprüft werden, ob die formulierten Anforderungen erreicht wurden. Das System wurde vielfach an unterschiedlichen Produkten und Montagesystemen erprobt. Die erfolgreiche Anwendung des Planungssystems zur automatischen Arbeitsplanung mitsamt aufgabenorientierter Programmierung realer Roboterzellen am Beispiel der Montage von Lego-Steinen wurde bereits veröffentlicht (MICHNIEWICZ & REINHART 2015).

Im Folgenden soll als Beispielprodukt ein Multicopter verwendet werden, dessen 3D-CAD-Modell im JT-Format vorliegt. Das Produkt mitsamt seinen Einzelteilen ist in Abb. 48 dargestellt. Die Montage des Multicopters erfolgt, indem die vier Antriebseinheiten sowie der Hauptkörper vormontiert und anschließend alle Vormontagen in der Endmontage zum Endprodukt montiert werden. Die 3D-CAD-Modelle der Montagelinien für die Vormontagen sowie für die Endmontage und eine Ressourcenbibliothek werden als gegeben angenommen. Alle Ressourcen sind entsprechend den Vorgaben des digitalen Ressourcenmodells (vgl. Abschnitt 4.3.1) vollständig beschrieben.

Referenzszenario 1 betrachtet die Arbeitsplanung für die Montage der Antriebseinheit und fokussiert die Generierung von Handlungsempfehlungen für die unterschiedlichen Rollen. In Referenzszenario 2 wird die Planung der Montage des Hauptkörpers auf zwei unterschiedlichen Linien adressiert. Der Fokus liegt auf der Generierung unterschiedlicher Montagereihenfolgen sowie auf dem Einfluss der Montagereihenfolgen auf die Wirtschaftlichkeit des Arbeitsplans. Abbildungen der Visualisierung der Planungsergebnisse in unterschiedlichen Planungsschritten in der Software-Umsetzung befinden sich im Anhang, vgl. Abschnitt 9.1.

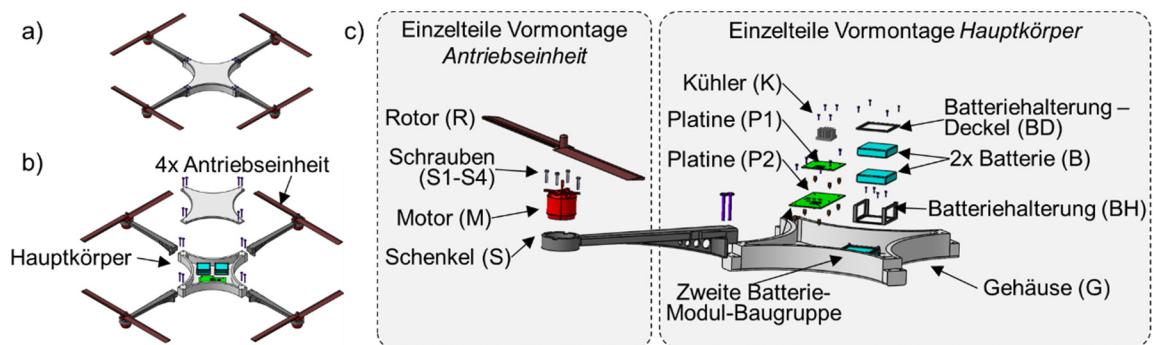


Abbildung 48: Unterschiedliche Ansichten des Multicopters. a) Vollständig montierter Multicopter. b) Darstellung der Vormontagen. c) Zuordnung der Einzelteile zu den Vormontagen.

5.2.1 Referenzszenario 1 - „Einführung einer neuen Produktvariante“

5.2.1.1 Ausgangssituation

Eine neue Variante der Antriebseinheit soll auf einem bestehenden Montagesystem montiert werden. Die neue Variante des Schenkels besitzt zusätzliche Einzelteile. Des Weiteren weist der Schenkel eine veränderte Geometrie auf, vgl. Abb. 49. Die Durchführbarkeit der Montage der neuen Variante soll geprüft und notwendige Anpassungen des Produktes bzw. des Produktionssystems sollen ermittelt werden. Des Weiteren soll die Wirtschaftlichkeit der Montage bewertet werden.

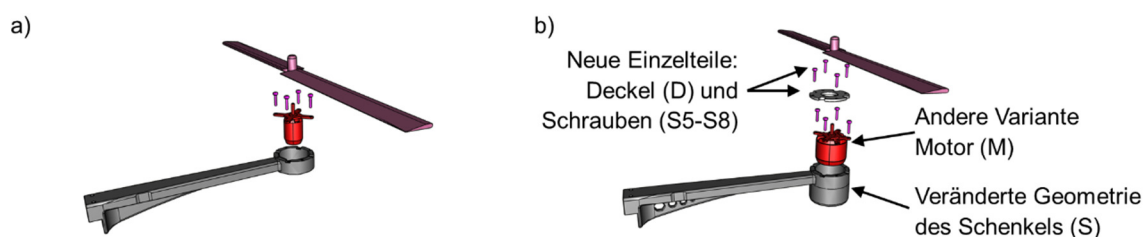


Abbildung 49: a) Bisheriges Modell der Antriebseinheit. b) Neue Variante mit neuen und geometrisch veränderten Einzelteilen.

5.2.1.2 Generierung des Fähigkeitenmodells des Montagesystems

Das automatische Montagesystem, das hinsichtlich seiner Eignung zur Montage der neuen Antriebseinheit geprüft werden soll, ist in Abb. 24 auf Seite 100 dargestellt. Es besteht aus 3 Stationen, die mit einem Förderband verbunden sind. Zum Transport des Produktes wird ein Werkstückträger verwendet. Die drei Stationen wurden detektiert und die ihnen zugehörigen Ressourcen eindeutig zugeordnet. Das Fähigkeitenmodell wird korrekt im Hauptfenster visualisiert.

5.2.1.3 Generierung des Aufgabenmodells des Produktes

Abgesehen von zwei Schraub-Clustern mit jeweils 4 Schraubvorgängen, deren Montagereihenfolge beliebig ist, existiert für das Produkt nur eine valide Montagereihenfolge. Die Methode zur Produktanalyse wurde in TCV mit unterschiedlichen initialen Strukturierungen des Produktes wiederholt. Das Ergebnis der Analyse des CAD-Modells der neuen Variante der Antriebseinheit ist in Abb. 50 in Form des eMVG₁ dargestellt. Die neuen Bauteile werden erkannt und die Schrauben erfolgreich in zwei Schraub-Clustern zusammengefasst.

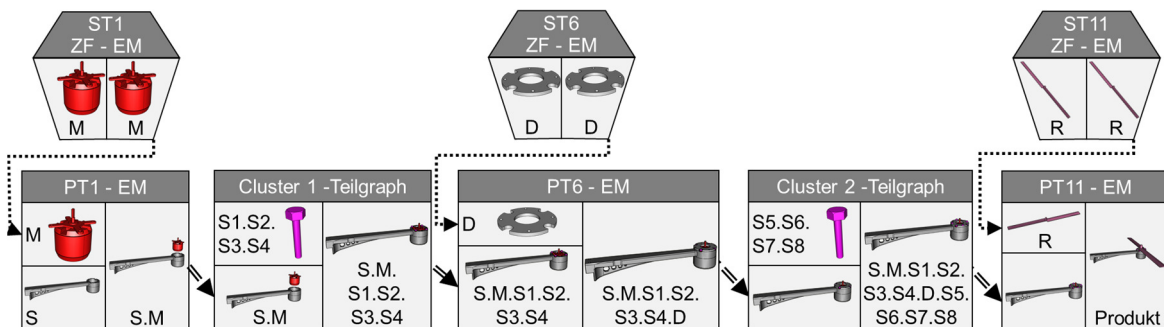


Abbildung 50: eMVG₁ der neuen Variante der Antriebseinheit. Die zwingend vorgelagerten Sekundär-Tasks zur „Zuführung“ (ZF) vor den „Primär-Tasks“ (PT) wurden automatisiert zum Aufgabenmodell hinzugefügt. Die beiden Schraub-Cluster sind in Cluster-Teilgraphen zusammengefasst, die automatisiert gebildet wurden.

Die automatisierte Generierung des eMVG₁ wurde mit unterschiedlichen, manuell vorgegebenen initialen Strukturierungen des Produktes wiederholt (vgl. Abschnitt 4.4.4.1). Sie lieferte stets dasselbe, einzig korrekte Ergebnis. Folglich kann die Funktionsfähigkeit der automatisierten Sortier-Algorithmen sowie der automatisierten Cluster-Bildung beim ASP für das Referenzszenario 1 als erfüllt angenommen werden. Die Parameterwerte der Anforderungs-Tasks wurden automatisiert aus den PMI des JT-Modells des Produktes übernommen, sodass keine manuelle Vervollständigung nötig ist.

5.2.1.4 Anwendung der automatischen Arbeitsplanung

Die Arbeitsplanung erfolgt unter Berücksichtigung der eingeführten Restriktionen. Für das Referenzszenario 1 soll der Materialfluss unidirektional erfolgen und Rekonfigurationen des Produktionssystems möglich sein. Bei der Anwendung der Synthesemethode erfolgte die Durchführung des qualitativ-quantitativen Abgleichs sowie der lokalen Simulation. Folgende Ergebnisse wurden automatisiert generiert. Für den Anforderungs-Task zum „Bereitstellen“ und „Zusammensetzen“ des Motors wird Station 1 ausgewählt, da bis auf eine geeignete Ressource zur „Bereitstellung“ des neuen Motor-Typs alle Anforderungs-FP erfüllt sind. Da eine geeignete Ressource in der Ressourcenbibliothek bekannt ist, wird ein Rekonfigurationsvorschlag für Station 1 erstellt. Bei der lokalen Simulation werden die unterschiedlichen validen Konfigurationen von RG-Knoten 2 geprüft. Während beim in Abb. 51 a) dargestellten Greifer A weder im Endzustand noch auf der Ausfahrbahn Kollisionen detektiert wurden, wird beim Greifer B in Abb. 51 b) im entsicherten Zustand eine Kollision mit dem Schenkel detektiert. Greifer B wird folglich aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Aufgrund der veränderten Geometrie des Schenkels wird eine Kollision mit dem Werkstückträger erkannt, Abb. 51 a).

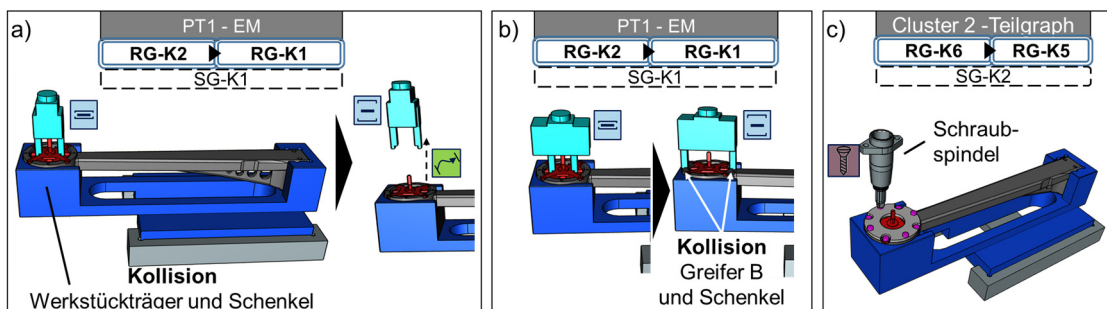


Abbildung 51: lokale Simulation der Primär-Tasks im Montagesystem aus Abb. 24.

Die neu hinzugefügten Verschraubungen des Deckels, zusammengefasst als *Cluster 2 – Teilgraph*, werden Station 2 zugewiesen, da diese beim qualitativ-quantitativen Abgleich alle geforderten Relationen der Parameterwerte eingehalten haben und bei der lokalen Simulation keine Kollisionen detektiert wurden (Abb. 51 c)).

Beim neuen Einzelteil „Deckel“ sind in der Ausgangssituation keine Ressourcen mit geeigneten FFP „Sichern“ und „Bereitstellen“ bekannt. Das Ergebnis wird angezeigt und dient als Hinweis auf zu entwickelnde bzw. zu beschaffende Ressourcen. Bei der Entwicklung oder Beschaffung der Ressourcen mit den geforderten Funktionsprimitiva durch die Betriebsmittelplanung können vorliegende Informationen, wie die Eigenschaften des Bauteils und die relevanten Montagezustände, berücksichtigt werden. Die detektierte Kollision zwischen dem

Schenkel und dem Werkstückträger kann sowohl als Handlungsempfehlung für die Produktentwicklung zur manuellen Anpassung des Schenkels als auch für die Betriebsmittelplanung zur manuellen Anpassung des Werkstückträgers dienen.

Das Ergebnis der automatischen Planung für das Montagesystem aus Abb. 24 ist in Abb. 52 als eMVG₂ dargestellt. Die Bewertung der Eignung aller Stationen für alle Anforderungs-Tasks des Aufgabenmodells und die resultierenden, automatisiert ermittelten Handlungsempfehlungen sind dargestellt. Die globale Simulation kann nicht erfolgen, da nicht für alle durchzuführenden Tasks geeignete Ressourcen im Montagesystem verfügbar sind. Daher kann auch keine wirtschaftliche Bewertung erfolgen, da die Taktzeit der Anlage nicht bestimmt werden kann.

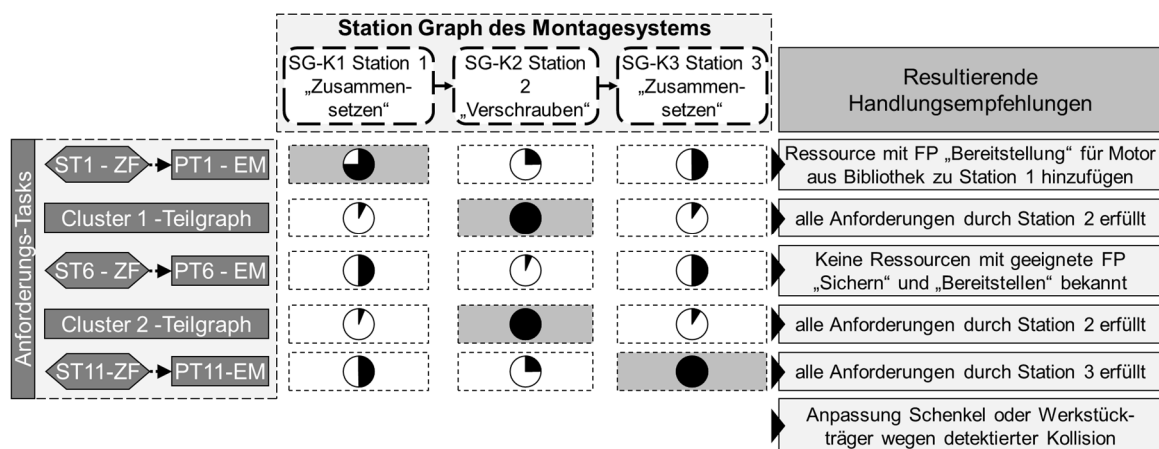


Abbildung 52: eMVG₂ für die neue Antriebseinheit und das Montagesystem aus Abb. 24. Während Schraubvorgänge (Cluster 1 und 2) Station 2 zugeordnet sind, sind für das neue Bauteil „Deckel“ keine Ressourcen mit geeigneten FFP „Sichern“ und „Bereitstellen“ bekannt.

5.2.1.5 Anpassung des Montagesystems und wiederholte Anwendung des Planungssystems

Bei der ersten Anwendung des Planungssystems im Referenzszenario 1 wurde das bestehende Montagesystem als ungeeignet für die Montage der neuen Produktvariante befunden. Es wurden mehrere Handlungsempfehlungen generiert. Vor der wiederholten Anwendung des Planungssystems erfolgte eine manuelle Anpassung des Montagesystems und eine Erweiterung der Ressourcenbibliothek um neue Ressourcen. Das Montagesystem wurde um zwei zusätzliche Stationen (SG-K 3 und 4) ergänzt, vgl. Abb. 53. Die Montage des Rotors erfolgt nun in Station 5. Des Weiteren wurde die Ressourcenbibliothek zur „Sicherung“ und „Bereitstellung“ des Deckels um geeignete Ressourcen erweitert. Diese wurden im 3D-Modell des neuen Montagesystems der Station 3 hinzugefügt. Der Werkstückträger wurde von einem Betriebsmittelplaner manuell geometrisch angepasst.

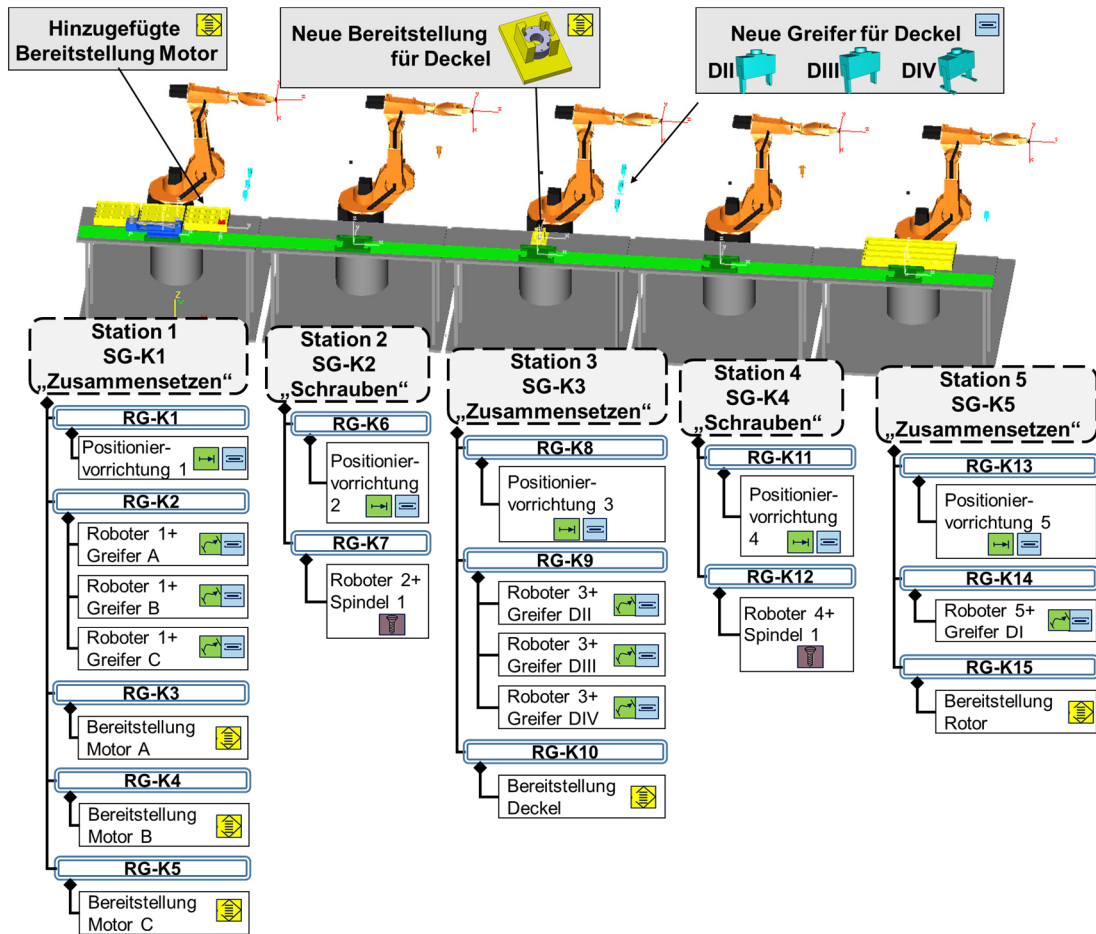


Abbildung 53: Aktualisiertes Montagesystem.

Bei der erneuten Anwendung des Planungssystems werden die neuen Ressourcen automatisiert im Fähigkeitenmodell abgebildet und im weiteren automatischen Planungsverlauf berücksichtigt. Abb. 54 a) stellt die lokale Simulation der neuen Bereitstellung des Motors in Station 1 dar. Abb. 54 b) zeigt die detektierte Kollision zwischen Greifer DIV und der Bereitstellung in Station 3, sodass in der globalen Simulation die anderen Greifer, die in Station 3 verfügbaren sind, verwendet werden. Eine Kollision zwischen dem Schenkel und dem neuen Werkstückträger erfolgt nicht. Die aufgabenorientierte Programmierung des Umweltmodells in Process Simulate erfolgt fehlerfrei und ermittelt automatisch die Dauer der Tasks.

Das Ergebnis der erneuten Anwendung des Planungssystems ist der vollständige Arbeitsplan in Form des eMVG₅, der in Abb. 55 dargestellt ist. Alle Anforderungs-Tasks konnten automatisch Ressourcen und Stationen zugewiesen werden. Sekundär-Tasks zur Abbildung des Transports zwischen den Stationen wurden automatisch zum eMVG hinzugefügt. Da die Dauern aller Teilvorgänge aus der globalen Simulation bekannt sind sowie die monetären Eigenschaften der Ressourcen vorliegen, kann eine automatische wirtschaftliche Bewertung des Arbeitsplans

erfolgen. Ergebnis sind eine Taktzeit von 11,1s, ein wirtschaftlicher Wirkungsgrad von 24,6% sowie Montagekosten von 35,3 Euro pro Produkteinheit.

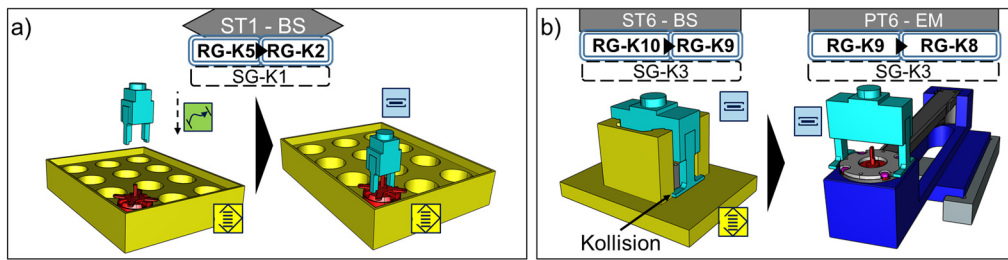


Abbildung 54: Ausschnitte der lokalen Simulation der Ressourcen, die neu zum Montagesystem (Abb. 53) hinzugefügt wurden.

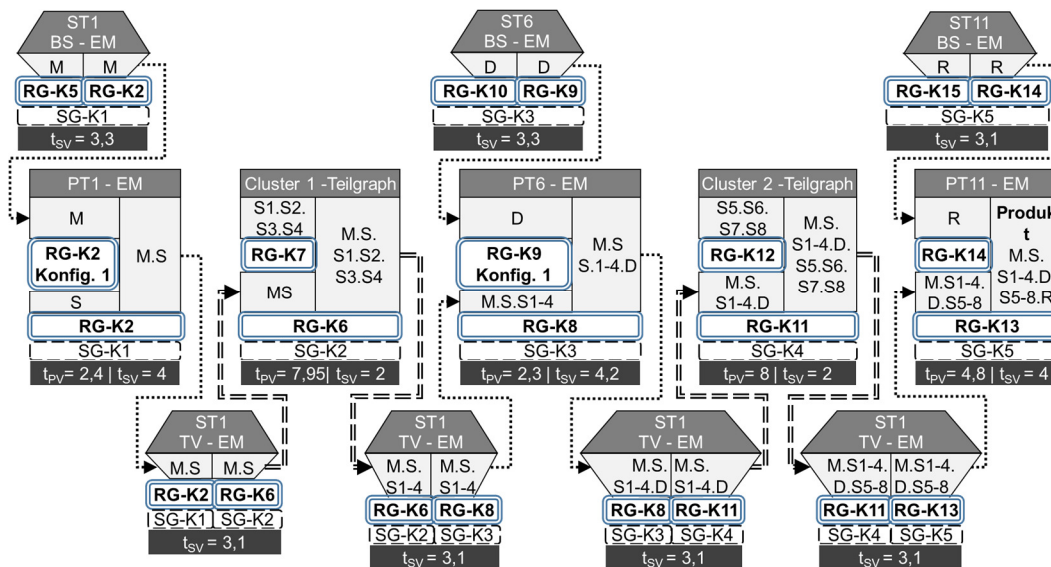


Abbildung 55: eMVG₅ für die neue Antriebseinheit auf dem aktualisierten Montagesystem (Abb. 53). Die Primär- und Sekundärdauern der Tasks sind den eMVG-Knoten hinzugefügt.

5.2.2 Referenzszenario 2 - „Planung einer Montagereihenfolge für eine Montagelinie“

5.2.2.1 Beschreibung des Referenzszenarios

Das zweite Referenzszenario fokussiert die Generierung unterschiedlicher Montagereihenfolgen sowie deren Einfluss auf die wirtschaftliche Bewertung der Arbeitspläne. Es soll ein Montagesystem, bestehend aus zwei hybriden parallelen Montagelinien, Nebenlinie A (NLA) und Nebenlinie B (NLB), betrachtet werden, vgl. Abb. 57. Valide Arbeitspläne für die Montagelinien sollen objektiv verglichen werden. Die Restriktionen bei der Planung erlauben einen bidirektionalen Materialfluss.

Rekonfigurationen des Montagesystems sind nicht erlaubt. Als Anwendungsbeispiel dient der Hauptkörper des Multicopters, der in drei Modul-Baugruppen gegliedert werden kann (zwei Batterie-Module und ein Elektronik-Modul, vgl. Abb. 56). Die Strukturierung in Modul-Baugruppen dient der Reduktion der Komplexität der Montage und soll in der Montagereihenfolge berücksichtigt werden. Eine parallele Montage der Batterie-Module und des Elektronik-Moduls ist daher zu vermeiden.

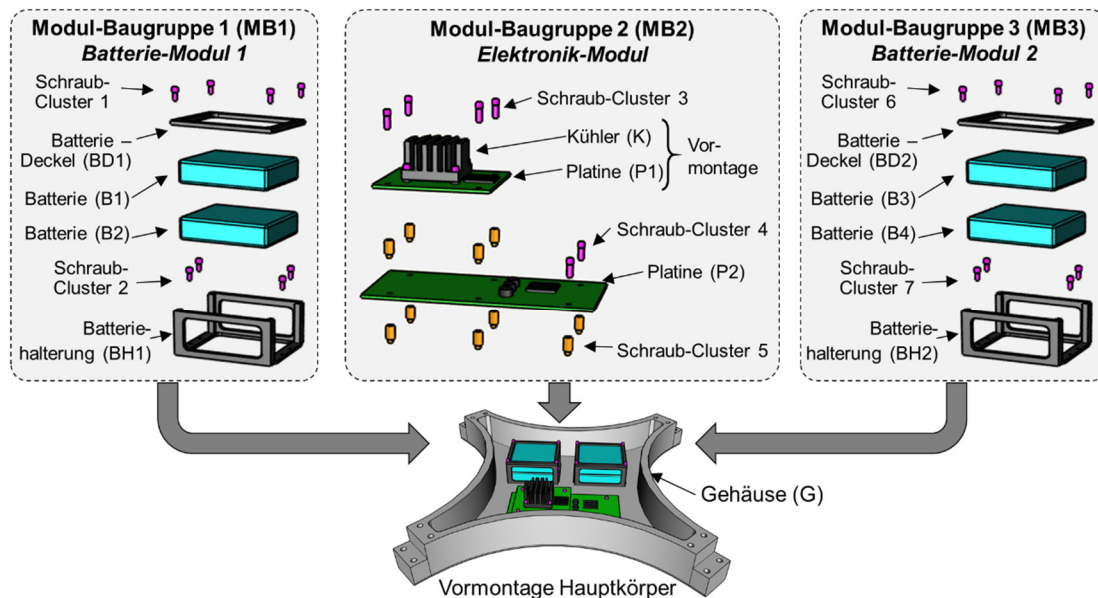


Abbildung 56: Modul-Baugruppen der Vormontage des Hauptkörpers.

5.2.2.2 Generierung des Fähigkeitenmodells des Montagesystems

Beide Montagelinien sind in der Lage alle Anforderungs-Tasks des Hauptkörpers durchzuführen. Die manuellen Stationen der Linien bieten sowohl den Fähigkeiten-Tasks „Zusammensetzen“ als auch „Verschrauben“ an. Die Bereitstellung der Baugruppen erfolgt an unterschiedlichen Stationen der Linien, sodass sich in Hinblick auf den Materialfluss für jede Linie unterschiedliche optimale Montagereihenfolgen ergeben. Die Modelle beider hybriden Montagelinien werden erfolgreich automatisiert analysiert und fehlerfrei in das Fähigkeitenmodell überführt.

5.2.2.3 Generierung des Aufgabenmodells des Produktes

Die theoretische Anzahl möglicher Montagereihenfolgen des Hauptkörpers entspricht der Fakultät der Anzahl der Einzelteile und beträgt bei 48 Einzelteilen $1,24 \cdot 10^{61}$. Die Anzahl valider Montagereihenfolgen ist ebenfalls sehr hoch. Im Endzustand des Produktes können 18 verschiedene Schraubverbindungen demontiert werden, was bereits $6,4 \cdot 10^{15}$ alternativen Montagereihenfolgen entspricht. Folglich ist eine Begrenzung des Lösungsraums zielführend. Bei genauer Betrachtung ergeben

sich vier grundsätzliche Strukturierungsmöglichkeiten der Montage des Produktes. Die beiden Modul-Baugruppen der Batteriemodule (MB1 und MB3) können parallel oder sequentiell montiert werden. Die Montage der Modul-Baugruppe der Elektronik (MB2) kann vor oder nach der Montage der Batteriemodule erfolgen (Abb. 56).

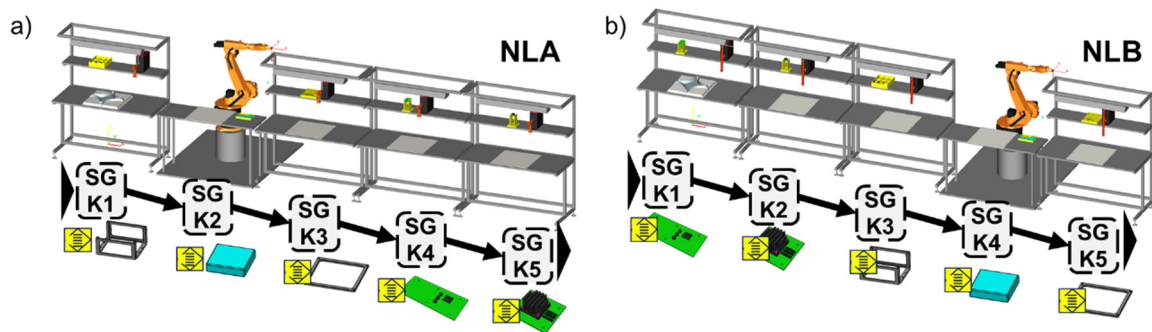


Abbildung 57: Montagesysteme a) Nebenlinie A (NLA) und b) Nebenlinie B (NLB).

Zur initialen Strukturierung des Produktes wird erneut die Ebenenabstandsmessung verwendet, vgl. Abb. 58. Das Gehäuse ist stets das Basisbauteil. Die Montage des Kühlers auf die Platine 1 wird manuell als Vormontage definiert, wobei Platine 1 dem Basisbauteil der Vormontage entspricht.

Aufgrund der unterschiedlichen Lagen der virtuellen Ebene bei der initialen Strukturierung des Produktes werden bei der Anwendung der Methode zur automatischen Generierung des Aufgabenmodells in TCV unterschiedliche Montagereihenfolgen gebildet. Die Modul-Baugruppen werden automatisch erkannt. Je nach Lage der Ebene werden die Modul-Baugruppen 1 und 3 parallel oder sequentiell aufgebaut, vgl. Abb. 58. Die Lage der virtuellen Ebene beeinflusst zudem, in welcher Reihenfolge die Einzelteile in den Modul-Baugruppen montiert werden. Eine parallele Montage der Batterie und der Elektronik-Module erfolgt nicht. Die automatisiert generierten eMVG₀ sind in Abb. 58 vereinfacht dargestellt.

5.2.2.4 Anwendung der automatischen Arbeitsplanung

Die Ergebnisse der automatischen Arbeitsplanung der unterschiedlichen generierten eMVG₀ für die beiden vorgestellten Montagelinien NLA und NLB sind in Abb. 58 unten dargestellt. Alle unterschiedlichen Montagereihenfolgen können auf beiden Linien automatisch in valide Arbeitspläne überführt und anhand der eingeführten Kriterien wirtschaftlich bewertet werden. Alle Schritte der Arbeitsplanung laufen automatisiert ab. Die unterschiedlichen notwendigen Transportvorgänge werden als „Transport“-Tasks zu den Arbeitsplänen hinzugefügt. Einige der generierten Arbeitspläne erfordern einen Materialfluss entgegen der Haupttrichtung, etwa wenn die Bereitstellung später durchzuführender Montagvorgänge an früheren Stationen

erfolgt (vgl. Abb. 58 a), b) und d)). Für Montagereihenfolgen, bei denen die Batterie-Module parallel aufgebaut werden (vgl. Abb. 58 c) und e)), können auf jeweils einer der Linien Arbeitspläne mit einem unidirektionalen Materialfluss generiert werden. Diese werden wirtschaftlich erheblich besser bewertet, da parallele (gleichzeitige) Arbeit an allen Stationen angenommen werden kann (vgl. Abschnitt 4.5.2.1). Die Montage der Schraub-Cluster erfolgt stets nach der Montage der Baugruppe, die im direkten Kontakt mit den Schrauben steht, sodass die Funktionserfüllung der Methode zur automatischen Detektion von Clustern angenommen wird. Die manuell definierte Vormontage aus Platine 1, Kühler und zugehörigen Schrauben wurde in allen Planungs- und Simulationsschritten korrekt berücksichtigt.

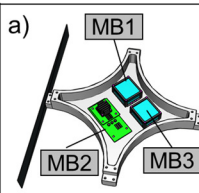
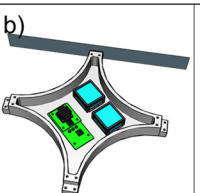
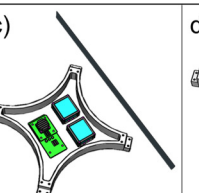
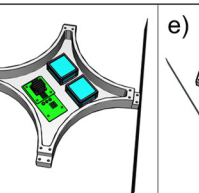
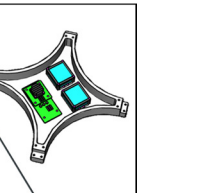
Lage der Ebene bei Ebenenabstandsmessung										
Resultierender eMVG ₀	<div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Teilgraph MB3</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">↓</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Teilgraph MB1</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">↓</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">Teilgraph MB2</div>	<div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Teilgraph MB2</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">↓</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Teilgraph MB3</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">↓</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">Teilgraph MB1</div>	<div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Teilgraph MB2</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">↓</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">Teilgraph MB1 & MB3 (parallel)</div>	<div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Teilgraph MB2</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">↓</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Teilgraph MB1</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">↓</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">Teilgraph MB3</div>	<div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Teilgraph MB1 & MB3 (parallel)</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">↓</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">Teilgraph MB2</div>					
Montagesystem	NLA	NLB	NLA	NLB	NLA	NLB	NLA	NLB	NLA	NLB
Anzahl Transport-Tasks	8	16	16	8	12	5	16	8	5	12
Wirtschaftlicher Wirkungsgrad [%]	15	6	6	15	18	45	6	15	46	18
Gesamtdauer Montage [s]	180	375	372	180	235	145	373	182	145	234

Abbildung 58: Übersicht über die unterschiedlichen Lagen der virtuellen Ebene bei der Ebenenabstandsmessung sowie daraus resultierende eMVG₀. Die fünf unterschiedlichen Montagereihenfolgen werden auf den beiden Montagelinien NLA und NLB geplant und die generierten eMVG₅ wirtschaftlich bewertet. Die am besten bewerteten Kombinationen aus Montagereihenfolge und Montagesystem sind grau hervorgehoben.

5.2.2.5 Ergebnisse der Erprobung

Das zweite Referenzszenario zeigt den Umgang des Systems mit komplexeren Produkten mit vielen validen Montagereihenfolgen. Die initiale Strukturierung sowie die Methode zur Analyse des Produktes erlauben eine zielgerichtete Generierung von Montagereihenfolgen. Der Einfluss der Montagereihenfolge auf die Qualität eines Arbeitsplans in Abhängigkeit von der Struktur eines Montagesystems konnte verdeutlicht werden. Anhand der wirtschaftlichen Bewertung der Arbeitspläne kann aufwandsarm die jeweils beste bekannte Montagereihenfolge für jede der beiden parallelen Montagelinien bestimmt und objektiv verglichen werden.

5.3 Zusammenfassung

Zur Prüfung der Erfüllung der in Abschnitt 2.10 definierten Anforderungen wurde die softwaretechnische Umsetzung des Planungssystems beschrieben. Die implementierten Benutzeroberflächen sowie die zur Analyse und Simulation verwendeten industriellen Software-Werkzeuge und digitalen Modelle wurden erläutert.

Die Erprobung der softwaretechnischen Umsetzung erfolgte anhand zweier Referenzszenarien, welche die Arbeitsablaufplanung der Montage eines Multicopters zeigen. Im ersten Referenzszenario lag der Fokus auf dem Umgang des Planungssystems mit der Arbeitsplanung für ein neues Produkt durch ein Montagesystem, das nicht zur Durchführung sämtlicher geforderter Montagevorgänge geeignet ist. Das Aufgabenmodell wurde mittels der ASP-Methode automatisiert aus dem normkonformen 3D-CAD-Modell des Produktes abgeleitet. Anhand der automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung konnten erfolgreich Handlungsempfehlungen für unterschiedliche Rollen abgeleitet werden. So wurden notwendige Rekonfigurationen des Montagesystems sowie neu zu entwickelnde Ressourcen bestimmt. Nach der manuellen Anpassung des Montagesystems, die anhand der automatisch generierten Handlungsempfehlungen erfolgte, konnten erfolgreich vollständige Arbeitspläne generiert und wirtschaftlich bewertet werden.

Der Schwerpunkt bei der Betrachtung des zweiten Referenzszenarios lag auf der Strukturierung eines komplexen Produktes im Rahmen der Generierung des Aufgabenmodells. Die manuellen Eingaben zur initialen Strukturierung vor dem ASP ermöglichten dabei die aufwandsarme Ableitung sinnvoller Montagereihenfolgen. Durch die Anwendung des Planungssystems zur Arbeitsplanung für unterschiedliche Montagereihenfolgen auf unterschiedlichen Montagesystemen konnte die erfolgreiche automatische Generierung und simulative Absicherung der Arbeitspläne mitsamt ihrer wirtschaftlichen Bewertung gezeigt werden. Des Weiteren konnten der Einfluss der Montagereihenfolgen sowie der vom Nutzer vorzugebenden Restriktionen auf die Ergebnisse der automatischen Austaktung verdeutlicht werden.

Die Dauer der Analyse des Produktes sowie der Simulationen sind stark abhängig von der Anzahl an Einzelteilen sowie der betrachteten Montagereihenfolgen. Bei beiden Referenzszenarien waren die Analyse des Produktes, des Montagesystems sowie die simulationsgestützte Synthese des Aufgaben- und Fähigkeitenmodells innerhalb von wenigen Minuten abgeschlossen. Mit der Umsetzung und Erprobung konnte die Plausibilität des verwendeten Informationsmodells sowie die Berücksichtigung der geforderten Betrachtung der Veränderungsfähigkeit durch das Planungssystem gezeigt werden. Die Funktionsfähigkeit der Restriktionen zur Anpassung der Arbeitsplanung an Rahmenbedingungen konnte gezeigt werden.

6 Technische und wirtschaftliche Bewertung

6.1 Methodische und technische Bewertung

Im Folgenden soll die Erfüllung der in Abschnitt 2.10 definierten Anforderungen durch das Informationsmodell sowie das Planungssystem bewertet werden. Die manuellen Aufwände zur Generierung der Aufgabenbeschreibung (Kriterium 1) beschränken sich auf die optionale Nutzung der Methoden zur initialen Strukturierung des Produktes vor dem ASP sowie auf die notwendige Eingabe von Parameterwerten, die nicht direkt aus dem normkonformen 3D-CAD-Modell generiert werden konnten bzw. nicht Teil von diesem sind. Eine Generierung des Aufgabenmodells des Produktes aus dessen 3D-CAD-Modell ohne initiale Strukturierung ist möglich und kann insbesondere bei einfachen Produkten mit einfachen Montagereihenfolgen valide sein (vgl. Referenzszenario 1). Bei komplexen Produkten mit vielen Bauteilen ermöglichen die manuellen Eingaben eine erhebliche Reduktion des Lösungsraumes und folglich eine Effizienzsteigerung bei der Planung. Des Weiteren erlauben die manuellen Eingaben die Formulierung von zusätzlichen Restriktionen bezüglich der Reihenfolgebildung, die bei der Planung berücksichtigt werden sollen. Die Möglichkeit der manuellen Strukturierung des Produktes wird als zwingend notwendig für die industrielle Anwendung des Systems gesehen, um dem Nutzer die Einbindung seines Wissens bei der Generierung der Montagereihenfolgen zu ermöglichen. Die Ermittlung der notwendigen primären und sekundären Montagevorgänge mitsamt den dazugehörigen Montagezuständen und -bewegungen erfolgt automatisiert. Die Nutzung von Informationen zur automatischen Vervollständigung des Aufgabenmodells, die im CAD-Modell etwa in Form von Features enthalten sind, reduziert manuelle Aufwände zusätzlich.

Das Aufgabemodell bildet unterschiedliche Montagereihenfolgen (vgl. Operationsflexibilität, Abschnitt 2.4.2), Montagezustände und -bewegungen sowie alle relevanten Produktstrukturen wie Vormontagen ab (vgl. Referenzszenario 2). Es wird für die Austaktung und simulative Absicherung durch die aufgabenorientierte Programmierung von Ressourcen in einer Kinematiksimulation verwendet. Es erfüllt die Anforderungen an Veränderungsfähigkeit und Vollständigkeit (Kriterium 2).

Das Fähigkeitenmodell des Montagesystems wird vollständig automatisiert aus einem industriellen Umweltmodell erstellt, das die Positionen der Ressourcen beinhaltet. Voraussetzung ist das Vorhandensein einer Ressourcenbibliothek, welche die digitalen Modelle aller Ressourcen des Montagesystems enthält. Die Funktionen der Ressourcen sind durch Skills abstrakt beschrieben, sodass ihr kompletter Funktionsumfang berücksichtigt werden kann (vgl. Maschinenflexibilität). Die

digitalen Ressourcenmodelle müssen vorab manuell erstellt werden, sind aber unabhängig vom Planungsfall wieder verwendbar. Kriterium 3 ist somit erfüllt.

Das Fähigkeitenmodell des Montagesystems erlaubt die Abbildung einer beliebigen Anzahl miteinander verketteter Stationen. Ressourcen in Stationen sind mitsamt ihren individuellen, abstrakt beschriebenen Fähigkeiten abgebildet (vgl. Maschinenflexibilität). Die manuelle und automatische Rekonfiguration durch den Wechsel von Ressourcen innerhalb einer Station wird beim Planungsvorgehen berücksichtigt. Das Fähigkeitenmodell erlaubt die Berücksichtigung verschiedener Materialflüsse durch das Montagesystem (vgl. Handhabungsflexibilität). Das Fähigkeitenmodell ist mit 3D-Modellen der Ressourcen mitsamt kinematischer Beschreibungen verbunden und ermöglicht eine Kinematiksimulation zur Prüfung der Kollisionsfreiheit und Erreichbarkeit. Die Verknüpfung von Ressourcen zu kombinierten Ressourcen bildet ihre gegenseitige Beeinflussung in Hinblick auf Eigenschaften, erweiterte Funktionalität, Geometrie und Kinematik ab. Kriterium 4 wird folglich als erfüllt angesehen.

Die durchgängige Synthese des Anforderungs- und Fähigkeitenmodells bei der Arbeitsplanung und Austaktung erfolgt komplett automatisiert analog zu den vom Nutzer vorgegebenen Restriktionen. Es erfolgt eine automatisierte wirtschaftliche Bewertung der Planungsergebnisse, sodass Kriterium 6 vollständig erfüllt wird. Die Anwendung des Planungssystems erlaubt eine automatisierte Generierung von Arbeitsplänen sowie Handlungsempfehlungen innerhalb von Minuten, was der Anforderung nach einer möglichst schnellen Arbeitsweise zur Beschleunigung der Einführung neuer Produkte gerecht wird. Die simulative Absicherung der Kollisionsfreiheit und Erreichbarkeit der Primär- und Sekundärvorgänge der generierten Arbeitspläne erfolgt ebenfalls automatisiert und erfüllt das Kriterium 5.

Im Falle eines Montagesystems, das nicht zur Durchführung der vom Produkt geforderten Montagevorgänge geeignet ist, erfolgt eine Visualisierung der Ursachen, die zur zielgerichteten Anpassung des Produktes oder Produktionssystems genutzt werden können. Des Weiteren erfolgt eine Generierung von Rekonfigurationsvorschlägen des Montagesystems, falls alternative Ressourcen zur Durchführung der geforderten Montagevorgänge bekannt sind. Der Umgang der Arbeitsplanung mit Produkten, die nicht durch ein Montagesystem montiert werden können, liegt explizit im Betrachtungshorizont des Planungssystems. Die vor- und nachgelagerten Phasen der Arbeitsablaufplanung sind somit eingebunden und Kriterium 7 ist erfüllt.

Zusätzlich soll das Planungssystem in bestehende Klassifizierungen der Digitalisierung in der Produktion eingeordnet werden. Das Planungssystem wird als CAPP-Werkzeug in der Montage betrachtet. Das PPR-Datenmodell bzw. das integrierte Datenmodell in Form des eMVG entspricht laut Definition einem digitalen Zwilling, da es phasenübergreifend digitale Modelle und Simulationsergebnisse

unterschiedlicher Domänen automatisiert verknüpft, aktualisiert und aggregiert. Eine sensorische Aktualisierung findet allerdings nicht statt. Im Kontext von CPS entspricht das Aufgabenmodell der virtuellen Repräsentanz eines Cyber-Physischen Produktes, das digitale Ressourcenmodell hingegen entspricht der digitalen Repräsentanz eines Cyber-Physischen Betriebsmittels und das Fähigkeitenmodell entspricht der virtuellen Repräsentanz eines Cyber-Physischen Produktionssystems. Durch die Verwendung des XML-Standards sowie aufgrund der Vorgangsbeschreibung mittels SFC ist das Informationsmodell des Planungssystems mit dem Datenaustauschformat AutomationML kompatibel.

Der Einsatz des Planungssystems ist teilweise limitiert, was nachstehend diskutiert wird. Der vorgestellte Ansatz geht von einer Übereinstimmung der realen Produkte, Ressourcen und Montagesysteme mit deren digitalen Modellen aus. Abweichende relative Positionen, Geometrien und Zustände der Elemente können nicht automatisiert erkannt werden. Dadurch kann die Aussagekraft des Planungssystems bezüglich der Durchführbarkeit der Montagevorgänge in der Realität verfälscht werden. Die Synchronisierung zwischen der Realität und dem digitalen Modell kann mit hohen manuellen Aufwänden verbunden sein. Die im Planungssystem angewandten Analysemethoden und Simulationen treffen Vereinfachungen bezüglich der Realität, da elastische und plastische Verformungen, Reibung und Gravitation ignoriert werden, was ebenfalls die Ergebnisse der Planung verfälscht. Produkte mit biegeschlaffen Einzelteilen wie Kabeln oder Schnappverbindungen können folglich nicht analysiert und geplant werden. Die Sensorik in einem Montagesystem wird ebenfalls nicht betrachtet, sodass das System keine Aussagekraft bezüglich der Durchführbarkeit von sensorbasierten Montagevorgängen liefern kann. Eine prototypische Absicherung der durchzuführenden Montagevorgänge in der Realität ist daher weiterhin notwendig. Die vorgestellten automatischen Methoden zur Strukturierung des Produktes können bei Produkten mit komplexen Strukturen mit vielen Einzelteilen und Baugruppen an ihre Grenzen stoßen und ineffiziente Montagereihenfolgen generieren, sodass eine nachgelagerte manuelle Überprüfung der Zweckmäßigkeit der automatisiert generierten Montagereihenfolgen stets erforderlich ist. Der erfolgreiche Einsatz des Planungssystems setzt folglich weiterhin unterschiedliche Tätigkeiten voraus, die von Experten durchzuführen sind. Das Informationsmodell der Skills wird als allgemeingültig betrachtet, beschränkt sich in der Umsetzung und Erprobung bisher allerdings auf Transport-, Handhabungs-, Zuführ-, Zusammensetz- und Schraubvorgänge. Die Erweiterung der Skill-Bibliothek um weitere praxisrelevante Montagevorgänge, wie z. B. Klebe-, Schweiß- und Prüfvorgänge, wird als Voraussetzung für eine industrielle Anwendung des Planungssystems angesehen.

6.2 Wirtschaftliche Bewertung

Der Fokus der wirtschaftlichen Bewertung liegt auf dem Anwendungsfall der automatischen Generierung valider Arbeitspläne und der damit einhergehenden Reduktion manueller Aufwände bei der Arbeitsablaufplanung. Die wirtschaftliche Bewertung wird mit den folgenden Annahmen durchgeführt: Vor Einführung des Planungssystems werden bereits industrielle CAD-Werkzeuge in der Produktentwicklung zur manuellen Erstellung von 3D-CAD-Modellen durch die Konstruktion im standardisierten JT-Format verwendet. Zur Absicherung von Montagevorgängen ist eine industrielle Kinematiksimulation verfügbar. Der Aufbau des Montagesystem-Modells und die Programmierung der darin enthaltenen Ressourcen erfolgen bisher manuell. Ein PLM-System verwaltet die Modelle von Produkten und Ressourcen. Investitionen in industrielle Software-Werkzeuge sind folglich nicht nötig und werden nicht weiter betrachtet. Eine Absicherung der Vorgänge an realen Prototypen zur Berücksichtigung von Effekten, die nicht simulativ abgedeckt wurden, ist unabhängig von der Verwendung des automatischen Planungssystems notwendig und hat daher keinen Einfluss auf die Bewertung der Wirtschaftlichkeit.

Die Kernfunktionalität des Planungssystems, die automatische Generierung von Arbeitsplänen inklusive einer simulativen Absicherung und einer wirtschaftlichen Bewertung, soll zunächst mittels einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach der Kapitalwertmethode bewertet werden, um anschließend eine Grenzwertbetrachtung durchzuführen. Abschließend werden weitere Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit des Planungssystems qualitativ diskutiert und die wirtschaftliche Bewertung zusammengefasst.

Die Wirtschaftlichkeit des Planungssystems bei der automatisierten Generierung von Arbeitsplänen ist im Wesentlichen von den folgenden drei variablen Einflussfaktoren bestimmt: von den zeitlichen Aufwänden bei der klassischen Arbeitsplanung, der prozentualen Zeitersparnis bei der automatischen Erstellung der Arbeitspläne durch das Planungssystem sowie den Aufwänden zum Aufbau des Planungssystems mitsamt der initialen Erstellung und fortlaufenden Aktualisierung der Skill- und Ressourcenbibliothek. Die zeitlichen Aufwände zur Erstellung der Arbeitspläne sind abhängig vom Umfang und von der Häufigkeit der Arbeitsablaufplanungen, die mit steigender Komplexität und Häufigkeit von Neuentwicklungen sowie Veränderungen von Produkten und vom Montagesystem zunehmen. Die zeitlichen Einsparungen werden im Folgenden erläutert. So seien an dieser Stelle die stark reduzierten manuellen Aufwände bei der Erstellung des Aufgabenmodells erwähnt, das direkt aus dem 3D-CAD-Modell des Produktes abgeleitet wird und eine erhebliche Steigerung des Automatisierungsgrades bei der Nutzung einer Kinematiksimulation zur Folge

hat. Das durchgängige Datenmodell bewirkt zusätzlich eine Reduktion von redundanten und manuellen Dateneingaben. Die Austaktung, die wirtschaftliche Bewertung der Arbeitspläne sowie die Generierung von Handlungsempfehlungen für Produktkonstruktion und Betriebsmittelplanung erfolgen im Betrachtungshorizont der Planungsmethodik automatisiert (vgl. Abschnitt 5.2). Das Planungssystem kann dabei vom Produktkonstrukteur zur Absicherung des Produktentwurfs ohne Abstimmung mit der Rolle der Arbeitsplanung genutzt werden, was die Menge an iterativen Abstimmungen reduziert. Die Prüfplanung sowie die Konstruktion und Beschaffung von Ressourcen erfolgen weiterhin manuell (vgl. Abschnitt 2.5.3). Die relativen zeitlichen Einsparungen durch das Planungssystem werden ausgehend von den beschriebenen umfangreichen Automatisierungen der Tätigkeiten der Arbeitsplanung mit 50% angenommen.

Im Folgenden sollen die zusätzlichen Aufwände diskutiert werden, die sich aus der Einführung des Planungssystems ergeben. Bei der initialen Einführung ist die Erstellung der Klassen der Skills in Form von Tasks und Funktionsprimitiva notwendig. Eine Herausforderung hierbei ist die Bestimmung relevanter Parameter für die Abgleich-Anteile, die Bestimmung möglicher Informationsquellen für die Generierung des Aufgabenmodells anhand digitaler Produktdaten sowie die Einbindung geeigneter Simulationsmethoden und -werkzeuge. Des Weiteren müssen die bereits bekannten Ressourcen im PLM-System analog zum digitalen Ressourcenmodell beschreiben werden. Die initial erstellten Tasks, Funktionsprimitiva und digitalen Ressourcenmodelle können anschließend für beliebige Planungsfälle wiederverwendet werden. Manuelle Aufwände ergeben sich nach Einführung des Systems bei der Aktualisierung und Ergänzung der Skills und Ressourcen in den Bibliotheken, etwa im Falle der Einbindung eines neuen Montagevorgangs-Typs mitsamt den entsprechenden Ressourcen. Zu berücksichtigen sind zudem die initialen organisatorischen Aufwände, die sich aus der veränderten Arbeitsweise der Arbeitsplaner, Produktentwickler und Betriebsmittelplaner ergeben.

Tabelle 3 zeigt die angenommenen Kenngrößen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Tabelle 4 deren Ergebnis. Die angenommenen Zahlen repräsentieren ein imaginäres Unternehmen, das auf seinen Montagelinien variable Produkte in geringen Losgrößen produziert. Für die Arbeitsplanung sind in dem Unternehmen fünf Personen in Vollzeit angestellt. Jährliche Kosten sowie die jährlichen Aufwände für die Arbeitsplanung werden als konstant angenommen.

6 Technische und wirtschaftliche Bewertung

Tabelle 3: Angenommene Kennzahlen für die Wirtschaftlichkeitsrechnung.

Unternehmenskennzahlen			
Abschreibungszeitraum	AB	5	Jahre
Kalkulatorische Zinsen	Z	8	%
Wartungskosten (anteilig am Invest)	W	20	%
Anzahl Arbeitsplaner	$n_{\text{Arbeitsplaner}}$	5	Personen
Stundensatz der Arbeitsplaner	$S_{\text{Arbeitsplaner}}$	50	€
Investition			
Invest Grundaufbau Planungssystem		20.000	€
Aufbau der Skill-Bibliothek		10.000	€
Aufbau der Ressourcen-Bibliothek		10.000	€
Organisatorische Aufwände zur Integration		10.000	€
Summe Invest	I	50.000	€
Jährliche Einsparungen durch automatisches simulationsgestütztes Planungssystem			
Stunden für klassische Arbeitsplanung (bei 220 Werktagen und 8 Arbeitsstunden pro Tag)	$t_{\text{Arbeitsplanung}} = n_{\text{Arbeitsplaner}} * 220 \text{ d/Jahr} * 8 \text{ h/d}$	8.800	h / Jahr
zeitliche Einsparungen durch automatisches simulationsgestütztes Planungssystem	e	50	%
Summe jährliche Einsparungen	$E = t_{\text{Arbeitsplanung}} * e * S_{\text{Arbeitsplaner}}$	220.000	€ / Jahr
Jährliche Kosten durch automatisches simulationsgestütztes Planungssystem			
Wartung jährlich	$W_J = I * W$	10.000	€ / Jahr
Aufwand zur Aktualisierung der Skill-Bibliothek	$A_{\text{Skill-Bib}}$	5.000	€ / Jahr
Aufwand zur Aktualisierung der Ressourcen-Bibliothek	$A_{\text{Ress-Bib}}$	5.000	€ / Jahr
Summe jährliche Kosten	$K = W_J + A_{\text{Skill-Bib}} + A_{\text{Ress-Bib}}$	20.000	€ / Jahr

Tabelle 4: Ergebnisse der beispielhaften Wirtschaftlichkeitsrechnung.

Jahr	Einnahmen [€]	Ausgaben [€]	Überschuss [€]	Kapitalwertmethode:		Kapitalwert [€]
				Abzinsfaktor AF	Barwert der Überschüsse [€]	
0	-	50.000,00	-50.000,00	1	-50.000,00	-50.000,00
1	220.000,00	20.000,00	200.000,00	0,9256	185.120,00	135.120,00
2	220.000,00	20.000,00	200.000,00	0,8573	171.460,00	306.580,00
3	220.000,00	20.000,00	200.000,00	0,7938	158.760,00	465.340,00
4	220.000,00	20.000,00	200.000,00	0,735	147.000,00	612.340,00
5	220.000,00	20.000,00	200.000,00	0,6806	136.120,00	748.460,00
Summe	1.100.000,00	150.000,00	950.000,00		748.460,00	2.217.840,00

$$\text{Abzinsfaktor(Jahr)} = 1 / (1 + \text{Zinssatz})^{\text{Jahr}}$$

$$\text{Barwert(Jahr)} = \text{Überschuss(Jahr)} * \text{Abzinsfaktor(Jahr)}$$

$$\text{Kapitalwert(Jahr)} = \text{Kapitalwert(Jahr-1)} + \text{Barwert der Überschüsse(Jahr-1)}$$

$$\text{Kapitalwert}_{\text{gesamt}} = \text{Summe der jahresspezifischen Kapitalwerte}$$

Für die Grenzwertbetrachtung wurde ein Vorgehen angewandt, welches an VOGL (2009) und BACKHAUS (2015) angelehnt ist. Als Variablen werden dabei die jährlichen Stunden für die klassische Arbeitsplanung sowie die prozentuale Zeitersparnis bei Anwendung des automatischen simulationsgestützten Planungs-

systems verwendet. Die in Abb. 59 dargestellten Isobaren entsprechen Wertepaarungen der beiden Variablen, die mit den zuvor verwendeten Kennzahlen und Investitionen im gewählten Abschreibungszeitraum den Kapitalwert Null ergeben (vgl. Punkte x_1 und x_2). Wertepaarungen über der Isobaren sind wirtschaftlich vorteilhaft (vgl. Punkt x_0 , der das Beispiel aus Tabelle 3 und Tabelle 4 repräsentiert), während Wertepaarungen unter der Isobaren einen negativen Kapitalwert besitzen und somit wirtschaftlich nachteilig sind (vgl. Punkt x_4). Es wird ersichtlich, dass die Wirtschaftlichkeit des Planungssystems mit zunehmenden jährlichen Aufwänden in der Arbeitsplanung zunimmt.

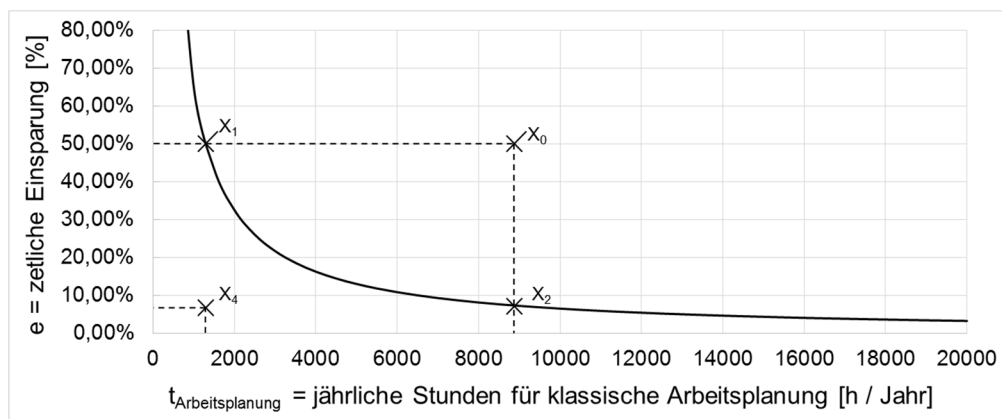


Abbildung 59: Wirtschaftlichkeitsgrenze bei der Nutzung des Planungssystems.

Abschließend sollen weitere qualitative Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit diskutiert werden, die bei der Anwendung der Kapitalwertmethode keine Berücksichtigung gefunden haben. Durch die Betrachtung unterschiedlicher Montagereihenfolgen, für die wiederum unterschiedliche Arbeitspläne erstellt werden, wird die objektive Lösungsauswahl aus einem großen Lösungsraum möglich. Im Falle der manuellen Arbeitsablaufplanung wird aufgrund der beschränkten verfügbaren Zeit und der Aufwände zur Erstellung und zum Vergleich von Planungsalternativen oftmals die erste valide Lösung verwendet. Folglich kann eine allgemeine Verbesserung der Qualität der Arbeitspläne angenommen werden. Zur effizienten Nutzbarmachung der vielfältigen Ansätze zur Steigerung der Veränderungsfähigkeit von Produktionssystemen wie RMS, CPS oder Plug&Produce wird eine automatische Arbeitsablaufplanung als Voraussetzung gesehen. Die automatisierte Ableitung von Handlungsempfehlungen für das Produkt sowie das Montagesystem erlaubt ihre zielgerichtete Anpassung, was eine beschleunigte Markteinführung von Produkten zur Folge hat. Wirtschaftliche und technische Konsequenzen von Produkt- und Montagesystem-Änderungen können besser abgeschätzt werden, was die Planungssicherheit erhöht. Die automatisiert generierten Handlungsempfehlungen für die Produktkonstruktion erlauben eine frühzeitige zielgerichtete Anpassung der Produktgestalt und beschleunigen somit auch die

Markteinführung neuer Produkte. Die frühzeitige Einbindung der Betriebsmittelplanung im Falle von detektierten geforderten Funktionsprimitiva, für die keine geeigneten Ressourcen in der Ressourcenbibliothek gefunden werden konnten, erlaubt eine zielgerichtete Konstruktion oder Beschaffung geeigneter Ressourcen. Das verringert die Eintrittswahrscheinlichkeit kostenintensiver Stillstände von Montagesystemen durch fehlende bzw. ungeeignete Ressourcen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Planungssystem ausgehend von industriell verbreiteten digitalen Modellen und Software-Werkzeugen die Qualität und Effizienz in der Arbeitsplanung steigert. Insbesondere im Falle von häufigen Arbeitsplanungen, etwa aufgrund von hoher Produktvarianz, häufigen Änderungen an den Produkten, dynamischen Produktlebenszyklen sowie einer hohen Veränderungsfähigkeit des Montagesystems, kann das Planungssystem erhebliche wirtschaftliche Vorteile bieten. Das Planungssystem bildet zudem eine Voraussetzung für die Nutzbarmachung der inhärenten Veränderungsfähigkeit in der Montage.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Falle der Einführung einer neuen Produktvariante auf einem bestehenden Montagesystem nimmt die Arbeitsplanung eine zentrale Rolle ein. Sie ist das Bindeglied zwischen der Produktentwicklung und der Montage. Ausgehend von der Beschreibung des Produktes und des Montagesystems sollen möglichst schnell optimale Arbeitspläne erstellt werden, welche die geforderten Montagevorgänge den Stationen und Ressourcen zuordnen. Eine zentrale Aufgabe der Arbeitsplanung besteht in der Beratung der Produktentwicklung hinsichtlich der Produktgestalt sowie der Arbeitssystemplanung bezüglich der Konfiguration des Montagesystems, um eine bestmögliche Montage und schnelle Produkteinführung sicherzustellen.

Ausgehend von den Herausforderungen, denen die Montage in der produzierenden Industrie ausgesetzt ist, ergibt sich die Notwendigkeit einer Erhöhung des Automatisierungsgrades bei der Arbeitsplanung. Die effiziente Berücksichtigung des sehr großen Lösungsraumes möglicher Planungsalternativen aufgrund der steigenden Varianz von Produkten und der zunehmenden Veränderungsfähigkeit von Montagesystemen ist mit den bisherigen Ansätzen nicht realisierbar.

Einen vielversprechenden Ansatz zur Automatisierung der Auswahl von Ressourcen, der Planung von Produktionsvorgängen sowie der aufgabenorientierten Programmierung von Ressourcen stellen sogenannte *Skills* dar. Dabei handelt es sich um eine abstrakte, funktionsorientierte Beschreibung von Produktionsvorgängen. Eine Vielzahl der im Abschnitt Stand der Technik vorgestellten Arbeiten greift dieses Konzept auf, erfüllt die Anforderungen bezüglich einer Automatisierung der Arbeitsplanung jedoch noch nicht adäquat. So ist die Erstellung des *Aufgabenmodells*, das die vom Produkt geforderten Montagevorgänge beschreibt, sowie die Erstellung des *Fähigkeitenmodells*, das die Funktionen der Ressourcen im Montagesystem abbildet, mit hohen manuellen Aufwänden verbunden. Des Weiteren berücksichtigt keine der bekannten Arbeiten hinreichend die Rolle der Arbeitsplanung im Hinblick auf die Beratung von Produktentwicklung und Arbeitssystemplanung.

Die vorliegende Arbeit stellt ein *Planungssystem* inklusive eines *skillbasierten Informationsmodells* für die automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung vor. Zur aufwandsarmen Generierung des Aufgabenmodells wurde eine Methode entwickelt, die industriell verwendete 3D-CAD-Modelle von Produkten analysiert, um automatisch valide Montagereihenfolgen abzuleiten, die in Form von Anforderungs-Skills modelliert sind. Eine weitere entwickelte Methode erlaubt die automatische Generierung eines Fähigkeitenmodells eines Montagesystems mit einer beliebigen Menge an Stationen und Ressourcen anhand der Analyse seines 3D-CAD-Umweltmodells. Das Fähigkeitenmodell nutzt für die Modellierung der

durchführbaren Montagevorgänge ebenfalls Skills. Eine automatische Synthesemethode integriert das Aufgaben- und das Fähigkeitenmodell und generiert valide, monetär bewertete Arbeitspläne. Die Absicherung der Arbeitspläne erfolgt in einer aufgabenorientiert programmierten Kinematiksimulation. Die Synthesemethode berücksichtigt die Veränderungsfähigkeit von Montagesystemen und leitet im Falle nicht durchführbarer Montagevorgänge automatisiert Handlungsempfehlungen für die Produktkonstruktion und die Arbeitssystemplanung ab. Zur Einbindung des Expertenwissens des Nutzers wurden manuelle Methoden zur Strukturierung des Produktes und zur Anpassung der automatischen Arbeitsplanung entwickelt. Alle Methoden wurden in einem Softwarewerkzeug umgesetzt und erfolgreich erprobt.

Im Folgenden sollen mögliche Weiterentwicklungen des Planungssystems skizziert werden. Zur Steigerung der Aussagekraft des Systems sollen physikalische Effekte, wie Reibung und Gravitation, sowohl bei der Analyse des Produktes als auch bei der simulativen Absicherung berücksichtigt werden. Des Weiteren kann ein erheblicher Forschungsbedarf im Bereich des ASP im Falle von elastischen sowie biegeschlaffen Bauteilen festgestellt werden, da eine Analyse von Produkten mit Schnappverbindungen und Kabeln gegenwärtig nicht möglich ist.

Mit Hinblick auf das Aufgabenmodell des Produktes ist bei der automatischen Arbeitsablaufplanung eine gleichzeitige Berücksichtigung mehrerer Produktvarianten anzustreben, da das gegenwärtige System zwar Handlungsempfehlungen ableiten kann, die für eine betrachtete Produktvariante valide sein können, aber die Montierbarkeit anderer Varianten, die bisher möglicherweise mit dem Montagesystem montierbar waren, verhindern kann.

Zusätzlich ist eine Erweiterung der Arten durch das Planungssystem betrachteter Montagevorgänge wie Vorgänge mit der Funktion des Kontrollierens und Sonderoperationen möglich. Des Weiteren sollten zur Steigerung der Aussagekraft der Planung Sensoren Berücksichtigung finden.

Zur Verringerung der Aufwände bei der Aktualisierung des Umweltmodells könnte dieses mit Ansätzen zur Generierung von digitalen Fabrikabbildern anhand von Ressourceninformationen in realen Montagesystemen verknüpft werden (vgl. z. B. KRUG (2012), MÜLLER ET AL. (2016B), REINHART ET AL. (2017)).

Das entwickelte PPR-Datenmodell bildet eine Entwicklungsgrundlage für weitere Anwendungsfälle. Im Kontext des digitalen Zwillings könnten die digitalen Arbeitspläne um weitere Daten ergänzt werden, die während der realen Durchführung der Vorgänge gesammelt werden. Beispielhaft seien reale Vorgangsdauern oder Fehler bei der Durchführung eines Vorgangs durch eine Ressource genannt, die bei einer wiederholten Planung berücksichtigt werden könnten.

8 Literaturverzeichnis

ABELE ET AL. 2006

Abele, E.; Elzenheimer, J.; Liebeck, T.; Meyer, T.: Globalization and Decentralization of Manufacturing. In: Daschenko, A. I. (Hrsg.): Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories. Berlin Heidelberg: Springer 2006, S. 4-13. ISBN: ISBN-10 3-540-29231-4.

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser, Carl 2011. ISBN: 3446425950.

ABRAMOVICI 2007

Abramovici, M.: Future Trends in Product Lifecycle Management (PLM). In: Krause, F.-L. (Hrsg.): The Future of Product Development. Berlin Heidelberg: Springer 2007. ISBN: 978-3-540-69819-7.

ACATECH 2011

Acatech: Cyber-Physical Systems: Driving force for innovation in mobility, health, energy and production. Position Paper. Acatech2011.

ALTEMEIER ET AL. 2010

Altemeier, S.; Brodkorb, D.; Dangelmaier, W.: A Top-Down Approach for an Automatic Precedence Graph Construction under the Influence of High Product Variety. In: Vallespir, A. et al. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. Berlin: Springer 2010, S. 73-80. ISBN: 978-3-642-16357-9.

ARAI ET AL. 2000

Arai, T.; Aiyama, Y.; Maeda, Y.; Sugi, M.; Ota, J.: Agile Assembly Systems by ‘Plug and Produce’. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology (2000) 49, S. 1-4.

ARNDT 2017

Arndt, K.-D.: 110. Arbeitsvorbereitung und Arbeitsplanung. In: Böge, A. et al. (Hrsg.): Handbuch Maschinenbau. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2017, S. 1735-1772. ISBN: 978-3-658-12528-8.

AWF 1985

Arbeitsgemeinschaft für wirtschaftliche Fertigung (Hrsg.): Integrierter EDV-Einsatz in der Produktion: CIM, computer integrated manufacturing: AWF 1985. ISBN: 3410323228.

AZAIEZ ET AL. 2016

Azaiez, S.; Boc, M.; Cudennec, L.; Simoes, M. D. S.; Hauptert, J.; Kchir, S.; Klinge, X.; Labidi, W.; Nadhal, K.; Pfrommer, J.; Schleipen, M.; Schulz, C.; Tortech, T.: Towards Flexibility in Future Industrial Manufacturing: A Global Framework for Self-organization of Production Cells. In: *Procedia Computer Science* (2016) 83, S. 1268-1273.

BACKHAUS ET AL. 2014

Backhaus, J.; Ulrich, M.; Reinhart, G.: Classification, modelling and mapping of skills in automated production systems. In: *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*. München: Springer 2014, S. 85-89.

BACKHAUS 2016

Backhaus, J. C. S.: *Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme*. Diss. Technische Universität München. München: Utz Verlag 2016. ISBN: 978-3-8316-4570-1. (Forschungsberichte IWB, Nr. 319)

BALAN & BONE 2003

Balan, L.; Bone, G. M.: Automated Gripper Jaw Design and Grasp Planning for Sets of 3D Objects. In: *Journal of Field Robotics* 2003 (2003) 20, S. 147-162.

BANNAT ET AL. 2011

Bannat, A.; Bautze, T.; Beetz, M.; Blume, J.; Diepold, K.; Ertelt, C.; Geiger, F.; Gmeiner, T.; Gyger, Tobias; Knoll, Alois: Artificial cognition in production systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 8 (2011) 1, S. 148-174.

BARTENSCHLAGER ET AL. 1998

Bartenschlager, J.; Hebel, H.; Schmidt, G. (Hrsg.): *Handhabungstechnik mit Robotertechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien 1998. ISBN: 978-3-528-03830-4.

BAUERNHANSL ET AL. 2016

Bauernhansl, T.; Krüger, J.; Reinhart, G.; Schuh, G.: *WGP-Standpunkt Industrie 4.0*. 2016.

BECKER & SCHOLL 2006

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

BELHADJ ET AL. 2016

Belhadj, I.; Trigui, M.; Benamara, A.: Subassembly generation algorithm from a CAD model. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2016) 87, S. 2829-2840.

BENGEL 2010

Bengel, M.: Workpiece-centered Approach to Reconfiguration in Manufacturing Engineering. Diss. Heimsheim: Jost Jetter Verlag 2010. ISBN: 3-939890-60-X. (ISW/IPA Forschung und Praxis 175).

BERGER ET AL. 2015

Berger, C.; Hees, A.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Characterization of Cyber-Physical Sensor Systems. In: Teti, R. (Hrsg.): CIRP CMS 2015. Ischia, Italien, 24-26.Juni.2016 2015, S. 638-643.

BERGERT ET AL. 2007

Bergert, M.; Diedrich, C.; Kiefer, J.; Bar, T.: Automated PLC software generation based on standardized digital process information. In: IEEE (Hrsg.): Emerging Technologies and Factory Automation, 2007. ETFA. IEEE Conference on 2007, S. 352-359.

BIRYUKOVA ET AL. 2000

Biryukova, E. V.; Roby-Brami, A.; Frolov, A. A.; Mokhatri, M.: Kinematics of human arm reconstructed from spatial tracking system recordings. In: Journal of Biomechanics (2000) 33, S. 985-995.

BJÖRKENSTAM ET AL. 2016

Björkenstam, S.; Delfs, N.; Carlson, J. S.; Bohlin, R.; Lennartson, B.: Enhancing Digital Human Motion Planning of Assembly Tasks Through Dynamics and Optimal Control. In: Söderberg, R. (Hrsg.): Procedia CIRP Volume 44. Göteborg 2016, S. 20-25.

BOKRANZ & LANDAU 2006

Bokranz, R.; Landau, K.: Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen. MTM-Handbuch: Stuttgart: Schäffer-Pöschel 2006. ISBN: 978-3791021331.

BOOTHROYD ET AL. 2010

Boothroyd, G.; Dewhurst, P.; Knight, W. A.: Product Design for Manufacture and Assembly, Third Edition. Boca Raton: CRC Press 2010. ISBN: 9781420089271.

BOSCHERT & ROSEN 2016

Boschert, S.; Rosen, R.: Digital Twin—The Simulation Aspect. In: Hehenberger, P. et al. (Hrsg.): Mechatronic Futures: Springer International Publishing 2016, S. 59-74. ISBN: 978-3-319-32154-7.

BOURJAULT 1984

Bourjault, A.: Contribution a une apporche methodologique de l'assemblage automatise: Elaboration automatique des sequences operatoires. Diss. L'Universite de Franche-Comte 1984.

BOURJAULT 1987

Bourjault, A.: Methodology of assembly automation: A new approach. In: Radharamanan, R. (Hrsg.): Robotics and Factories of the Future 87. San Diego, California, USA, July 28–31. Berlin Heidelberg: Springer 1987, S. 37-45.

BOYSEN ET AL. 2007

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

BOYSEN ET AL. 2009

Boysen, N.; Flidner, M.; Scholl, A.: Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. In: European Journal of Operational Research (2009) 192.2, S. 349-373.

BRACHT ET AL. 2011

Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. Berlin Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-540-89038-6.

BRANICKY ET AL. 2001

Branicky, M. S.; LaValle, S. M.; Olson, K.; Yang, L.: Quasi-Randomized Path Planning. In: IEEE Computer Society (Hrsg.): IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seoul, South Korea 2001, S. 1481-1487.

BUKCHIN & TZUR 2000

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

BULLINGER 1994

Bullinger, H.-J.: Ergonomie. Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung. Wiesbaden: Springer Fachmedien 1994. ISBN: 978-3-663-12095-7.

BULLINGER 1986

Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Systematische Montageplanung: Handbuch für die Praxis. München: Hanser Verlag 1986. ISBN: 3446146067.

BÜSCHER ET AL. 2013

Büscher, C.; Kuz, S.; Ewert, D.; Schilberg, D.; Jeschke, S.: Kognitive Planungs- und Lernmechanismen in selbstoptimierenden Montagesystemen. In: Jeschke, S. et al. (Hrsg.): Automation, Communication and Cybernetics in Science and Engineering. Berlin Heidelberg: Springer 2013, S. 595-605. ISBN: 978-3-642-33388-0.

CHAUDRON ET AL. 2005

Chaudron, V.; Martin, P.; Godot, X.: Assembly sequences: Planning and simulating assembly operations. In: IEEE (Hrsg.): The 6th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning: From Nano to Macro Assembly and Manufacturing. 19-21 Juli 2005, S. 156-161.

CHEN ET AL. 2008

Chen, W.-C.; Tai, P.-H.; Deng, W.-J.; Hsieh, L.-F.: A three-stage integrated approach for assembly sequence planning using neural networks. In: Expert Systems with Applications (2008) 34, S. 1777-1786.

CHEN ET AL. 2002

Chen, R.-S.; Lu, K.-Y.; Yu, S.-C.: A hybrid genetic algorithm approach on multi-objective of assembly planning problem. Engineering Applications of Artificial Intelligence (2002) 15, S. 447-457.

CIRP 2011

CIRP: Dictionary of Production Engineering Vol. 4. Assembly 1st Edition. Berlin Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-12006-0.

CORMEN ET AL. 2013

Cormen, T.; Leiserson, C.; Rivest, R.; Stein, C. (Hrsg.): Algorithmen - Eine Einführung: De Gruyter Oldenbourg 2013. ISBN: 3486748610.

CROSER ET AL. 2003

Croser, P.; Ebel, F.: Pneumatik. Berlin Heidelberg: Springer 2003. ISBN: 978-3-540-00022-8.

CUIPER 2000

Cuiper, R.: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen. Diss. Technische Universität München. München: Utz Verlag 2000. ISBN: 3-89675-783-0. (Forschungsberichte IWB, Nr. 143).

DASCHENKO 2006

Daschenko, A. I. (Hrsg.): Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories. Berlin Heidelberg: Springer 2006. ISBN: 10 3-540-29231-4.

DE FAZIO & WHITEY 1987

De Fazio, T. L.; Whitney, D. E.: Simplified Generation of All Mechanical Assembly Sequences. In: IEEE: Journal of Robotics and Automation 1987, S. 640-658.

DE LIT ET AL. 2001

De Lit, P.; Latinne, P.; Rekiek, B.; Delchambre, A.: Assembly planning with an ordering genetic algorithm. In: International Journal of Production Research (2001) Vol. 39, No. 16, S. 3623-3640.

DEUTSCHLÄNDER 1989

Deuschländer, A.: Integrierte rechnerunterstützte Montageplanung. Technische Universität Berlin. München Wien: Hanser Verlag 1989. ISBN: 3-446-15779-4. (Produktionstechnik Berlin 72).

DIESTEL 2010

Diestel, R. (Hrsg.): Graphentheorie. Berlin Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-1491-5.

DILLMANN & HUCK 1991

Dillmann, R.; Huck, M. (Hrsg.): Informationsverarbeitung in der Robotik. Berlin Heidelberg: Springer 1991. ISBN: 978-3-540-53036-7.

DIN 8593

DIN 8593: Fertigungsverfahren Fügen. Berlin: Beuth Verlag 2003.

DIN EN 1092-1

DIN EN 1092-1: Flansche und ihre Verbindungen – Runde Flansche für Rohre, Armaturen, Formstücke und Zubehörteile. Berlin: Beuth Verlag 2016.

DIN EN 60130-9

DIN EN 60130-9: Steckverbinder für Frequenzen unter 3 MHz. Berlin: Beuth Verlag 2011.

DIN EN 61131-3

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

DRAHT 2010

Draht, R. (Hrsg.): Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML. Berlin Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-04673-5.

DUDEN 2017

Duden: Duden. <<http://www.duden.de/rechtschreibung/Fähigkeit>> - 19.12.2017

ECL@SS 2017

eCl@ss: eCl@ss Homepage. <<https://www.eclass.eu/>> - 19.12.2017

EHRENSPIEL 2009

Ehrlenspiel, K. (Hrsg.): Integrierte Produktentwicklung. München: Hanser Verlag 2009. ISBN: 978-3-446-42013-7.

EIGNER ET AL. 2010

Eigner, M.; Gerhardt, F. J.; Gilz, T.; Handschuh, S.: Proposal for a guideline to integrate kinematics within lightweight formats. In: Proceedings of the DESIGN 2010, the 11th international Design Conference, Dubrovnik, Croatia (2010), S. 1481-1492.

EIGNER & STELZER 2009

Eigner, M.; Stelzer, R. (Hrsg.): Product Lifecycle Management. Berlin Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-44373-5.

ELMARAGHY 2006

ElMaraghy, H. A.: Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. In: International Journal of Flexible Manufacturing Systems (2006) 17, S. 261-267.

ELMARAGHY 2009

ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. London: Springer 2009. ISBN: 978-1-84882-066-1.

EVERSHEIM 1996

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik - Band 1 - Grundlagen. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: VDI 1996. ISBN: 978-3-642-87738-4.

EVERSHEIM 1998

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik - Band 2 - Konstruktion. 3. Auflage. RWTH Aachen. Berlin Heidelberg: Springer 1998. ISBN: 978-3-642-63758-2.

EVERSHEIM 2002

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik - Band 3 - Arbeitsvorbereitung. 4. Auflage. RWTH Aachen. Berlin Heidelberg: Springer 2002. ISBN: 978-3-642-62640-1.

EWERT ET AL. 2010

Ewert, D.; Thelen, S.; Kunze, R.; Mayer, M.; Schildberg, D.; Jeschke, S.: A Graph Based Hybrid Approach of Offline Pre-planning and Online Re-planning for Efficient Assembly under Realtime Constraints. In: ICIRA 2010: Intelligent Robotics and Applications (2010), S. 44-55.

FELDMANN 1997

Feldmann, C.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung. Diss. Technische Universität München. Berlin Heidelberg: Springer 1997. ISBN: 978-3-540-62059-4. (Forschungsberichte IWB, Nr. 104)

FELDMANN ET AL. 2014

Feldmann, K.; Schnöpper, V.; Spur, G. (Hrsg.): Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. München: Carl Hanser Verlag 2014. ISBN: 978-3-446-42827-0.

FERRER ET AL. 2016

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

FRIEDWALD 2011

Friedwald, A.: Benchmark neutraler Formate für den prozessübergreifenden Datenaustausch im Schiffbau. 2011. Fraunhofer IGD (Hrsg.).

<<http://publica.fraunhofer.de/documents/N-194622.html>> - 17.12.2017

FROMMHERZ & WERLING 1990

Frommherz, B.; Werling, G.: Generating Robot Action Plans by means of an Heuristic Search. In: Robotics and Automation. Cincinnati Ohio, May 13-18 1990, S. 884-889.

GAMBERINI ET AL. 2006

Gamberini, R.; Grassi, A.; Rimini, B.: A new multi-objective heuristic algorithm for solving the stochastic assembly line re-balancing problem. In: International Journal of Production Economics (2006) 102, S. 226-243.

GARCIA ET AL. 2011

Garcia, F.; Lanz, M.; Järvenpää, E.; Tuokko, R.: Process planning based on feature recognition method." In: Assembly and manufacturing IEEE 2011, S. 1-5. ISBN: 1612843433.

GEYER 1997

Geyer, M.: Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung. Diss. Technische Universität München. Berlin Heidelberg: Springer 1997. ISBN: 978-3-540-64195-7. (Forschungsberichte IWB, Nr. 112).

GHANDI & MASEHIAN 2015

Ghandi, S.; Masehian, E.: Review and taxonomies of assembly and disassembly path planning problems and approaches. In: Computer-Aided Design (2015) 67, S. 58-86.

GLAESSGEN & STARGEL 2012

Glaessgen, E.; Stargel, d.: The Digital Twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. In: 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference - Special Session Digital Twin. Honolulu. (2012).

GOLDFEDER ET AL. 2007

Goldfeder, C.; Allen, P.; Lackner, C.; Pelosof, R.: Grasp Planning via Decomposition Trees. In: IEEE Conference on Robotics and Automation (2007), S. 4679-4684.

GU & YAN 1995

Gu, P.; Yan, X.: CAD-directed automatic assembly sequence planning. In: International Journal of Production Research (1995) 33.11, S. 3069-3100.

GUPTA & KRISHNAN 1998

Gupta, S.; Krishnan, V.: Product family-based assembly sequence design methodology. In: IIE Transactions (1998) 30.10, S. 933-945.

HAAGE ET AL. 2011

Haage, M.; Malec, J.; Nilsson, A.; Nilsson, K.; Nowaczyk, S.: Declarative-knowledge-based reconfiguration of automation systems using a blackboard architecture. In: Kofold-Petersen, A. et al. (Hrsg.): Frontiers in Artificial Intelligence and Applications 2011, S. 163-172. ISBN: 978-1-60750-753-6.

HAASE 2011

Haase, T.: Greifplanung und Greifskills für reaktives Greifen. Diss. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2011. ISBN: 386644740X.

HAMMERSTINGL & REINHART 2015

Hammerstingl, V.; Reinhart, G.: Unified Plug&Produce Architecture for Automatic Integration of Field Devices in Industrial Environments. In: IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) (2015).

HAMMERSTINGL & REINHART 2017

Hammerstingl, V.; Reinhart, G.: Fähigkeiten in der Montage. Version 1.0. 2017. <<http://mediatum.ub.tum.de/?id=1370174>> - 01.07.2017

HASSAN & YOON 2010

Hassan, S.; Yoon, J.: Haptic Based Optimized Path Planning Approach to Virtual Maintenance Assembly / Disassembly (MAD). In: IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (2010), S. 18-22.

HATWIG ET AL. 2012

Hatwig, J.; Minnerup, P.; Zaeh, M. F.; Reinhart, G.: An automated path planning system for a robot with a laser scanner for remote laser cutting and welding. In: IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Chengdu, China 2012, S. 1323-1328.

HAUN 2013

Haun, M. (Hrsg.): Handbuch Robotik. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg 2013. ISBN: 978-3-642-39857-5.

HECHL 1995

Hechl, C.: Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte. Technische Universität München. Berlin Heidelberg: Springer 1995. ISBN: 978-3-540-60325-2. (Forschungsberichte IWB, Nr. 92)

HEPP ET AL. 2006

Hepp, M.; Leukel, J.; Schmitz, V.: A quantitative analysis of product categorization standards: content, coverage, and maintenance of eCl@ss, UNSPSC, eOTD, and the RosettaNet TechnicalDictionary. In: Knowledge and Information Systems 13.1 (2006). S. 77-114.

HERING 2014

Hering, E.: Kalkulation für Ingenieure. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-658-05198-3.

HESSE 2012

Hesse, S.: Automatische Montagemaschinen. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg 2012, S. 195-272. ISBN: 978-3-642-29060-2.

HEUSS ET AL. 2017

Heuss, L.; Michniewicz, J.; Reinhart, G.: Lebenszyklusübergreifende Modellierung von Produktinformationen in der flexiblen Montage. In: Heinz Nixdorf Institut (Hrsg.): Tagungsband Wissenschafts- und IndustrieForum. Paderborn, 11.05.2017-12.05.2017. (2017).

HOMEM DE MELLO & LEE 1991

Homem de Mello, L. S.; Lee, S. (Hrsg.): Computer Aided Mechanical Assembly Planning. Norwell, Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publishers 1991. ISBN: 0-7923-9205-1.

HOMEN DE MELLO & SANDERSON 1990

Homen de Mello, L. S.; Sanderson, A. C.: AND/OR Graph Representation of Assembly Plans. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation (1990) 6, S. 188-199.

HU ET AL. 2002

Hu, D.; Hu, Y.; Li, C.: Mechanical Product Disassembly Sequence and Path Planning Based on Knowledge and Geometric Reasoning. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2002) 19, S. 688-696.

HUCK 1992

Huck, M.: Produktorientierte Montageablauf- und Layoutplanung für die RoboterMontage. Diss. Düsseldorf: VDI 1992. ISBN: 978-3184010515.

HUCKABY ET AL. 2013

Huckaby, J.; Vassos, S.; Christensen, H.: Planning with a Task Modeling Framework in Manufacturing Robotics. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (2013), S. 5787-5794.

HUCKABY & CHRISTENSEN 2014

Huckaby, J.; Christensen, H.: Modeling Robot Assembly Tasks in Manufacturing Using SysML. in: Proceedings of VDE: ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics (2014), S. 1-7.

HUMBURGER 1998

Humburger, R.: Konzeption eines Systems zur aufgabenorientierten Roboterprogrammierung. Diss. WZL Aachen. Aachen: Shaker Verlag 1998. ISBN: 3-8265-3427-1. (Berichte aus der Produktionstechnik 98).

IBERALL 1987

Iberall, T.: Grasp Planning for Human Prehension. In: International Joint Conference on Artificial Intelligence (1987), S. 1153-1157.

IEEE 610.12

IEEE 610.12: Standard Glossary of Software Engineering Terminology: 31.12.1990. New York: IEEE 1990. ISBN: 1-55937-067-X

ISO 14306

ISO 14306: Industrial automation systems and integration - JT file format specification for 3D visualization. 2016.

JÄRVENPÄÄ ET AL. 2016A

Järvenpää, E.; Lanz, M.; Tuokko, R.: Application of a capability-based adaptation methodology to a small-size production system. In: International Journal of Manufacturing Technology and Management 30 (2016) 1-2, S. 67-86.

JÄRVENPÄÄ ET AL. 2016B

Järvenpää, E.; Siltala, N.; Lanz, M.: Formal resource and capability descriptions supporting rapid reconfiguration of assembly systems. In: IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM), (2016), S. 120-125.

JIMÉNEZ 2013

Jiménez, P.: Survey on assembly sequencing: a combinatorial and geometrical perspective. In: Journal of Intelligent Manufacturing (2013) 24, S. 235-250.

JODLBAUER 2008

Jodlbauer, H.: Produktionsoptimierung: Wertschaffende sowie kundenorientierte Planung und Steuerung. 2. Aufl: Springer Vienna 2008. ISBN: 978-3211781401.

JONAS 2000

Jonas, C.: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen. Diss. Technische Universität München. München: Utz Verlag 2000. ISBN: 3-89675-870-5. (Forschungsberichte IWB, Nr. 145)

JONES ET AL. 1998

Jones, R. E.; Wilson, R. H.; Calton, T. L.: On Constraints in Assembly Planning. In: IEEE (Hrsg.): IEEE Transactions on Robotics and Automation (1998), S. 849-863.

KAGERMANN 2017

Kagermann, H.: Chancen von Industrie 4.0 nutzen. In: Vogel-Heuser, B. et al. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.4: Springer Vieweg 2017, S. 235-246. ISBN: 978-3-662-53253-9.

KAHLEN ET AL. 2017

Kahlen, F. J.; Flumerfelt, S.; Alves, A. (Hrsg.): Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Springer International Publishing 2017. ISBN: 978-3-319-38754-3.

KAMRANI & NASR 2010

Kamrani, A. K.; Nasr, E. A. (Hrsg.): Engineering Design and Rapid Prototyping. New York Dordrecht Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-0-387-95862-0.

KARL 2015

Karl, F.: Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln. Diss. Technische Universität München. Berlin Heidelberg: Utz Verlag 2015. ISBN: 978-3-8316-4458-2. (Forschungsberichte IWB, Nr. 298)

KAUFMANN ET AL. 1996A

Kaufmann, S. G.; Wilson, R. H.; Jones, R. E.; Calton, T. L.; Ames, A. L.: The Archimedes 2 Mechanical Assembly Planning System. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis, Minnesota, April 1996, S. 3361-3368.

KAUFMANN ET AL. 1996B

Kaufmann, S. G.; Wilson, R. H.; Jones, R. E.; Calton, T. L.; Ames, A. L.: LDRD final report: Automated planning and programming of assembly of fully 3D mechanisms. Sandia National Laboratorie. Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550 (November 1996).

KAVRAKI & LATOMBE 1998

Kavraki, L. E.; Latombe, J.-C.: Probabilistic Roadmaps for Robot Path Planning. In: Gupta, K. et al. (Hrsg.): Practical motion planning in robotics. Chichester, Sussex [etc.]: John Wiley & Sons 1998, S. 33-53. ISBN: 0-471-98163-X.

KEDDIS ET AL. 2015

Keddis, N.; Kainz, G.; Zoitl, A.: Product-Driven Generation of Action Sequences for Adaptable Manufacturing Systems. In: IFAC-PapersOnLine (2015) 48-3, S. 1502-1508.

KERNSCHMIDT ET AL. 2014

Kernschmidt, K.; Behncke, F.; Chucholowski, N.; Wickel, M.; Bayrak, G.; Lindemann, U.; Vogel-Heuser, B.: An integrated approach to analyze change-situations in the development of production systems. In: Procedia CIRP 17 (2014), S. 148-153.

KIM ET AL. 2004

Kim, J.; Jihwan, P.; Hwang, Y.; Lee, M.: Advanced Grasp Planning for Handover Operation Between Human and Robot. In: 2nd International Conference on Autonomous Robots and Agents (2004), S. 34-39.

KITSIOS & HASLAUER 2014

Kitsios, V.; Haslauer, R.: 3D-Master. Zeichnungslose Produktbeschreibung mit CATIA V5. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-658-05844-9.

KLUGE 2011

Kluge, S.: Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme. Diss. Heimsheim: Jost Jetter Verlag 2011. ISBN: 978-3-939890-81-2. (Berichte aus dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) 510).

KONOLD & REGER 2003

Konold, P.; Reger, H. (Hrsg.): Praxis der Montagetechnik. Wiesbaden: Vieweg 2003. ISBN: 978-3-663-01610-6.

KRATZSCH 2000

Kratzsch, S.: Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen. Diss. TU Braunschweig: Vulkan-Verlag 2000. ISBN: 3802786548. (Schriftenreihe des IWF).

KRUG 2012

Krug, S.: Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce). Diss. Technische Universität München. München: Hanser Verlag 2012. ISBN: 78-3-8316-4243-4. (Forschungsberichte IWB, Nr. 270).

KRÜGER ET AL. 2017

Krüger, J.; Wang, L.; Verl, A.; Bauernhansl, T.; Carpanzano, E.; Makris, S.; Fleischer, J.; Reinhart, G.; Franke, J.; Vincentini, F.: Innovative Control of Assembly Systems and Lines. In: CIRP Annals Manufacturing Technology (2017).

KUGELMANN 1999

Kugelmann, D.: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern. Diss. Technische Universität München. München: Utz Verlag 1999. ISBN: 3-89675-615-X. (Forschungsberichte IWB, Nr. 127).

LEE 1989

Lee, S.: Disassembly planning by subassembly extraction. In: Proceedings of the third ORSA/TIMS Conference on flexible manufacturing systems (1989), S. 383-388.

LEE 1994

Lee, S.: Subassembly Identification and Evaluation for Assembly Planning. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (1994) 24.3, S. 493-503.

LEE 1999

Lee, T.: Information modeling: From design to implementation. In: Proceedings of the second world manufacturing congress. Canada/Switzerland: International Computer Science Conventions. (1999), S. 315-321.

LEE & SESHIA 2017

Lee, E.; Seshia, S. (Hrsg.): Introduction to Embedded Systems. MIT Press 2017. ISBN: 978-0-262-53381-2.

LEVITIN ET AL. 2006

Levitin, G.; Rubinovitz, J.; Shnits, B.: A genetic algorithm for robotic assembly line balancing. In: European Journal of Operational Research (2006) 168, S. 811-825.

LINDEMANN ET AL. 2000

Lindemann, U.; Glander, M.; Grunwald, S.; Reicheneder, J.; Stetter, R.; Zanner, S.: Flexible Integration von Produktentwicklung und Montageplanung. In: Industrie Management (2000) 16, S. 23-27.

LINDEMANN ET AL. 2006

Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. (Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin: Springer 2006. ISBN: 9783540342748.

LINDEMANN ET AL. 2009

Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: Structural Complexity Management. Berlin Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-87888-9.

LINNER 1993

Linner, S.: Konzept einer integrierten Produktentwicklung. Diss. Technische Universität München. Berlin Heidelberg: Springer 1993. ISBN: 3-540-59016-1. (Forschungsberichte IWB, Nr. 88).

LITTO ET AL. 2004

Litto, M.; Korajda, I.; Mangold, C.; Lerche, M.: Baukastenbasiertes Engineering mit Föderal - Ein Leitfaden für Maschinen- und Anlagenbauer. VDMA 2004. ISBN: 978-3816304784.

LO ET AL. 2002

Lo, J.; Huang, G.; Metaxas, D.: Human Motion Planning Based on Recursive Dynamics and Optimal Control Techniques. In: Multibody Systems Dynamics (2002) 8, S. 433-458.

LÖDDING 2008

Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Berlin Heidelberg: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-76859-3.

LOFERER 2001

Loferer, M.: Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
Diss. Technische Universität München. München: Utz Verlag 2001. ISBN: 978-3-8316-0118-9. (Forschungsberichte IWB, Nr. 162).

LOSKYLL 2013

Loskyll, M.: Entwicklung einer Methodik zur dynamischen kontextbasierten Orchestrierung semantischer Feldgerätefunktionalitäten. Diss. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern. 2013. ISBN: 978-3-943995-29-9. (Fortschrittsberichte pak 25).

LOTTER 2012A

Lotter, B.: Die Primär-Sekundär-Analyse. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg 2012, S. 49-78. ISBN: 978-3-642-29060-2.

LOTTER 2012B

Lotter, B.: Einführung. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg 2012, S. 1-8. ISBN: 978-3-642-29060-2.

LOTTER ET AL. 2012

Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg 2012. ISBN: 978-3-642-29060-2.

LU & YANG 2016

Lu, C.; Yang, Z.: Integrated assembly sequence planning and assembly line balancing with ant colony optimization approach. In. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2016) 83, S. 243-256.

LUTZ 1974

Lutz, L.: Abtakten von Montagelinien. Diss. Universität Stuttgart. Stuttgart: Krauskopf 1974. ISBN: 978-3783000832. (Produktionstechnik heute 8).

LYNETTE & LEDERMANN 2006

Lynette, J. A.; Ledermann, S. J.: Human Hand Function. New York: Oxford University Press 2006. ISBN: 0195173155.

MAFFEI ET AL. 2011

Maffei, A.; Akilliuglu, H.; Neves, P.; Ferreira, J.; Onori, M.: Emerging Behavior as driver for the sustainability of a modular, “skills-centric” production system. In: IEEE: AFRICON. (2011). S. 1-6.

MALEC ET AL. 2007

Malec, J.; Nilsson, A.; Nilsson, K.; Nowaczyk, S.: Knowledge-Based Reconfiguration of Automation Systems. In: IEEE Conference on Automation Science and Engineering (2007), S. 170-175.

MALEC ET AL. 2013

Malec, J.; Nilsson, K.; Bruyninckx, H.: Describing assembly tasks in a declarative way. In: ICRA 2013 WS on semantics, identification and control of robot-human-environment interaction (2013).

MERENGO ET AL. 1999

Merengo, C.; Nava, F.; Pozzetti, A.: Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. In: International Journal of Production Research (1999) 37.12, S. 2835-2860.

MICHNIEWICZ & REINHART 2014

Michniewicz, J.; Reinhart, G.: Cyber-physical Robotics – Automated Analysis, Programming and Configuration of Robot Cells based on Cyber-physical-systems. In: Thoben, K.-D. et al. (Hrsg.): Procedia Technology Volume 15. Bremen 2014, S. 566-575.

MICHNIEWICZ ET & REINHART 2015

Michniewicz, J.; Reinhart, G.: Cyber-Physische Systeme in der Robotik - Automatische Planung und Durchführung von Montageprozessen durch Kommunikation zwischen Produkt und Produktionssystem. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Intelligente Vernetzung in der Fabrik. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2015, S. 229-262. ISBN: 978-3-8396-0930-9.

MICHNIEWICZ & REINHART 2016

Michniewicz, J.; Reinhart, G.: Cyber-Physical-Robotics – Modelling of modular robot cells for automated planning and execution of assembly tasks. In: Mechatronics Journal - System-Integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering (2016) Volume 34, S. 170-180.

MICHNIEWICZ ET AL. 2016

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

MILBERG & MÖLLER 2008

Milberg, J.; Möller, N.: Valuation of changeable production systems. In: Production Engineering 2 (2008) 4, S. 417-424.

MIROSLAW 2016

Mirosław, T.: The Method of Modeling of Human Skeletons Multi-Body System. In: Awrejcewicz, J. (Hrsg.): Dynamical Systems: Modelling: Łódź, Poland, December 7-10, 2015. Cham: Springer International Publishing 2016, S. 255-276. ISBN: 978-3-319-42402-6.

MISHRA & DEB 2016

Mishra, A.; Deb, S.: An Intelligent Methodology for Assembly Tools Selection and Assembly Sequence Optimisation. In: CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, Springer India (2016), S. 323-333.

MONOSTORI ET AL. 2016

Monostori, L.; Kádár, B.; Bauernhansl, T.; Kondoh, S.; Kumara, S.; Reinhart, G.; Sauer, O.; Schuh, G.; Sihn, W.; Ueda, K.: Cyber-physical systems in manufacturing. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology (2016) 65, S. 621-641.

MORADI ET AL. 1997

Moradi, H.; Goldberg, K.; Lee, S.: Geometry-Based Part Grouping for Assembly Planning. In: IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (1997), S. 281-286.

MOSEMANN ET AL. 1998

Mosemann, H.; Röhrdanz, F.; Wahl, F.: Assembly stability as a constraint for assembly sequence planning. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (1998) Vol. 1, S. 233-238.

MOSEMANN & WAHL 2001

Mosemann, H.; Wahl, F. M.: Automatic Decomposition of Planned Assembly Sequences Into Skill Primitives. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation Vol 17 Issue 5 2001, S. 709-718.

MÜLLER ET AL. 2016A

Müller, R.; Leenhard, H.; Vette, M.; Speicher, C.: Planning and developing cyber-physical assembly systems by connecting virtual and real worlds. In: *Procedia CIRP* (2016) 35, S. 35-40.

MÜLLER ET AL. 2016B

Müller, R.; Vette, M.; Hörauf, L.; Speicher, C.: Identification of assembly system configuration for cyber-physical assembly system planning. In: *Applied Mechanics and Materials* (2016) 840, S. 26-32.

NAUMANN ET AL. 2010

Naumann, M.; Bengel, M.; Verl, A.: Automatic generation of robot applications using a knowledge integration framework. In: *Robotics (ISR) 2010*.

NAUMANN ET AL. 2007

Naumann, M.; Wegener, K.; Schraft, R. D.: Control architecture for robot cells to enable plug'n'produce. In: *IEEE (Hrsg.): Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on 2007*, S. 287-292.

NIU ET AL. 2003

Niu, X.; Ding, H.; Xiong, Y.: A hierarchical approach to generating precedence graphs for assembly planning. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (2003) 43, S. 1473-1486.

NYHIUS ET AL. 2008

Nyhius, P.; Reinhart, G.; Abele, E. (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten*. Garbsen: Tewiss Verlag 2008. ISBN: 3939026964.

NYHUIS ET AL. 2012

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.; Wagner, C.: Materialbereitstellung in der Montage. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg 2012, S. 285-314. ISBN: 978-3-642-29060-2.

OESTERLE ET AL. 2017

Oesterle, J.; Amodeo, L.; Yalaoui, F.: A comparative study of Multi-Objective Algorithms for the Assembly Line Balancing and Equipment Selection Problem under consideration of Product Design Alternatives. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* (2017), S. 1-26.

OSTGATHE 2012

Ostgathe, M.: *System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage*. Diss. Technische Universität München. München: Utz Verlag 2012. ISBN: 978-3-8316-4206-9. (Forschungsberichte IWB, Nr. 265).

OTTO ET AL. 2013

Otto, A.; Otto, C.; Scholl, A.: Systematic data generation and test design for solution algorithms on the example of SALBPGen for assembly line balancing. In: European Journal of Operational Research (2013) 228, S. 33-45.

OU & XU 2013

Ou, L.-M.; Xu, X.: Relationship matrix based automatic assembly sequence generation from a CAD model. In: Computer Aided Design 45 (2013), S. 1053-1067.

PACHOW-FRAUNHOFER 2012

Pachow-Fraunhofer, J.: Planung veränderungsfähiger Montagesysteme. Diss. PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2012. ISBN: 978-3-943104-57-8. (Berichte aus dem IFA 01/2012).

PAN 2005

Pan, C.: Integrating CAD files and automatic assembly sequence planning. Diss. Iowa State University. Ann Arbor: ProQuest Information and Learning (2005).

PARK 1992

Park, H.-S.: Rechnerbasierte Montageplanung in der Mittelserienfertigung. Diss. VDI 1992. ISBN: 3181456020 (Fortschrittberichte VDI Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen, Universität Hannover).

PASTOR ET AL. 2002

Pastor, R.; Andres, C.; Duran, A.; Perez, M.: Tabu search algorithms for an industrial multi-product and multi-objective assembly linebalancing problem, with reduction of the task dispersion. In: Journal of the Operational Research Society (2002) 53, S. 1317-1323.

PAUL & SUTTER 1991

Paul, R.; Sutter, B.: Technisches Modellieren - Ein Zugang zur integrierten Produktdatenverwaltung. In: Appelrath, H. (Hrsg.): Datenbanksysteme in Büro, Technik und Wissenschaft. Berlin Heidelberg: Springer 1991, S. 288-307. ISBN: 978-3-642-76530-8.

PAWLEWSKI 2014

Pawlewski, P.: Multimodal approach to modeling of manufacturing processes. In: Procedia CIRP (2014), S. 716-720.

PFROMMER ET AL. 2013

Pfrommer, J.; Schleipen, M.; Beyerer, J.: PPRS: Production skills and their relation to product, process, and resource. In: Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA) (2013).

PFROMMER ET AL. 2015

Pfrommer, J.; Stogl, D.; Kiril, A.; Navarro, S. E.; Hein, B.; Beyerer, J.: Plug & produce by modelling skills and service-oriented orchestration of reconfigurable manufacturing systems. In: at - Automatisierungstechnik (2015) 63 (10), S. 790-800.

PINTZOS ET AL. 2016

Pintzos, G.; Triantafyllou, C.; Papakostas, N.; Mourtzis, D.; Chryssolouris, G.: Assembly precedence diagram generation through assembly tiers determination. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing (2016) 29.10, S. 1045-1057.

POHL 2008

Pohl, K.: Requirements Engineering. Grundlagen, Prinzipien, Techniken. Heidelberg: dpunkt.verlag GmbH 2008. ISBN: 978-3-89864-550-8.

PRENTING & BATTAGLIN 1964

Prenting, T.; Battaglin, R.: The Precedence Diagram: A Tool for Analysis in Assembly Line Balancing. In: Journal of Industrial Engineering (1964) 15, S. 208-213.

PRIESE & WIMMEL 2008

Priese, L.; Wimmel, H.: Petri-Netze. Berlin Heidelberg: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-76970-5.

PRÖPSTER 2016

Pröpster, M.: Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus. Diss. Technische Universität München. München: Utz Verlag 2016. ISBN: 978-3-8316-4547-3. (Forschungsberichte IWB, Nr. 314).

QIANG ET AL. 2002

Qiang, G.; Liu, J. H.; Zhong, Y. F.: A concurrent hierarchical evolution approach to assembly process planning. In: International Journal of Production Research (2002) 40.14, S. 3357-3374.

RAKSHIT & AKELLA 2015

Rakshit, S.; Akella, S.: The influence of motion paths and assembly sequences on the stability of assemblies. In: IEEE Transactions on Automation Science and Engineering (2015) 12.2, S. 615-627.

RASHID ET AL. 2012

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

REFA 1990

REFA (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation, Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. München: Carl Hanser Verlag 1990. ISBN: 978-3446159679.

REFA 1991

REFA: Methodenlehre der Planung und Steuerung, 6 Bände. Teil 2: Programm und Auftrag - Material-, Kapazitäts-, Personal- und Betriebsmittelplanung und -steuerung. Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (Hrsg.). München: Carl Hanser 1991.

REFA 1997

REFA: Datenermittlung. Methodenlehre der Betriebsorganisation. München: Carl Hanser Verlag 1997. ISBN: 978-3-446-19059-7.

REINER & POLLY 1989

Reiner, A.; Polly, A.: Integriertes Produktmodell. In: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung (1989) 12.

REINHART ET AL. 2011

Reinhart, G.; Hüttner, S.; Krug, S.: Automatic Configuration of Robot Systems – Upward and Downward Integration. In: Proceedings of the 4th international Conference on Intelligent Robotics and Applications (2011), S. 102-111.

REINHART ET AL. 2015

Reinhart, Gunther; Scholz-Reiter, Bernd; Wahlster, Wolfgang; Wittenstein, Manfred; Zühlke, Detlef (Hrsg.): Intelligente Vernetzung in der Fabrik. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2015. ISBN: 978-3-8396-0930-9.

REINHART 2017

Reinhart, Gunther (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 - Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München, Heidelberg: Hanser Verlag 2017. ISBN: 978-3-446-44642-7.

REINHART ET AL. 2017

Reinhart, G.; Backhaus, J.; Hammerstingl, V.; Michniewicz, J.; Stocker, C.; Ulrich, M.: Kapitel 7: Montage in der Industrie 4.0. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 - Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München, Heidelberg: Hanser Verlag 2017. ISBN: 978-3-446-44642-7.

REKIEK ET AL. 1999

Rekiek, B.; Pellichero, F.; De Lit, P.; Falkenhauer, E.; Delchambre, A.: A Resource Planner for Hybrid Assembly Lines. In: Proceedings of the 15th International Conference CAR & FOF (1999) Vol. 99.

REKIEK ET AL. 2002

Rekiek, B.; De Lit, P.; Delchambre, A.: Hybrid assembly line design and user's preferences. In: International Journal of Production Research (2002) 40.5, S. 1095-1111.

REKIEK & DELCHAMBRE 2006

Rekiek, B.; Delchambre, A.: Assembly Line Design. The Balancing of Mixed-Model Hybrid Assembly Lines with Genetic Algorithms. London: Springer 2006. ISBN: 978-1-84628-112-9.

RIGGS & HU 2013

Riggs, R.; Hu, J.: Disassembly liaison graphs inspired by word clouds. In: Procedia CIRP - Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems (2013) 7, S. 521-526.

ROA ET AL. 2012

Roa, M. A.; Argus, M.; Leidner, D.; Borst, C.; Hirzinger, G.: Power Grasp Planning for Anthropomorphic Robot Hands. In: IEEE Conference on Robotics and Automation (2012), S. 563-569.

RÖHRDANZ ET AL. 1997

Röhrdanz, F.; Mosemann, H.; Wahl, F.: Generating and evaluating stable assembly sequences. In: Advanced Robotics, Vol. 11 No. 2 1997, S. 97-126.

RÖHRDANZ 1998

Röhrdanz, F.: Modellbasierte automatisierte Greifplanung. Diss. TU Braunschweig. Aachen: Shaker Verlag 1998. ISBN: 3826534476.

RÖHRIG 2002

Röhrig, M.: Variantenbeherrschung mit hochflexiblen Produktionsendstufen. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag 2002 (Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 2, Nr. 622)

ROLLER 1995

Roller, D. (Hrsg.): CAD - Effiziente Anpassungs- und Variantenkonstruktion. Berlin Heidelberg: Springer 1995. ISBN: 978-3-642-79450-6.

ROMNEY ET AL. 1995

Romney, B.; Godard, C.; Goldwasser, M.; Ramkumar, G.: An Efficient System for Geometric Assembly Sequence Generation and Evaluation. In: ASME International Computers in Engineering Conference 1995, S. 699-712.

ROSCHER 2008

Roscher, J.: Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie. Diss. Universität Stuttgart. Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb. 2008.

ROSELL 2004

Rosell, J.: Assembly and task planning using Petri nets: a survey. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture (2004) 218.8, S. 987-994.

ROSEN ET AL. 2015

Rosen, R.; Wichert, G. v.; Lo, G.; Bettenhausen, K.: About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. In. IFAC-PapersOnLine (2015) 448.3, S. 567-572.

ROßGODERER 2002

Roßgoderer, U.: System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen. Diss. Technische Universität München. München: Utz Verlag 2002. ISBN: 3-8316-0154-2. (Forschungsberichte IWB, Nr. 168).

SAAKSVOURI & IMMONEN 2008

Saaksvouri, A.; Immonen, A.: Product Lifecycle Management. Berlin Heidelberg: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-78173-8.

SAMULAT 2017

Samulat, P.: Die Digitalisierung der Welt. Wie das Industrielle Internet der Dinge aus Produkten Services macht. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2017. ISBN: 978-3-658-15510-0.

SCHAUMBURG 1992

Schaumburg, H. (Hrsg.): Sensoren. Stuttgart: Teubner 1992. ISBN: 978-3-322-99928-3.

SCHLEUSENER & GÜNTHER 2003

Schleusener, M.; Günther, H.-O.: Leistungsabstimmung von Produktionslinien in der Elektronikmontage. In: Operations Research Proceedings. Berlin Heidelberg: Springer (2003), S. 103-110.

SCHMALZ & REINHART 2014

Schmalz, J.; Reinhart, G.: Automated selection and dimensioning of gripper systems. In. Procedia CIRP (2014) 23, S. 212-216.

SCHMALZ ET AL. 2016

Schmalz, J.; Giering, L.; Hölzle, M.; Huber, N.; Reinhart, G.: Method for the Automated Dimensioning of Gripper Systems. In. Procedia CIRP 44 (2016).

SCHMIDT 1992

Schmidt, M.: Konzeption und Einsatzplanung flexibler automatisierter Montagesysteme. Diss. Technische Universität München. Berlin Heidelberg: Springer 1992. ISBN: 3-540-55025-9. (Forschungsberichte IWB, Nr. 41).

SCHNEIDER 1999

Schneider, E.: Methoden der Automatisierung. Beschreibungsmittel, Modellkonzepte, Werkzeuge für Automatisierungssysteme. Braunschweig: Vieweg 1999. ISBN: 978-3-528-06566-9.

SCHOLL 1999

Scholl, Armin (Hrsg.): Balancing and Sequencing of Assembly Lines. Heidelberg: Physica-Verlag 1999. ISBN: 978-3-7908-1180-3.

SCHOLL ET AL. 2010

Scholl, A.; Flieder, M.; Boysen, N.: ABSALOM: Balancing assembly lines with assignment restrictions. In: European Journal of Operational Research (2010) 200, S. 688-701.

SCHÜLER 1994

Schüler, U. (Hrsg.): CIM-Lehrbuch: Grundlagen der rechnerintegrierten Produktion: Vieweg+Teubner 1994. ISBN: 3528049286.

SCHWARTZ 1983

Schwartz, J.: On the "piano movers" problem. II. General techniques for computing topological properties of real algebraic manifolds. In: Advances in Applied Mathematics (1983) 4.3, S. 298-351.

SECKNER 2008

Seckner, M.: Unterstützung automatisierter Mikroproduktion durch wandlungsfähige Montageanlagen. Konzeption und Realisierung einer flexiblen und reaktiven Mikromontage. Diss. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern 2008. ISBN: 978-3-939432-91-3. (Fortschritt-Berichte pak, Nr. 19).

SENDLER 2013

Sendler, U.: JT als ISO-Norm wird einen Innovationsschub auslösen. VDI Nachrichten. <<http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/JT-ISO-Norm-Innovationsschub-ausloesen-Nr-4>> 19.12.2017

SETHI & SETHI 1990

Sethi, A.; Sethi, S.: Flexibility in Manufacturing: A Survey. In: The International Journal of Flexible Manufacturing Systems (1990) 2, S. 289-328.

SHAFTO ET AL. 2010

Shafto, M.; Conroy, M.; Doyle, R.; Glaessgen, E.; Kemp, C.; LeMoigne, J.; Wang, L.: Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap. National Aeronautics and Space Administration (2010).

SHPITALNI ET AL. 1989

Shpitalni, M.; Elber, G.; Lenz, E.: Automatic assembly of three dimensional structures via connectivity graphs. In: CIRP Annals-Manufacturing Technology (1989) 38.1, S. 25-28.

SIEGERT & BOCIONEK 1996

Siegert, H.-J.; Bocionek, S.: Robotik: Programmierung intelligenter Roboter. Berlin Heidelberg: Springer 1996. ISBN: 978-3-540-60665-9.

SMALE & RATCHEV 2009

Smale, D.; Ratchev, S.: A capability model and taxonomy for multiple assembly system reconfigurations. In: IFAC Proceedings Volumes (2009) 42.4, S. 1923-1928.

SMALE & RATCHEV 2010

Smale, D.; Ratchev, S.: Application of a Reconfiguration Methodology for Multiple Assembly System. In: Precision Assembly Technologies and Systems (2010), S. 239-246.

STENMARK & MALEC 2015

Stenmark, M.; Malec, J.: Knowledge-based instruction of manipulation tasks for industrial robotics. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing (2015) 33, S. 56-67.

STENMARK ET AL. 2015

Stenmark, M.; Malec, J.; Stolt, A.: From high-level task descriptions to executable robot code. In: Intelligent Systems' 2014. Springer (2015), S. 189-202.

SWAMINATHAN ET AL. 1996

Swaminathan, A.; Barber, S.: An experience-based assembly sequence planner for mechanical assemblies. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation (1996) 12.2, S. 252-267.

TALBOT ET AL. 1986

Talbot, F.; Petterson, J.; Gehrlein, W.: A comparative evaluation of heuristic line balancing techniques. In: Management Science (1986) 32, S. 430-454.

THOMAS ET AL. 2003

Thomas, U.; Barrenscheen, M.; Wahl, F. M.: Efficient Assembly Sequence Planning Using Stereographical Projections of C-Space Obstacles. In: IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning. Besancon, France, 10-11 Juli 2003, S. 96-102.

THOMAS ET AL. 2010

Thomas, U.; Wahl, F. M.: Assembly Planning and Task Planning — Two Prerequisites for Automated Robot Programming. In: Schütz, D. et al. (Hrsg.): Robotic Systems for Handling and Assembly. Berlin Heidelberg: Springer 2010, S. 333-354. ISBN: 978-3-642-16784-3.

THOMAS ET AL. 2013

Thomas, U.; Hirzinger, G.; rumpe, B.; Schulze, C.; Wortmann, A.: A new skill based robot programming language using UML/P Statecharts. In: IEEE (Hrsg.): Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on 2013, S. 461-466.

THOMAS ET AL. 2015

Thomas, U.; Stouraitis, T.; Roa, M.: Flexible Assembly through Integrated Assembly Sequence Planning and Grasp Planning. In: IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Göteborg, Schweden 2015, S. 586-592.

TITTMANN 2011

Tittmann, P. (Hrsg.): Graphentheorie. München: Carl Hanser Verlag 2011. ISBN: 978-3-446-42789-1.

TONSHÖFF ET AL. 1992

Tonshöff, H. K.; Menzel, E.; Park, H. S.: A Knowledge-Based System for Automated Assembly Planning. CIRP Annals - Manufacturing Technology (1992) 41.1, S. 19-24.

TSENG ET AL. 2006

Tseng, H.-E.; Tang, C.-E.: A sequential consideration for assembly sequence planning and assembly line balancing using the connector concept. International Journal of Production Research (2006) 44.1, S. 97-116.

TSENG ET AL. 2008

Tseng, H.-E.; Chen, M.-H.; Chang, C.-C.; Wang, W.-P.: Hybrid evolutionary multi-objective algorithms for integrating assembly sequence planning and assembly line balancing. In: International Journal of Production Research (2008) 46.21, S. 5951-5977.

UEDA ET AL. 2001

Ueda, K.; Markus, A.; Monostori, L.; Kals, H.; Arai, T.: Emergent synthesis methodologies for manufacturing. In: CIRP Annals-Manufacturing Technology (2001) 50.2, S. 535-551.

ULRICH & HEHL 1976

Ulrich, P.; Hehl, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. In: WIST Heft 7 (1976), S. 304-309

ULRICH 1981

Ulrich, H.: Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. In: Sandig, C.; Geist, M.; Köhler, N.: die Führung des Betriebes. Herrn Professor Dr. Dr. h.c. Curt Sandig zu seinem 80. Geburtstag gewidmet. Stuttgart. Poeschel. S. 1-26.

ULRICH ET AL. 2016

Ulrich, M.; Lux, G.; Jürgensen, L.; Reinhart, G.: Automated and Cycle Time Optimized Path Planning for Robot-Based Inspection Systems. In: Procedia CIRP 44 (2016), S. 377-382.

VAJNA ET AL. 2009

Vajna, S.; Weber, Chr.; Bley, H.; Zeman, K. (Hrsg.): CAx für Ingenieure: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-36038-4.

VDI 2206

VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Berlin: Beuth Verlag 2004.

VDI VDI 2209

VDI VDI 2209: 3D-Produktmodellierung - Technische und organisatorische Voraussetzungen Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis. Berlin: Beuth Verlag 2009.

VDI 2219

VDI 2219: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - Einführung und Betrieb von PDM-Systemen. Berlin: Beuth Verlag 2016.

VDI 2221

VDI 2221: VDI 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte: Mai 1993. Berlin: Beuth Verlag 1993.

VDI 2860

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

VDI 3633

VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe. Berlin: Beuth Verlag 2013.

VDI 4499

VDI 4499: VDI 4499 Digitale Fabrik - Grundlagen - Blatt 1. Berlin: Beuth Verlag 2008.

VDI/VDE 3682

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

VOGL 2009

Vogl, W.: Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2009. ISBN: 9783831608690. (Forschungsberichte IWB, Nr. 228).

VOGEL-HEUSER ET AL. 2014

Vogel-Heuser, B.; Lindemann, U.; Reinhart, G. (Hrsg.): Innovationsprozesse zyklensorientiert managen. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-662-44931-8.

VOGEL-HEUSER ET AL. 2017

Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Wiesbaden: Springer Vieweg 2017. ISBN: 978-3-662-53253-9.

WAHRIG & WAHRIG-BURFEIND 2002

Wahrig, G.; Wahrig-Burfeind, R.: Deutsches Wörterbuch. Gütersloh: Wissen-Media-Verlag 2002. ISBN: 3-577-10079-6.

WANG ET AL. 2012

Wang, H. S.; Che, Z. H.; Chiang, C. J.: A hybrid genetic algorithm for multi-objective product plan selection problem with ASP and ALB. In: Expert Systems with Applications (2012) 39, S. 5440-5450.

WANG & TIAN 2016

Wang, Y.; Tian, D.: A weighted assembly precedence graph for assembly sequence planning. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2016) 83, S. 99-115.

WARNECKE ET AL. 1975

Warnecke, H. J.; Löhr, H. G.; Kiener, W. (Hrsg.): Montagetechnik. Mainz: Krauskopf 1975. ISBN: 9783783000986.

WEBER 2009

Weber, W. (Hrsg.): Industrieroboter. München: Hanser Verlag 2009. ISBN: 978-3-446-41031-2.

WECK & BRECHER 2006

Weck, M.; Brecher, C. (Hrsg.): Werkzeugmaschinen 4. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg 2006. ISBN: 978-3-540-22507-2.

WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3540260390

WESTKÄMPER ET AL. 2013

Westkämper, E.; Spath, D.; Constantinescu, C.; Lentjes, J. (Hrsg.): Digitale Produktion. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg 2013. ISBN: 978-3-642-20258-2.

WIEGAND ET AL. 2007

Wiegand, H.; Kloos, K.-H.; Thomala, W. (Hrsg.): Schraubenverbindungen. Berlin Heidelberg: Springer 2007. ISBN: 978-3-540-21282-9.

WIENDAHL 2002

Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit. In: wt Werkstattstechnik online (2002) 92, S. 122-127.

WIENDAHL ET AL. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhius, P.; Zäh, M.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. In: CIRP Annals-Manufacturing Technology (2007) 56.2, S. 783-809.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Betriebsorganisation für Ingenieure. München: Hanser Verlag 2010. ISBN: 978-3-446-41878-3.

WIESBECK 2014

Wiesbeck, M.: Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung. Diss. Technische Universität München. 2014. ISBN: 978-3-8316-4369-1. (Forschungsberichte IWB, Nr. 285).

WILL & GEBHARD 2011

Will, D.; Gebhard, N.: Hydraulik. 5. Aufl. Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-17242-7.

WILSON & LATOMBE 1994

Wilson, R. H.; Latombe, J.-C.: Geometric reasoning about mechanical assembly. In: Artificial Intelligence 1994, S. 371-396.

WILSON 1998

Wilson, R. H.: Geometric reasoning about assembly tools. In: Artificial Intelligence 98 1998, S. 237-279.

WITTPAHL 2017

Wittpahl, V.: Digitalisierung. Bildung Technik Innovation. Wiesbaden: Springer Vieweg 2017. ISBN: 978-3-662-52853-2. (iit-Themenband).

XU ET AL. 2012

Xu, L. D.; Wang, C.; Bi, Z.; Yu, J.: AutoAssem: An Automated Assembly Planning System for Complex Products. In: IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS 2012 (2012) Vol. 8, No. 3, S. 669-678.

XU ET AL. 2014

Xu, L. D.; Wang, C.; Bi, Z.; Yu, J.: Object-Oriented Templates for Automated Assembly Planning for Complex Products. In: IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol. 11, No. 2. April 2014, S. 492-503.

YUSOF & LATIF 2014

Yusof, Y.; Latif, K.: Survey on computer-aided process planning. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2014) 75, S. 77-89.

ZHA ET AL. 1998

Zha, X. F.; Lim, S. Y.; Fok, S. C.: Integrated Knowledge-Based Assembly Sequence Planning. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology (1998) 14, S. 50-64.

ZHANG 1989

Zhang, W.: Representation of assembly and automatic robot planning by Petri net. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (1989) 19.2, S. 418-422.

ZHANG ET AL. 2016

Zhang, W.; Ma, M.; Li, H.; Yu, J.: Generating interference matrices for automatic assembly sequence planning. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2016), S. 1-15.

ZHOU ET AL. 2011

Zhou, W.; Zheng, J.-r.; Yan, J.-J.; Wang, J.-F.: A novel hybrid algorithm for assembly sequence planning combining bacterial chemotaxis with genetic algorithm. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2011) Volume 52, Issue 5.

9 Anhang

9.1 Visualisierungen der Bedienoberflächen des Planungssystems

9.1.1 Einleitung

Zur besseren Darstellung der Anwendung des umgesetzten Planungssystems in den beiden Referenzszenarien sind auf den nachfolgenden Seiten aussagekräftige Screenshots in ausgewählten Planungsschritten dargestellt. Es werden jeweils das Hauptfenster, die Bedienoberfläche für das Assembly Sequence Planning sowie die Bedienoberfläche für die automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung dargestellt. In Abschnitt 9.1.2 werden die Funktionen der Bedienoberflächen beschrieben. Die Visualisierung repräsentativer Ergebnisse der Analyse- und Synthesemethoden in den unterschiedlichen Bedienoberflächen im Rahmen der Anwendung des Planungssystems in den Referenzszenarien aus Abschnitt 5.2 erfolgt in den Abschnitten 9.1.4 und 9.1.5.

9.1.2 Funktionen der Bedienoberflächen

9.1.2.1 Hauptfenster

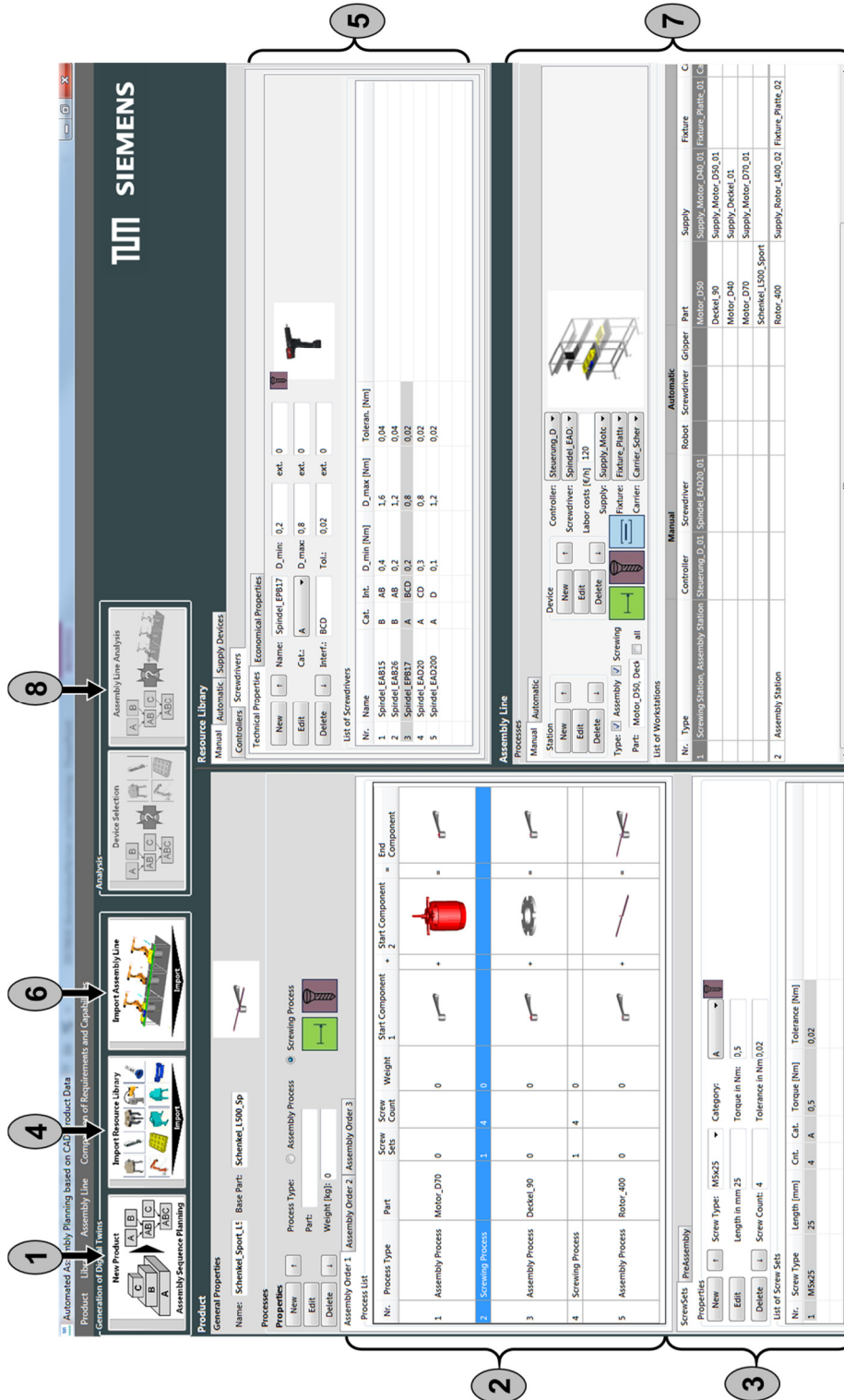


Abbildung 60: Hauptfenster der Softwareumsetzung des Planungssystems.

Das Hauptfenster (Abb. 60) visualisiert die Daten aus der Produkt-Domäne und aus der Ressourcen-Domäne. Die Synthese der beiden Domänen soll bei der Arbeitsablaufplanung erfolgen. Die Analyse-Funktionen des Assembly Sequence Planning und der Generierung des Fähigkeitenmodells sowie die Synthese-Funktion zur automatischen Arbeitsplanung werden im Hauptfenster manuell gestartet.

Im linken Teil des Hauptfensters ermöglicht die Produkt-Domäne die Auswahl eines 3D-CAD-Modells eines Produktes, um dieses mittels Assembly Sequence Planning zu analysieren (1). Zur manuellen Strukturierung des Produktes im Rahmen des ASP wird das ASP-Fenster verwendet, siehe Abschnitt 5.1.2.2.

Der mittels ASP generierte eMVG₂ wird als Liste dargestellt. Diese enthält die sequentiell durchzuführenden Primär-Anforderungs-Tasks (2). Die beiden Startbaugruppen sowie die Endbaugruppe jedes Tasks werden bildlich dargestellt, indem Abbildungen des 3D-CAD-Modells des Produktes während der virtuellen Demontage im entsprechenden Montagezustand automatisiert erstellt werden. Die manuelle Vervollständigung der Parameterwerte der Tasks erfolgt ebenfalls im Hauptfenster (3).

Bezüglich der Ressourcen-Domäne bietet das Hauptfenster Funktionalitäten auf Ressourcen- und Stationsebene. Es erlaubt den Import der Ressourcenbibliothek (4). Diese enthält die digitalen Ressourcenmodelle aller Ressourcen, die bei der Planung berücksichtigt werden sollen. Sie werden im Hauptfenster zur Ressourcenbibliothek dargestellt und können hinzugefügt, parametrisiert sowie entfernt werden (5). Die Generierung und Visualisierung des Fähigkeitenmodells des Produktionssystems in Form des Station-Graph erfolgt ebenfalls im Hauptfenster. Dafür muss im Hauptfenster ein 3D-Modell eines Montagesystems ausgewählt werden (6). Die analog zur Methode aus Abschnitt 4.3.3 erkannten Stationen sowie die dazugehörigen Ressourcen werden in einer Tabelle dargestellt (7). Das Hauptfenster ermöglicht die Vorgabe der Personalkosten pro Zeiteinheit für manuelle Stationen.

Liegen alle erwähnten Eingangsdaten vor, kann die automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung gestartet werden (8), deren Ergebnisse in einem separaten Fenster gezeigt werden, siehe Abschnitt 5.1.2.3.

9.1.2.2 Bedienoberfläche für Assembly Sequence Planning

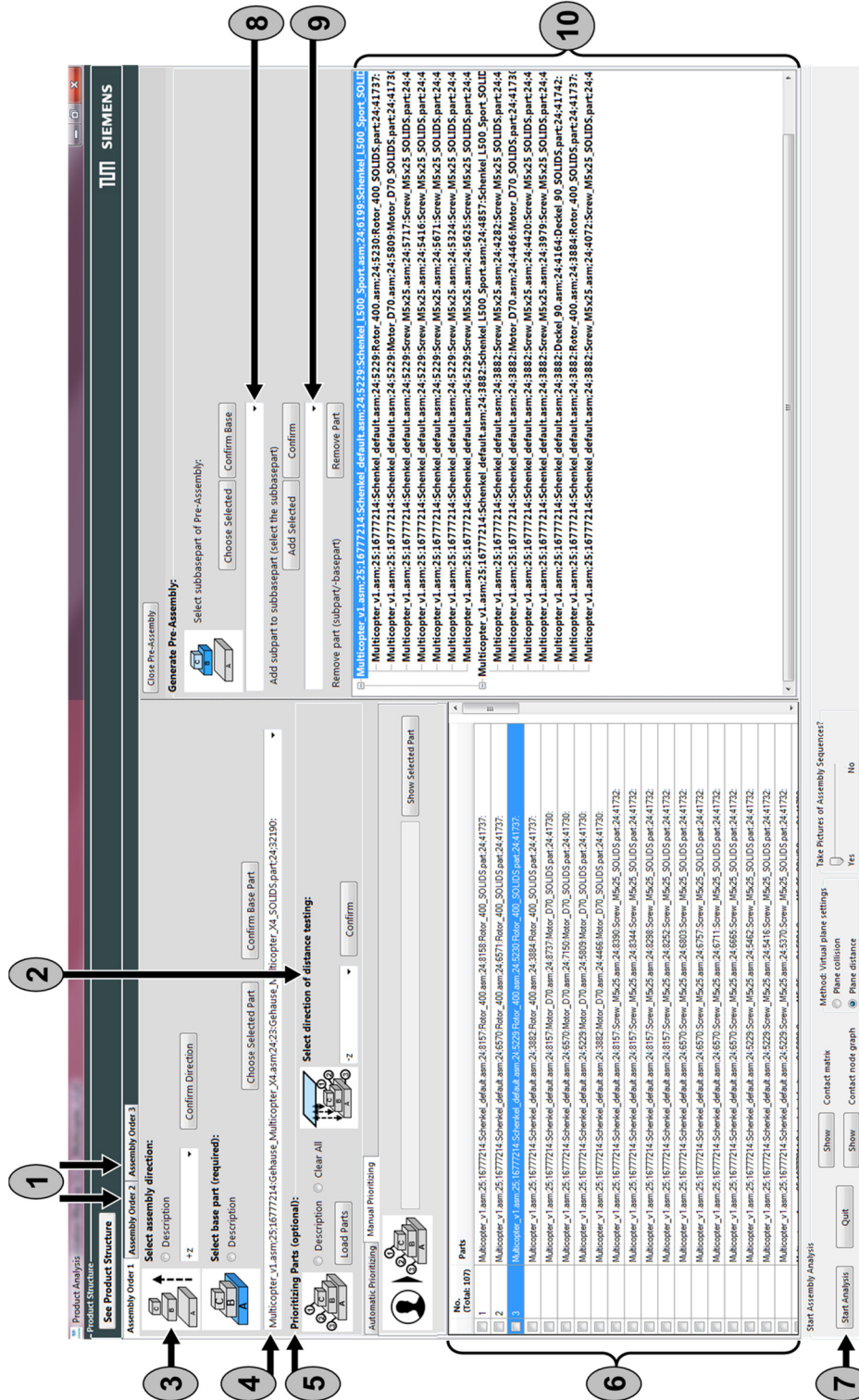


Abbildung 61: Bedienoberfläche zur manuellen Strukturierung des Produktes vor dem Assembly Sequence Planning.

Nach Auswahl des zu analysierenden Produkt-Modells werden Teamcenter Visualization sowie das ASP-Fenster geöffnet (Abb. 61). Das ASP-Fenster ermöglicht die manuelle Strukturierung des Produktes durch den Nutzer analog zu den Methoden aus Abschnitt 4.4.3. Das ASP-Fenster ermöglicht die Festlegung des Basisbauteils (4), der Hauptmontagerichtung (3), der Orientierung der Ebene für die Ebenenabstandsmessung (2) sowie die manuelle Priorisierung der Baugruppen für die Demontage (6) Die Definition von Vormontagen erfolgt durch die Auswahl eines Vormontage-Basisbauteils (8) und durch die Zuordnung weiterer Einzelteile (9). Definierte Vormontagen werden dargestellt. (10). Des Weiteren können unterschiedliche Montagereihenfolgen generiert werden (1).

Die Auswahl der unterschiedlichen Einzelteile und Baugruppen kann sowohl im Strukturbaum des Produktes als auch direkt durch Anklicken der Modelle in der 3D-Ansicht von Teamcenter Visualization erfolgen. Nach erfolgreicher Analyse des Produktes wird der eMVG₂ im Hauptfenster visualisiert.

9.1.3 Bedienoberfläche für die automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung

The screenshot displays a complex software interface for automated simulation-based work planning. It features several key components:

- Assembly Line Analysis (1):** A top-left panel with a menu and a chart showing performance metrics.
- Local Simulation (2):** A middle-left panel with a 3D model of a workstation and a 'Geometrical collision analysis' button.
- Global Simulation (3):** A middle-left panel with a 3D model of a workstation and a 'Task oriented kinematic analysis' button.
- Time and Monetary Evaluation (4):** A top-right panel with a 3D model and a '\$' icon.
- Assembly Order 1 (5):** A table showing process types and their status across different stations.
- Assembly Order 2 (6):** A table showing process types and their status across different stations.
- Assembly Order 3 (7):** A table showing process types and their status across different stations.
- Main Results (8):** A large central panel displaying simulation results, including a 3D model of a workstation and a table of results.
- Handling Processes (9):** A bottom-right panel showing a table of handling processes.

The interface is annotated with numbered circles (1-12) and arrows pointing to specific elements. A red bar at the bottom right contains the text: 'Quantitative Result: Schenkel_Sport_LO00_Motor_D70_WPB_WPT cannot be assembled on Schemel_Vormontage_NL_5_4 reconfigurations are necessary on 2 stations.'

Abbildung 62: Fenster zur Visualisierung der Planungsergebnisse der automatischen simulationsgestützten Arbeitsablaufplanung.

Das Fenster zur Arbeitsablaufplanung dient der Visualisierung der phasenabhängigen Planungsergebnisse der Arbeitsablaufplanung (vgl. Abb. 62). Es visualisiert die Arbeitspläne in Form des eMVG₃ (6), des eMVG₄ und des eMVG₅ (8) für die unterschiedlichen Montagereihenfolgen (5) und Restriktionen (7). Des Weiteren stellt es die Handlungsempfehlungen für die unterschiedlichen Rollen (10) sowie die Ergebnisse der wirtschaftlichen Bewertung der Arbeitspläne dar (11). Die Ausführung der sequentiell nacheinander erfolgenden Planungsschritte qualitativer und quantitativer Abgleich, Austaktung (1), lokale (2) und globale Simulation (3) erfolgen in dem Fenster manuell durch den Nutzer. Zusätzlich werden die aktuellen Ergebnisse des Planungsschrittes in einer Statuszeile zusammengefasst (12).

9.1.4 Referenzszenario 1 - „Einführung einer neuen Produktvariante“



Abbildung 63: Hauptfenster: Darstellung der Montagereihenfolge des Schenkels nach dem ASP. Die unterschiedlichen Startbaugruppen, Endbaugruppen mitsamt der zugehörigen Montagezustände sind dargestellt.

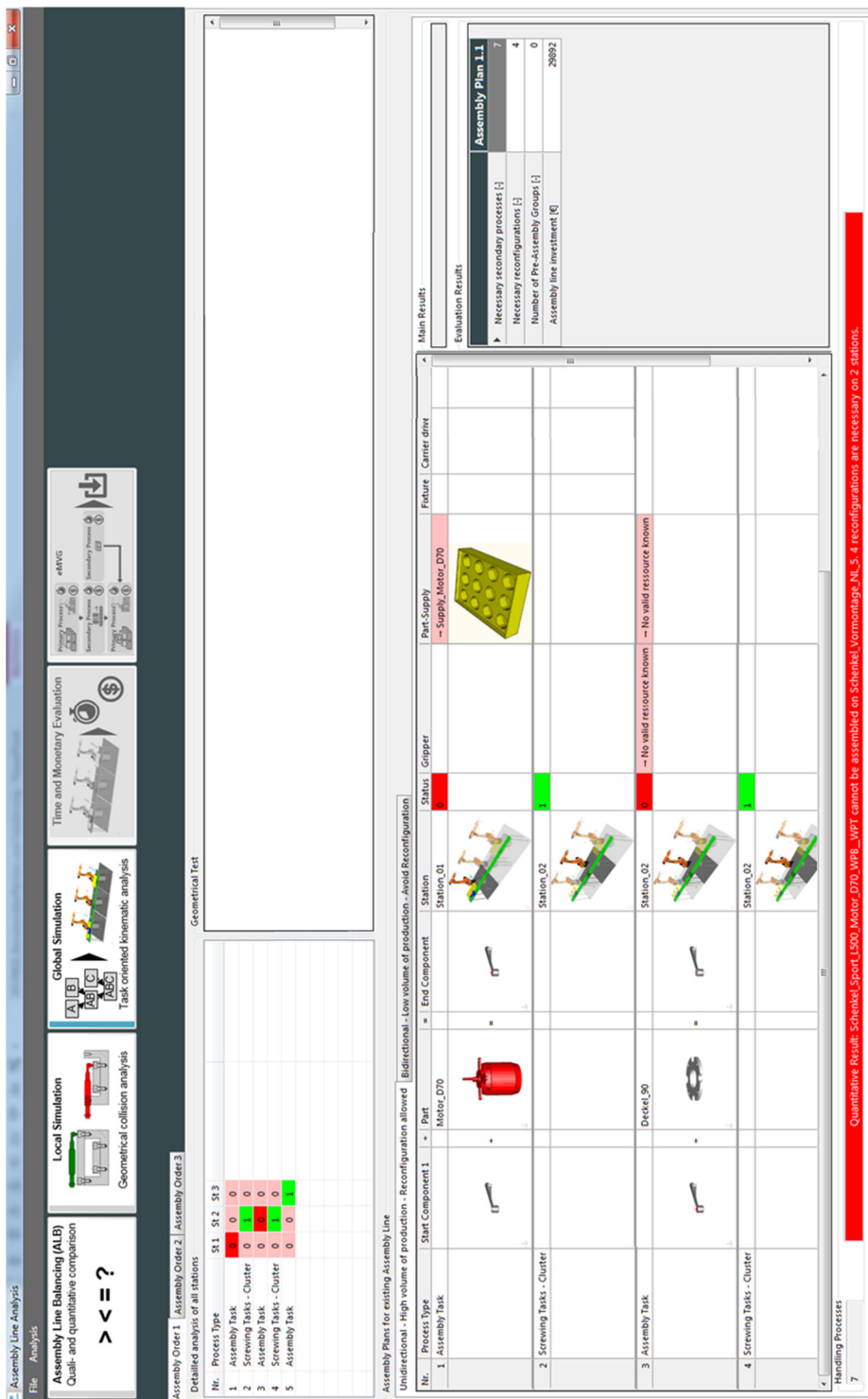


Abbildung 64: Fenster zur Visualisierung der Planungsergebnisse: Ergebnis des qualitativ-quantitativen Abgleichs sowie der Austaktung für die ungeeignete Montagelinie. Es wurde die Notwendigkeit der Beschaffung geeigneter, bisher unbekannter Ressourcen für die Sicherung und Bereitstellung des Deckels ermittelt. Des Weiteren wurde die Notwendigkeit der Rekonfiguration von Station 1 ermittelt und die Handlungsempfehlung zum Hinzufügen einer bekannten Bereitstellung für den Motor visualisiert.

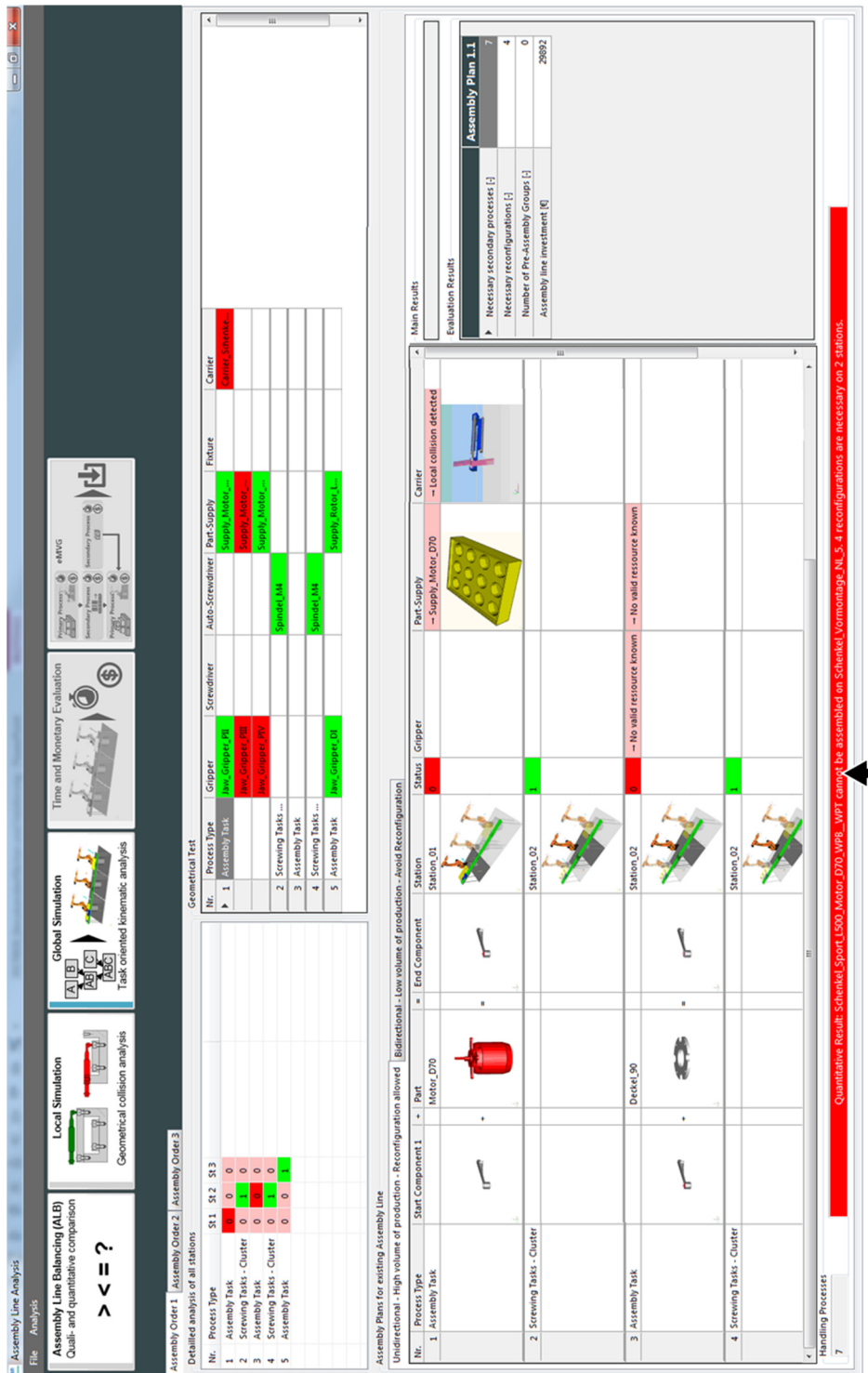


Abbildung 65: Fenster zur Visualisierung der Planungsergebnisse: Ergebnis der Synthese-Methode nach der lokalen Prüfung für die ungeeignete Montagelinie. Die Kollision mit dem Werkstückträger wird erkannt und visualisiert.

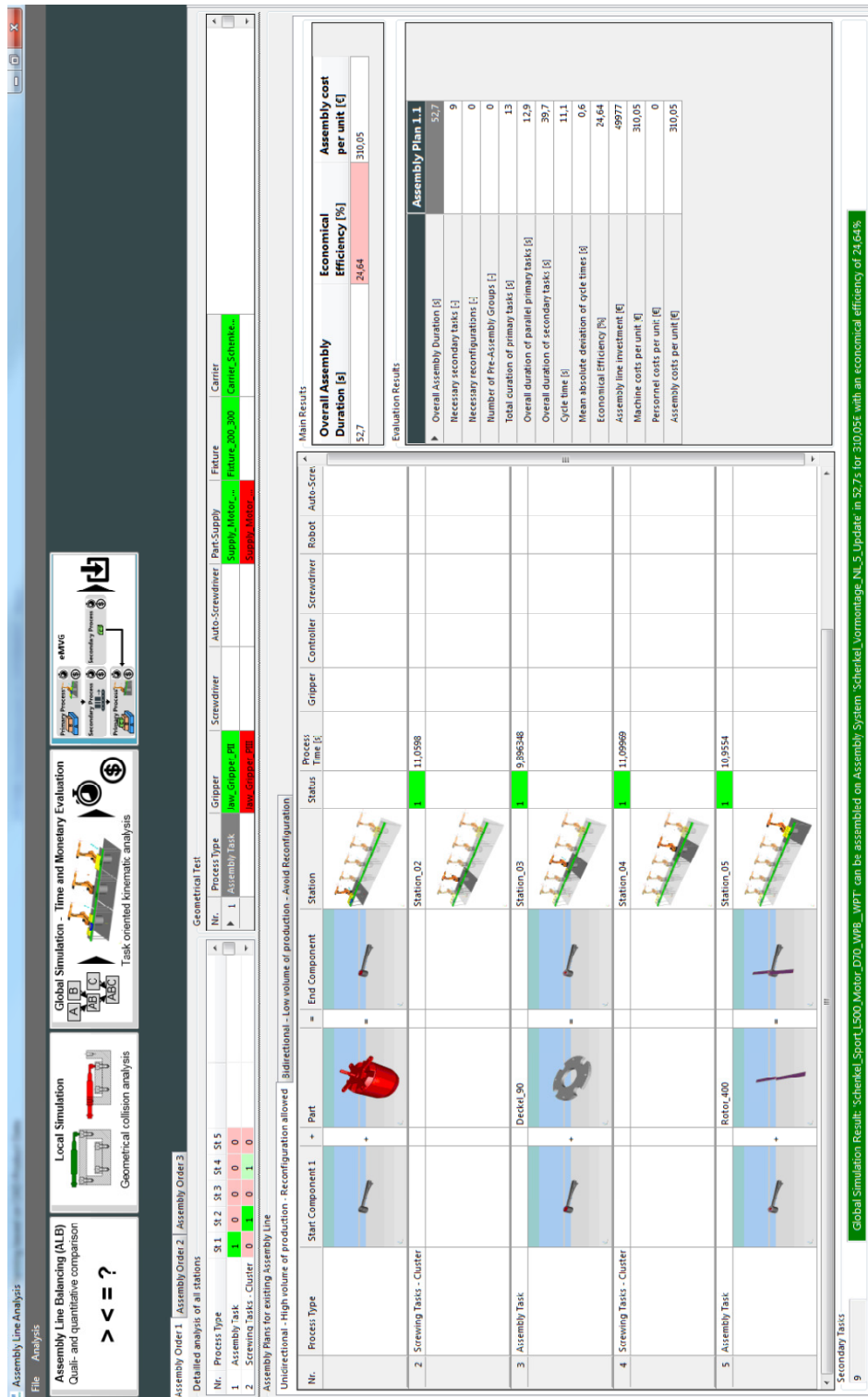


Abbildung 66: Fenster zur Visualisierung der Planungsergebnisse: Ergebnis der Synthese-Methode nach der lokalen Prüfung für die aktualisierte Montagelinie mit 5 Stationen und den geeigneten Ressourcen nach der globalen Simulation. Alle Anforderung-Tasks wurden erfolgreich Stationen zugewiesen, die entsprechend visualisiert sind. Zudem sind alle Kriterien der wirtschaftlichen Bewertung von Arbeitsplänen im Fenster dargestellt.

9.1.5 Referenzscenario 2 - „Planung einer Montagereihenfolge für eine Montagelinie“

The screenshot shows the Siemens software interface for assembly sequence planning. The main window displays a grid of tasks with start and end components. The left sidebar contains navigation options like 'New Product', 'Import Resource Library', and 'Import Assembly System'. The right sidebar shows 'List of Workstations' with columns for Manual, Automatic, Robot, and Gripper.

Nr.	Task Type	Part	Screw Cluster	Screw Count	Weight	Start Component	End Component
10	Assembly Task	Akku_Halterung...	0	0	0	Start Component 1	End Component 2
11	Screwing Tasks - Clu...		1	4	0	Start Component 1	End Component 2
12	Assembly Task	Akku_Halterung...	0	0	0	Start Component 1	End Component 2
13	Screwing Tasks - Clu...		1	4	0	Start Component 1	End Component 2
14	Assembly Task	Platine_1_L180_...	0	0	0	Start Component 1	End Component 2
15	Screwing Tasks - Clu...		2	2/4	0	Start Component 1	End Component 2
16	Assembly Task	Platine_2_L90_B80	0	0	0	Start Component 1	End Component 2

Abbildung 67: Darstellung der Montagereihenfolge des Hauptkörpers, die mittels ASP generiert wurde, im Hauptfenster. Die unterschiedlichen Startbaugruppen und Endbaugruppen mitsamt der zugehörigen Montagezustände werden dargestellt. Die Vormontage in Form der Platine mit Kühler ist als eine Startbaugruppe zusammengefasst.

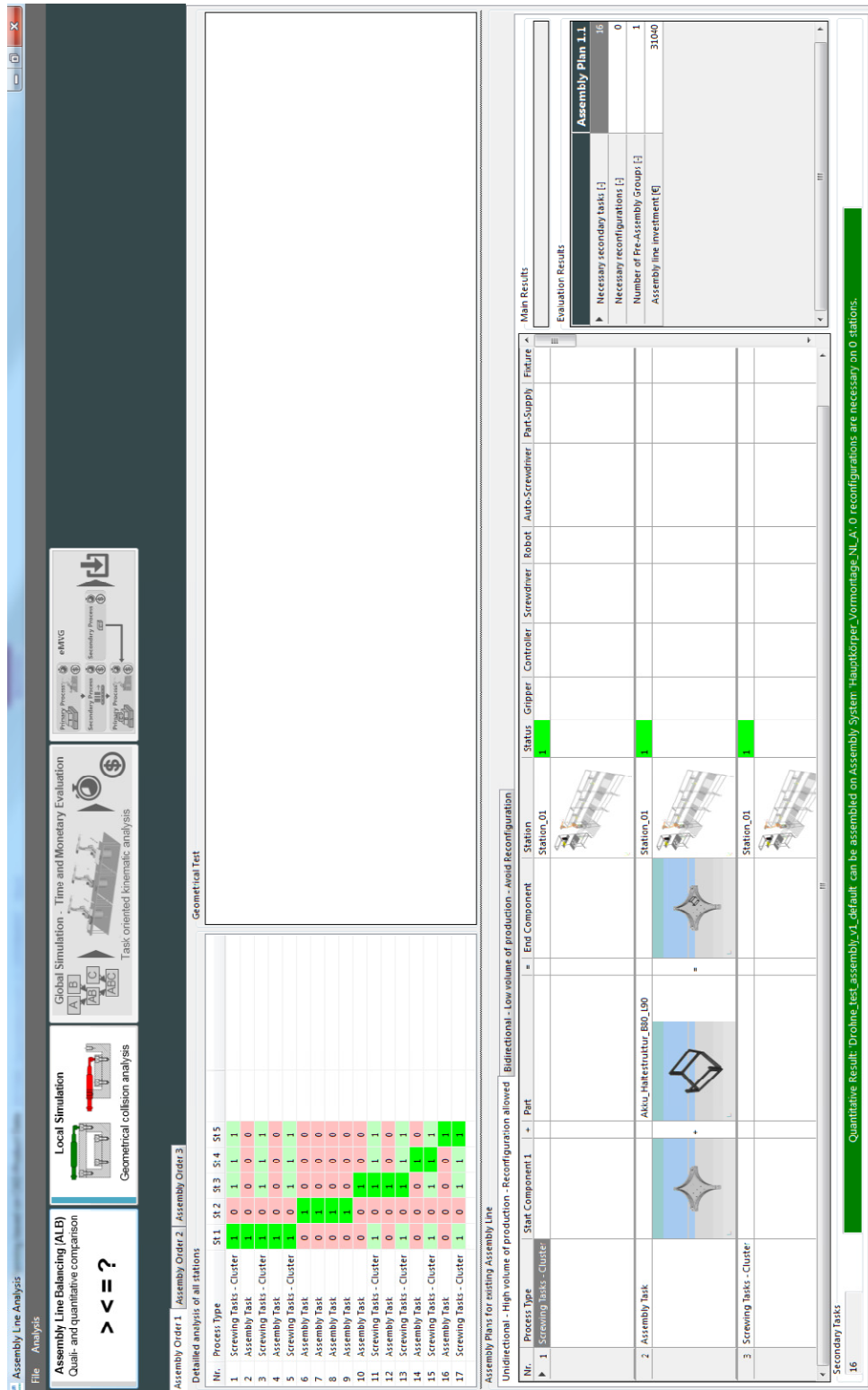


Abbildung 68: Fenster zur Visualisierung der Planungsergebnisse: Ergebnis des qualitativ-quantitativen Abgleiches sowie der Austattung. Der gesamte eMVG₂ und ein Teil des eMVG₃ sind dargestellt. Im eMVG₃ sind die Tasks mitsamt den zugehörigen Start- und Endbaugruppen eindeutig Stationen zugeordnet, die zusätzlich grafisch hervorgehoben sind.

9.2 Liste betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften in den Jahren 2012 bis 2017 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die folgenden studentischen Arbeiten. In diesen wurden verschiedene Fragestellungen zur automatischen simulationsgestützten Arbeitsplanung untersucht. Die gemeinsam erarbeiteten Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden sehr herzlich für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit. Bachelorarbeiten sind im Folgenden mit BA, Semesterarbeiten mit SA und Masterarbeiten mit MA abgekürzt.

- Abele. M.: Betriebsmittelauswahl und Layoutplanung in Montagesystemen anhand von CAD-Produktdaten (SA)
- Barton. B.: Methoden zur automatischen Bestimmung valider Montagereihenfolgen aus CAD-Baugruppen-Daten (MA)
- Gonnermann. C.: Automatische simulationsgestützte Montageplanung anhand von CAD-Produktdaten unter Berücksichtigung der Produkt und Anlagenflexibilität (SA)
- Gonnermann. C.: Methode zur simulationsgestützten Synthese von graphenbasierten Anlagen- und Produktmodellen in rekonfigurierbaren Montagesystemen (MA)
- Haas. N.: Automatische Generierung von virtuellen Repräsentanzen Cyber-Physischer Produkte aus CAD-Daten (BA)
- Heuss. L.: Graphenbasierter digitaler Zwilling des Produkts in der automatisierten flexiblen Montageplanung (SA)
- Juna. M.: Konzeption und Entwicklung einer Software zur automatischen simulationsgestützten Montageplanung für Cyber-Physische-Produktionssysteme (SA)
- Juna. M.: Automatische Generierung optimaler Montagepläne durch Prozesssimulation anhand von CAD-Produktdaten in rekonfigurierbaren Produktionssystemen (MA)
- Kraus. C.: Automatisierte Montageplanung für variantenreiche Produkte in modularen Produktionssystemen (MA)

-
- Laudahn. S.: Entwicklung einer Methodik zur automatisierten Ermittlung und Visualisierung von Arbeitsräumen in Roboterzellen mit Cyber-Physischen Komponenten (BA)
- Laudahn. S.: Modellierung von Cyber-Physischen Roboterzellen zur automatisierten Kollisionsprüfung und Bahnplanung (SA)
- Nickel. M.: Softwarebasierte Generierung virtueller Repräsentanzen Cyber-Physischer Produkte am Beispiel der roboterbasierten Montage von Lego (BA)
- Rotar. A.: Entwicklung einer Methode für die produktorientierte Formulierung der Prozessanforderungen und -parameter in der Montagetechnik (BA)
- Rotar. A.: Entwicklung einer Software für die simulationsgestützte Betriebsmittelauswahl bei der kamerabasierten Lagebestimmung von Bauteilen (SA)
- Reiser. R.: Simulationsbasierte Anforderungsanalyse virtueller Repräsentanzen Cyber-Physischer Betriebsmittel in Roboterzellen (SA)
- Reiser. R.: CAD-basierte automatische Montageplanung für Schraubprozesse bei der Siemens AG (MA)
- Schmitt. C.: Entwicklung der Grundlage für eine Softwarearchitektur zur aufgabenorientierten Roboterprogrammierung von Cyber-Physischen Roboterzellen (BA)
- Schmitt. C.: Entwicklung und Aufbau eines Cyber-Physischen Roboterzellen-Demonstrators zur aufgabenorientierten Montage von Lego (SA)
- Schmitt. C.: Entwicklung und Implementierung einer Software zur aufgabenorientierten Programmierung von Cyber-Physischen-Systemen in der roboterbasierten Montage (MA)
- Schwegler. D.: Automatische Generierung und Planung von Montageprozessen anhand von geometrischen Modellen von Bauteilen und Betriebsmitteln (SA)
- Serra. D.: Assembly Sequence Planning in Modular Production Systems Based on Analysis of CAD Product Data (MA)

- Sievers. M.: Entwicklung einer Methode zur Ermittlung der quantitativen und qualitativen Gesamtfunktionalität von automatisierten Montageanlagen durch die Verwendung von Cyber- Physischen Systemen (BA)
- Sievers. M.: Automatische Generierung von Montageplänen in Cyber-Physischen Roboterzellen (SA)
- Zhai. S.: Funktionen und Nutzen der fähigkeitenbasierten und automatischen Montageplanung in unterschiedlichen Planungsphasen (SA)