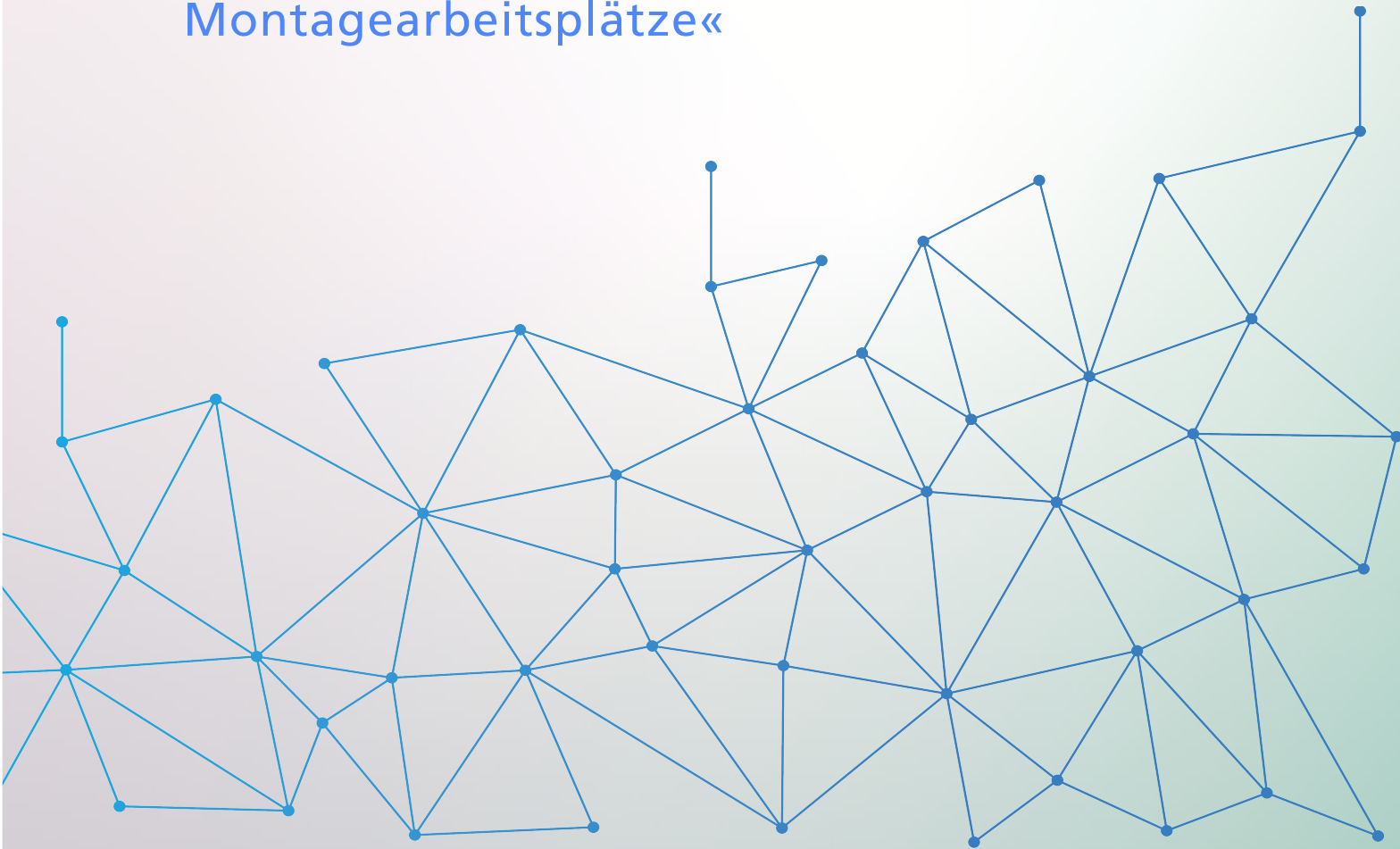


Manuel Fechter

»Entwicklung einer automatisierten
Methode zur Grobplanung hybrider
Montagearbeitsplätze«



STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG BAND 132

Manuel Fechter

»Entwicklung einer automatisierten Methode zur Grobplanung
hybrider Montagearbeitsplätze«

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl^{1,2}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer^{1,3}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke⁴

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber^{1,2}

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

² Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart

³ Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart

⁴ Institut für Photovoltaik (*ipv*) der Universität Stuttgart

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12
70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-1100
info@ipa.fraunhofer.de
www.ipa.fraunhofer.de

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

D 93

Erscheinungsjahr 2022

Druck und Weiterverarbeitung:

Fraunhofer Verlag Mediendienstleistungen, Stuttgart, 2022
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Wiedergabe, sind vorbehalten.

Entwicklung einer automatisierten Methode zur Grobplanung hybrider Montagearbeitsplätze

**Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung**

Vorgelegt von

Manuel Fechter

aus Leonberg

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller

Tag der mündlichen Prüfung: 06.10.2021

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2022

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Geschäftsfeldleiter Automotive am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA. Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl danke ich in besonderem Maße für die konstruktive Unterstützung und die Möglichkeit, verantwortungsvolle Aufgaben am Institut übernehmen zu dürfen.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller für die guten Diskussionen sowie die sorgfältige Durchsicht dieser Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Meinen ehemaligen Kollegen Carsten Seeber, Thomas Koch, Alexander Neb, Arik Lämmle, Ramez Awad, Johannes Wöbner, Susanne Oberer-Treitz, Erwin Groß, Susann Kärcher, Marco Huber und Werner Kraus danke ich für die fachlichen Diskussionen und Anregungen, das kritische Hinterfragen und die kollegiale Zusammenarbeit. Bedanken möchte ich mich an dieser Stelle auch bei meinen Studenten Marc-Sascha Pfeiffer, Shengjian Chen, Robert Keller und Raoul Schönhof, die einen maßgeblichen Beitrag zur Entstehung dieser Arbeit geleistet haben.

Ganz herzlich bedanke ich mich auch bei Frau Dr. phil. Birgit Späth, Herrn Jens Lüddecke und Herrn Alexander Richter, die mit sprachlicher und fachlicher Kompetenz meine Arbeit redigierten.

Meinen Eltern Sibille und Kurt Fechter danke ich dafür, dass sie mir durch ihre Unterstützung das Studium ermöglichten, das den Grundstein für diese Arbeit legte. Ein ganz besonderer Dank gilt Carolin Weinschenk, die während meiner Promotion auf viele gemeinsame Stunden verzichtete und mir stets liebevoll und mit viel Geduld sowie großem Engagement zur Seite stand. Ihnen allen widme ich diese Arbeit.

Stuttgart, im Januar 2022

Manuel Fechter

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entscheidungsunterstützung im Zuge der Grobplanung hybrider Montagearbeitsplätze. Der Schwerpunkt liegt auf der automatisierten Ressourcenauswahl und Arbeitsteilung im Zuge der Planung eines Montagearbeitsplatzes für die Mensch-Roboter-Kollaboration. Ausgehend von einer hybriden Montage wird eine Methode entwickelt, die in der Lage ist, technisch und wirtschaftlich sinnvolle Systemalternativen zu generieren, quantitativ zu bewerten und iterativ zu optimieren.

Mit diesem Vorgehen soll eine Entkopplung des Planungsergebnisses vom impliziten Erfahrungswissen und Kenntnisstand des Planers erreicht werden, um hybride Montagearbeitsplätze einem breiteren Anwendungskreis zugänglich zu machen. Dafür soll der zeitintensive, vorwiegend manuell ausgeführte Prozess der Recherche passender Ressourcen, der quantitativen und qualitativen Bewertung von Lösungsalternativen und die Zuordnung von Ressourcen auf Montageschritte automatisiert werden. Das entwickelte Vorgehen orientiert sich am V-Modell des Entwurfs mechatronischer Systeme der VDI-Richtlinie 2206 und greift auf Methoden der Informationsmodellierung und mathematischen Optimierung zurück.

Die Methode berücksichtigt die Anforderungen aus Sicht des zu montierenden Produkts, der Ausprägung der Montageprozesse sowie der gegebenen Rand- und Umweltbedingungen. Anhand identifizierter Optimierungskriterien des hybriden Montagearbeitsplatzentwurfs wird ein iteratives Vorgehen der multi-kriteriellen Optimierung entwickelt. Aufgrund des exponentiellen Wachstums des kombinatorischen Lösungsraums und der Annahme unvollständiger Daten- und Informationsmodelle werden vornehmlich heuristische Verfahren zur Optimierung der Systemlösungen verwendet.

Die Methode wird als Softwareapplikation beispielhaft implementiert und anhand von drei Anwendungsbeispielen validiert. Es gilt, das heuristische Lösungsverfahren zu identifizieren, das in kurzer Zeit, mit einer hohen Wahrscheinlichkeit den optimalen Systementwurf approximiert.

Zur Validierung werden die Ergebnisse der eingesetzten Heuristiken mit dem Lösungsbaum einer vollständigen Enumeration und den Resultaten einer Expertenbefragung verglichen. Es zeigt sich, dass das methodische Vorgehen der automatisierten Grobplanung in der Lage ist, Expertenergebnisse zu reproduzieren und im Zuge der Optimierung technisch bessere Systemlösungen zu generieren. Der Beweis der Gültigkeit der zugrundeliegenden Regeln und Informationsmodelle ist damit erbracht.

Die detaillierte Untersuchung der heuristischen Lösungsverfahren ermöglicht Aussagen zur Reproduzierbarkeit der Optimierungsergebnisse, der erzielbaren Ergebnisqualitäten und Laufzeit der Verfahren. Es zeigt sich, dass insbesondere heuristische Lösungsverfahren die Optimierung alternativer Arbeitsplatzlösungen beschleunigen. Das Vorgehen entlastet den Planer und erlaubt ihm, in kurzer Zeit mehrere Lösungsalternativen, mit unterschiedlichen Rand- und Umweltbedingungen zu iterieren und miteinander zu vergleichen.

Abstract

The presented thesis examines decision support during the early stages of rough planning of hybrid assembly workplaces. An optimized resource allocation and task sharing during the design of a human-robot collaboration workplace is in the focus of this work. Therefore, a method for rough system planning for collaborative assembly is developed which is capable to automatically generate, evaluate and iteratively optimize alternative assembly systems with respect to technical and economical constraints and boundaries.

Making use of heuristic methods, an iterative optimization cycle is instantiated which helps to support manual efforts during workplace design.

The main purpose of this method is to decouple the stage of rough planning in workplace design from the implicit experiences and knowledge of the individual design engineers. Furthermore, the method aims at simplifying the conceptual design stage and thereby helps to implement hybrid assembly workplaces to a wider range of applications. For this purpose, the time-consuming, mainly manually executed process of identifying suitable resources, the quantitative and qualitative evaluation of design alternatives and the allocation of resources to assembly tasks shall be automated. The developed method is based on the V-model for mechatronic system design described by VDI 2206 and combines semantic information modelling and heuristic optimization technologies.

During the stage of rough planning, the method takes into account the requirements described by product and processes as well as given constraints and environmental conditions of the hybrid assembly scenario. Therefore, relevant optimization criteria for hybrid workplace design are identified and an iterative procedure of multi-criteria optimization using heuristics is implemented. Due to the exponential growth of the combinatorial solution space and the assumption of incomplete data and information models, heuristic methods are primarily used for optimization.

The method is validated using a software application and three exemplary applications. To validate the heuristic performances, the results are compared to the solution tree of a full enumeration and the results of an expert survey. It is shown that the described

method is capable to reproduce expert planning results and to generate technically better workplace solutions in the course of optimization. Thus, the proof of the underlying rules and information models is provided.

A comparison of the heuristic algorithms allows statements on the reproducibility of results, the achievable result quality and the average runtime for optimization. It is shown that heuristic solutions accelerate the optimization of alternative assembly workplaces. The achievable time gain relieves the workplace planner and allows him to iterate and compare multiple alternatives with different constraints and environmental conditions.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	17
Abbildungsverzeichnis	19
Tabellenverzeichnis	23
1 Einleitung	25
1.1 Ausgangssituation	25
1.2 Herausforderungen	32
1.3 Problemstellung	35
1.4 Zielsetzung und Forschungsfrage	39
1.5 Lösungshypothese und Forschungskonzeption	42
1.6 Aufbau der Arbeit	45
2 Grundlagen und theoretischer Bezugsrahmen	49
2.1 Begriffsdefinitionen	49
2.2 Vergleich der Produktionssysteme	55
2.3 Montagesysteme und Mensch-Roboter-Kollaboration	60
2.4 Planung von Montagesystemen	69
2.5 Informationsmodellierung	76
3 Stand der Technik	89
3.1 Forschungsspezifische Planung von MRK-Montagesystemen	89
3.2 Kosten- und Investitionsrechnung	95
3.3 Optimierungsproblem	103
3.4 Folgerungen aus dem Stand der Technik	110
4 Rahmenbedingungen und Einschränkungen	113
4.1 Entwurf hybrider Montagearbeitsplätze	113
4.2 Zielgrößen hybrider Montagearbeitsplätze	119

4.3	Bewertungs- und Optimierungskriterien	121
5	Methode der optimierten Planung	127
5.1	Detaillierte Beschreibung des Planungsablaufs	128
5.2	Modellierung und Datenaustausch	131
5.3	Ressourcenallokation auf Prozessschritte	132
5.4	Spezifizierung des Optimierungsproblems	134
5.5	Quantifizierung der Optimierungskriterien	143
5.6	Generierung alternativer Montagearbeitsplätze	159
5.7	Ableitung einer dimensionslosen Fitnessfunktion	161
5.8	Iteratives Vorgehen der Optimierung	162
5.9	Lösungsverfahren	166
6	Validierung und kritische Bewertung der entwickelten Methode	179
6.1	Anwendungsbeispiele	179
6.2	Vorgehensweise der Validierung	183
6.3	Ergebnisse der Validierung	186
7	Zusammenfassung und Ausblick	199
7.1	Zusammenfassung	199
7.2	Validierung der Arbeitshypothesen	201
7.3	Ausblick und Anknüpfungspunkte weiterführender Forschung	204
	Literaturverzeichnis	211
A	Betreute studentische Arbeiten	243
B	Implementierung der Softwareapplikation	245
B.1	Modellierung der Systemlösungen	245
B.2	Datenverarbeitung – Backend	249
B.3	Benutzeroberfläche – Frontend	250
C	Expertenbefragung	254

D	Daten der Anwendungsbeispiele	256
D.1	Produktdaten »Schraubbaugruppe«	257
D.2	Produktdaten »Aufnahme Dachgepäckträger«	258
D.3	Produktdaten »Vormontage Schwenklager«	259
D.4	Definition der Optimierungskriterien	261
D.5	Definition der Annahmen der Kostenrechnung	262
E	Ergebnisse der Validierung	263
E.1	Ergebnisse der Expertenbefragung	263
E.2	Ergebnisse der vollständigen Enumeration	266
E.3	Ergebnisse der heuristischen Optimierung	270

Abkürzungsverzeichnis

AAS	Asset Administration Shell
AML	Automation Markup Language
BaSys	Referenzarchitektur für Produktionssysteme
CAAP	Computer Aided Assembly Planning
CAD	Computer Aided Design
CE	CE-Kennzeichnung nach EU-Verordnung 765/2008
CP	Constraint Programming
CPM	Core Product Model
DIN	Deutsche Industrie Norm
DML	Dedicated Manufacturing Line
DP	Design Phase
ECLASS	Datenstandard für Produkte & Dienstleistungen
EOP	End of Production
FJSSP	Flexible Job Shop Scheduling Problem
FMS	Flexible Manufacturing System
GUI	Graphical User Interface
HTA	Hierarchical Task Analysis
JIS	Just in Sequence
JSSP	Job Shop Scheduling Problem

JVM	Java Virtual Machine
KMU	Kleine & mittelständische Unternehmen
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LCC	Lifecycle Costing
LoA	Level of Automation
M2M	Machine-to-Machine
MBSE	Model-based Systems Engineering
MMS	Matrix Manufacturing System
MRK	Mensch Roboter Kollaboration
MTM	Methods-Time Measurement
NC	Numerical Control
NP	Nichtdeterministische Polynomialzeit
NPV	Net Present Value
OAM	Open Assembly Model
OEM	Original Equipment Manufacturer
OLP	Offline Programming
OPC-UA	Open Platform Communications Unified Architecture
OPC-UA-CS	OPC-UA Companion Specification
OSI	Open Systems Interconnection
OWL	Web Ontology Language
PDM	Produktdatenmanagement
PLM	Product Lifecycle Management
PPR	Produkt-, Prozess-, Ressourcentripel
RAMI4.0	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0

REFA	Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation
RMS	Reconfigurable Manufacturing System
ROI	Return on Investment
RPA	Robot Process Automation
RTM	Robot Time and Motion
SOA	Service-Oriented Architecture
SOP	Start of Production
SPARQL	SPARQL Protocol and RDF Query Language
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCO	Total Cost of Ownership
TSP	Traveling Salesman Problem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Abbildungsverzeichnis

1.1	Herausforderungen des Systementwurfs	27
1.2	Einsatzbereiche Montagesysteme	28
1.3	Management zeitabhängiger Komplexität im Lebenszyklus	29
1.4	Lösungsansatz eines rekonfigurierbaren Produktionssystems	31
1.5	Dominierende Produktionsparadigmen im Laufe der Zeit	32
1.6	Spannungsfeld der hybriden Montageplanung	33
1.7	Einflussfaktoren und Freiheitsgrade der Montageplanung	34
1.8	Spannungsfeld der Planung hybrider Montagearbeitsplätze	37
1.9	Darstellung des Optimierungsproblems	38
1.10	Wissenschaftssystematik nach Ulrich	43
1.11	Forschungsmethodisches Vorgehen	44
1.12	Heuristischer Bezugsrahmen	45
1.13	Struktur der Arbeit	46
2.1	Definition einer Produktstruktur	51
2.2	Zusammenhänge zwischen Produkt, Prozess und Ressource	52
2.3	Abgrenzung der Begriffe	56
2.4	Vergleich der Produktionssysteme	58
2.5	Stufen des Automatisierungsgrads	61
2.6	Klassifizierung der Montagesysteme	63
2.7	Interaktionsszenarien zwischen Mensch und Roboter	66
2.8	Limitierende Faktoren der MRK	68
2.9	Vergleich Vorgehensweisen Montageplanung	71
2.10	Vergleich Konzeptionsmethoden technischer Systemlösungen	74
2.11	Basisoperationen der Montage	80
2.12	Hierarchie der Montageaufgaben	81
2.13	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0	82

2.14 Einordnung AML im RAMI4.0	83
2.15 Strukturierung des AutomationML Dateiformats	84
2.16 Einordnung ECLASS im RAMI4.0	85
2.17 Einordnung OPC-UA im RAMI4.0	86
2.18 Einordnung BaSys im RAMI4.0	87
3.1 Montage- und Wandlungskosten	96
3.2 Vergleich der Montagestückkosten	97
3.3 Generischer Montagevorrang	104
3.4 Klassifizierung von Heuristiken	108
4.1 Betrachtungsebenen des Systementwurfs	114
4.2 Auszug aus der Ressourcenontologie	117
4.3 Darstellung PPR-Tripel und Montagearbeitsplatz	118
4.4 Vergleich manuelle und hybride Reihenfolgenplanung	120
4.5 Kostenrechnung im Leasingmodell	122
4.6 Bewertungskriterien für Montagesysteme	122
5.1 Methode der Arbeit	127
5.2 Vorgehen der Planungsmethode	128
5.3 V-Modell der VDI 2206	130
5.4 Übersichtsbild der Planungsmethode	131
5.5 Hierarchie der Montageressourcen	132
5.6 Hierarchie der Montageschritte	133
5.7 Vorgehen der Ressourcenallokation	133
5.8 Darstellung der Auswahlentscheidung an Ressourcen	138
5.9 Bewertung der technischen Eignung	144
5.10 Darstellung eines Montagevorrangs als Netzplan	148
5.11 Reihenfolgenplanung des Montageablaufs	149
5.12 Generierung einer Systemlösung	160
5.13 Graph einer Systemlösung	161
5.14 Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ressourcenauswahl	173
5.15 Vorgehen der hybriden Heuristiken	176

6.1	Anwendungsbeispiel »Schraubbaugruppe«	180
6.2	Anwendungsbeispiel »Aufnahme Dachgepäckträger«	181
6.3	Anwendungsbeispiel »Vormontage Schwenklager«	182
6.4	Vorgehen der Validierung	183
6.5	Darstellung der generischen Ressourcenklassen	188
6.6	Vergleich der aggregierten Häufigkeiten der Ergebnisqualitäten	194
6.7	Vergleich Lösungsverfahren »Schraubbaugruppe«	197
6.8	Vergleich Lösungsverfahren »Aufnahme Dachgepäckträger«	198
6.9	Vergleich Lösungsverfahren »Vormontage Schwenklager«	198
7.1	Digitaler Planungsprozess von Montagearbeitsplätzen	205
B.1	Excel-Eingabemaske der Ressourcenontologie	246
B.2	Implementierung eines Montagearbeitsplatzes in AutomationML	248
B.3	Grafische Benutzeroberfläche Planungstool	251
B.4	Grafische Benutzeroberfläche Optimierung	253
E.1	Statistische Verteilung Ergebnisqualitäten »Schraubbaugruppe«	271
E.2	Statistische Verteilung Optimierungszeit »Schraubbaugruppe«	271
E.3	Optimierungszeit - Ergebnisqualitäten »Schraubbaugruppe«	272
E.4	Statistische Verteilung Ergebnisqualitäten »Aufnahme Dachgepäckträger«	273
E.5	Statistische Verteilung Optimierungszeit »Aufnahme Dachgepäckträger«	273
E.6	Optimierungszeit - Ergebnisqualität »Aufnahme Dachgepäckträger«	274
E.7	Statistische Verteilung Ergebnisqualitäten »Vormontage Schwenklager«	275
E.8	Statistische Verteilung Optimierungszeit »Vormontage Schwenklager«	275
E.9	Optimierungszeit - Ergebnisqualitäten »Vormontage Schwenklager«	276

Tabellenverzeichnis

2.1	Gegenüberstellung der Produktionssysteme	59
2.2	Gegenüberstellung der technischen Konzeptionsmethoden	77
3.1	Gegenüberstellung der Verfahren der Ressourcenallokation	94
3.2	Gegenüberstellung der Methoden der Investitionsrechnung	103
4.1	Bewertungskriterien hybrider Montagearbeitsplätze	124
5.1	Vergleich zeitabhängiger Kosten	154
5.2	Vergleich einmaliger Fixkosten	157
6.1	Auszug der Ergebnisse der Expertenplanung	189
6.2	Vergleich der Lösungsmengen der Anwendungsbeispiele	191
6.3	Ergebnisqualitäten heuristischer Lösungsverfahren	193
6.4	Vergleich der Zeitbedarfe heuristischer Lösungsverfahren	196
A.1	Betreute studentische Arbeiten	243
B.1	Planungsdaten Mensch	247
C.1	Teilnehmer der Expertengruppe	254
C.2	Wichtigkeit der Optimierungskriterien eines PPR-Tripels	254
C.3	Wichtigkeit der Optimierungskriterien eines Montagearbeitsplatzes	255
D.1	Randbedingungen »Schraubbaugruppe«	257
D.2	Produkteigenschaften »Schraubbaugruppe«	257
D.3	Randbedingungen »Aufnahme Dachgepäckträger«	258
D.4	Produkteigenschaften »Aufnahme Dachgepäckträger«	258
D.5	Randbedingungen »Vormontage Schwenklager«	259
D.6	Produkteigenschaften »Vormontage Schwenklager«	260
D.7	Optimierungskriterien der Validierung	261

D.8	Annahmen der Kostenvergleichsrechnung im Leasingmodell	262
E.1	Vergleich Expertenlösung »Schraubbaugruppe«	264
E.2	Vergleich Expertenlösung »Aufnahme Dachgepäckträger«	265
E.3	Ergebnisse Enumeration »Schraubbaugruppe«	267
E.4	Ergebnisse Enumeration »Aufnahme Dachgepäckträger«	268
E.5	Ergebnisse Enumeration »Vormontage Schwenklager«	269

1 Einleitung

Der Trend einer kundenindividuellen Massenproduktion (Mass Customization) erfordert eine wachsende Flexibilität und Anpassungsfähigkeit eingesetzter Produktionsressourcen. Nur so können Produkte zu wettbewerbsfähigen Preisen auf Kundenwunsch gefertigt werden (Hu et al. 2008, S.45; Koren 2010, S.75f; Keddis et al. 2015, S.1901; Bauernhansl 2014, S.14).

Aus diesen Gründen sind moderne Produktionssysteme mit Herausforderungen konfrontiert, die bspw. eine Adaption an variierende Stückzahlen, die Produktion einer Vielzahl unterschiedlicher Produktvarianten oder die Integration neuer Produktfamilien verlangen, ohne dass diese explizit zum Zeitpunkt der Planung der Produktionssysteme berücksichtigt werden können (Heilala & Voho 2001, S.21; Koren 2010, S.77f; Landherr et al. 2013, S.107f; Feldmann 2014a, S.5). In diesem Kontext ist es möglich, dass sich die Anforderungen an das Produktionssystem schneller ändern, als sich die Investitionen in das System amortisieren können (Witte et al. 2013, S.318).

Zugrundeliegende Anforderungen beschreiben eine wachsende Individualisierung und Personalisierung der Produkte (Feldhusen & Grote 2013, S.770), volatilere Nachfrageszenarien, die aufgrund von Irregularitäten im Bestellverhalten und Saisonalität entstehen, kürzere Produkt- und Technologielebenszyklen sowie globale Verschiebungen der Absatzmärkte (März & von Langsdorff 2001, S.5; Berkholz 2008, S.13; Koren 2010, S.30f; Spath & Rally 2013, S.10, 14; Tepper & Witte 2013, S.68; Lotter 2014, S.489).

1.1 Ausgangssituation

Typischerweise werden Produktionssysteme auf einen vorab definierten idealen Betriebspunkt und einen prognostizierten Flexibilitätskorridor ausgelegt. Anhand der Prognose zu produzierender Stückzahlen erfolgt die Definition des Ressourcen- und Produktionsszenarios, wie bspw. die An- und Bereitstellung der Materialien, die Verkettung der Einzelschritte oder die Auswahl der eingesetzten Prozesstechnologien (Stegmüller & Zürn 2014, S.103f;

Koren 2010, S.7).

Der ideale Betriebspunkt eines Produktionssystems wird üblicherweise bereits zu einer frühen Phase der Planung (Schritt der Grobplanung) definiert und kann im Anschluss nur in engen Grenzen oder unter hohem finanziellen und technischen Aufwand verändert werden. Die zu dieser frühen Phase getroffenen Annahmen, insb. für zeitabhängige Leistungskriterien (bspw. Stückzahlen), sind in vielen Fällen mit Irrtümern behaftet (Spath & Rally 2013, S.15), nicht abschätzbar (Hentsch et al. 2013, S.274) oder aufgrund der Langlebigkeit der Produktionssysteme und Unsicherheit über die zukünftige Produktvarianz nicht vorhersehbar (Müller et al. 2013a, S.252).

In den allermeisten Fällen gehen mit zeitabhängigen, unvorhergesehenen Änderungen der Leistungskriterien eines Produktionssystems monetäre Verluste im Produktionsprozess einher (Koren 2010, S.156f). Sei es aufgrund nicht bedienter Nachfragen durch eine zu geringe Ausbringung oder einer hohen Kapitalbindung durch die Investition in leistungsfähige Produktionsressourcen und ein Vorhalten nicht benötigter Produktionskapazitäten (Hartel & Lotter 2012, S.372; Koren 2010, S.157).

Zum Zeitpunkt der Planung gibt es keinerlei Sicherheit, dass der angedachte Flexibilitätskorridor ausreicht, um den während des Lebenszyklus eines Produktionssystems auftretenden Veränderungen zu begegnen (Witte et al. 2013, S.319). Die Absicherung des Systementwurfs durch den Einsatz von Produktionskomponenten mit einem breiten, mitunter teureren Flexibilitätskorridor an Funktionalitäten kann dabei am ehesten mit einem Versicherungsmodell verglichen werden. Durch einen höheren finanziellen Beitrag (Investitionssumme, Planungsaufwand) kann das Risiko verringert werden, auf zukünftige, zeitabhängige Ereignisse unzureichend vorbereitet zu sein (Bauernhansl et al. 2012).

Die volatilen Randbedingungen aufgrund sich verändernder, funktionaler Anforderungskorridore ist in Abbildung 1.1 grafisch dargestellt. Weiterhin zeigt die Abbildung das Konzept definierter Betriebspunkte unter Berücksichtigung einer kontinuierlichen Rekonfiguration der funktionalen Leistungsfähigkeit des Systementwurfs in den Grenzen des Flexibilitätskorridors. DP beschreibt den Beginn des Systementwurfs, während SOP und EOP den Start und das Ende der Produktion bezeichnen. Die Darstellung berücksichtigt weiterhin einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP), der den Flexibilitätskorridor und somit die funktionale Leistungsfähigkeit des Systems über die Laufzeit der Produktion stetig

vergrößert. Weiterhin berücksichtigt Abbildung 1.1, dass Anpassungen des Betriebspunktes des Produktionssystems lediglich in definierten Sprüngen innerhalb des Flexibilitätskorridors möglich sind.

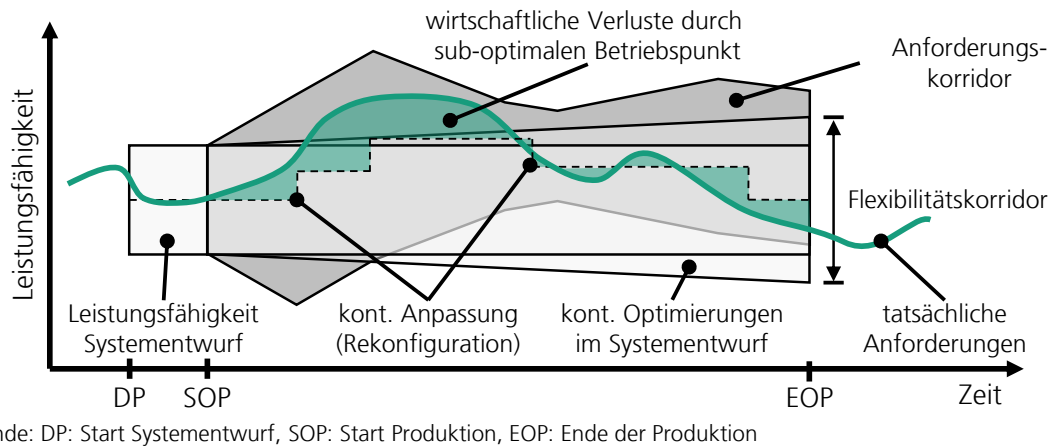


Abbildung 1.1: Herausforderungen des Systementwurfs eines rekonfigurierbaren Produktionssystems unter volatilen Randbedingungen, eigene Darstellung i.A.a. Koren (2010), Nyhuis et al. (2013) und VDI 5201

Aufgrund der Unsicherheit bzgl. zeitabhängiger Produktions-, Technologie- und Nachfrageszenarien unternehmen produzierende Betriebe große Anstrengungen, um den auftretenden Anforderungen über die initial angedachten Flexibilitätskorridore und Betriebspunkte des Systementwurfs hinaus zu begegnen und eine wirtschaftliche Produktion sicherzustellen (Kluge 2011, S.11).

Im Ausgangspunkt dieser Arbeit steht die vorherrschende Unterteilung der Produktion, in die manuelle Fertigung und Montage kleiner bis mittlerer Stückzahlen meist technisch komplexer Produkte sowie die automatische Fertigung und Montage standardisierter Produktgruppen großer Stückzahlen. Manuelle Arbeitsplätze der Fertigung oder Montage sind maßgeblich durch das Layout und die Struktur der Arbeitsorganisation definiert, wohingegen im Fall der Automatisierung standardisierte Prozesse die technische Ausgestaltung der Systeme dominieren. Der Lösungskorridor zur Abdeckung eines breiten Bereichs an Stückzahlen und Produktvarianten kann dabei nach Abbildung 1.2 weder vom manuellen, noch vom automatisierten Systementwurf, vollumfänglich bedient werden (Lotter & Wiendahl 2009, S.128f).

Hybride Montagesysteme, in der speziellen Form der Interaktion zwischen Mensch und Roboter auch MRK-Systeme genannt, repräsentieren einen technischen Montagesystem-

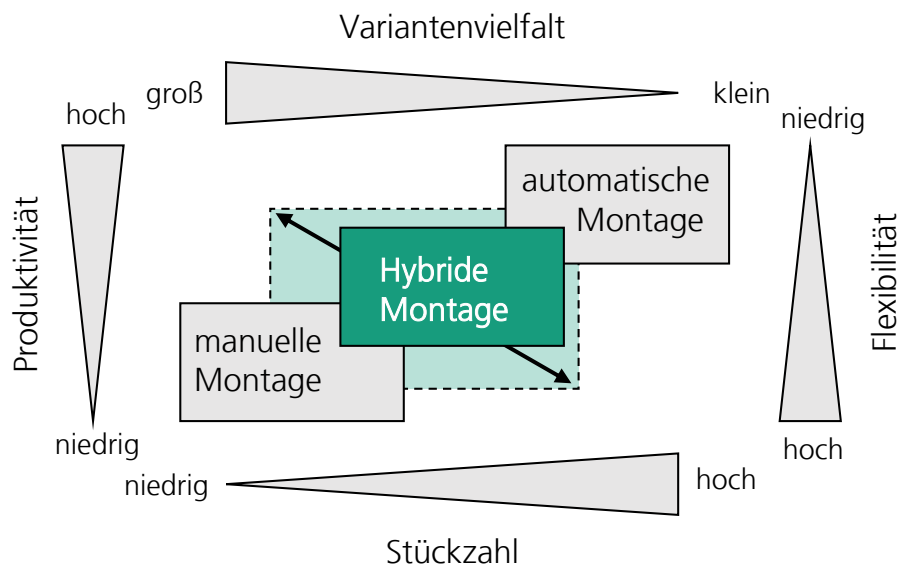
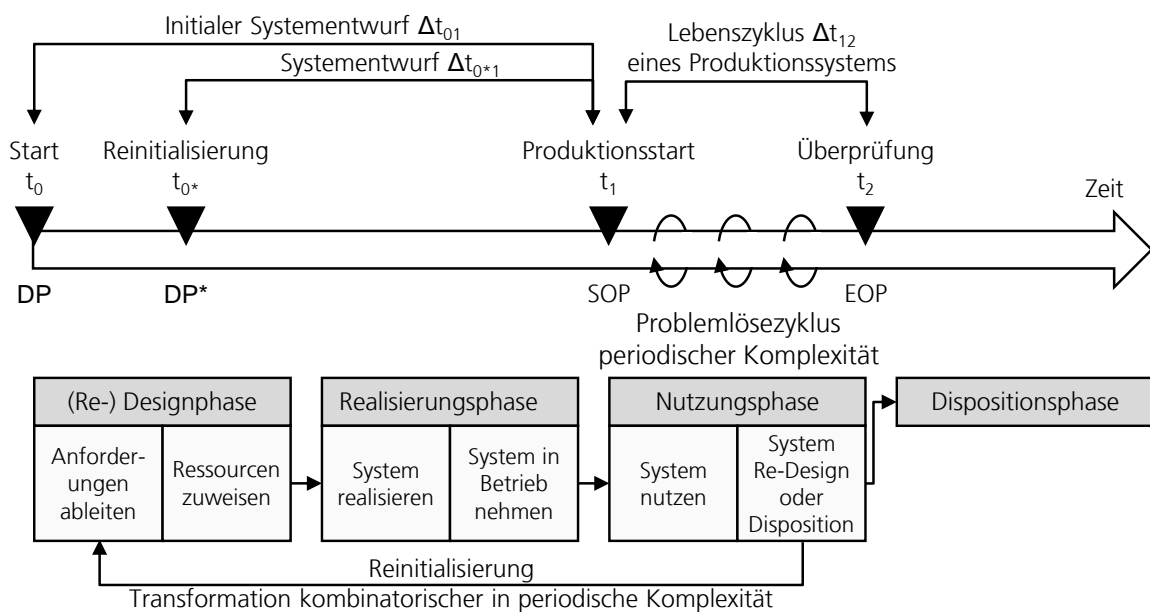


Abbildung 1.2: Einsatzbereiche manueller, hybrider und automatischer Montagesysteme (Lotter & Wiendahl 2009, S.128; Lotter 2012e, S.184) mit dem angedeuteten Optimierungspotential nach Bauer et al. (2015)

entwurf, diesen Anforderungen zu begegnen und über einen breiteren Stückzahlbereich wirtschaftlich zu produzieren (Lotter 2012e, S.167; Bauer et al. 2015, S.612; Fischer et al. 2017, S.8). Sie versprechen, die Vorteile einer manuellen und automatischen Produktion zu vereinen und die Eigenschaften beider Systementwürfe miteinander zu kombinieren, um das Prinzip der Komplementarität zwischen Mensch und Maschine zielführend zu nutzen (Fischer et al. 2017, S.11). Aufgrund der Anwesenheit des Menschen im Produktionsszenario erlaubt die MRK neben der Synthese technischer Funktionalitäten und Stärken von Mensch und Roboter, die kontinuierliche organisatorische Rekonfiguration der Arbeitsinhalte und -abläufe. So kann bspw. eine hohe Produktivität durch die Automatisierung wiederkehrender Prozessschritte mit der Flexibilität und Anpassungsfähigkeit manueller Tätigkeiten gepaart werden. Entsprechend Lotter (2012e, S.167) sind hybride Montagesysteme dabei explizit für die wirtschaftliche Montage kleinerer Produkte im mittleren Stückzahlbereich geeignet, wie es bspw. in Abbildung 1.2 dargestellt ist.

Die Erzielung operativer Exzellenz in der Produktion kann durch ein Lebenszyklusmodell von Produktionssystemen, vgl. Abbildung 1.3, beschrieben werden (Matt 2007; Lüder 2017, S.562). Produktionssysteme werden darin nicht mehr einmalig für ein vorab definiertes Szenario konzipiert, sondern kontinuierlich, entsprechend den real auftretenden Randbe-

dingungen, rekonfiguriert (Matt 2007; Wiendahl et al. 2007; Landherr et al. 2013, S.111f). Dies betrifft Anpassungen des Systementwurfs an neue Technologien und Stückzahlenszenarien sowie eine wertschöpfende Weiterverwendung der Produktionsressourcen nach dem Ende eines Produktlebenszyklus oder einer Produktionsphase (Tepper & Witte 2013, S.69). Das beschriebene Vorgehen nach Matt (2007) zielt darauf ab, den Aufwand zur Beherrschung der Komplexität eines Systementwurfs zu reduzieren. Dies kann einerseits durch die kontinuierliche Erfüllung der aktuell gültigen, funktionalen Anforderungen (zeitunabhängige Komplexität, Rekonfiguration) und andererseits durch die periodische Reinitialisierung (zeitabhängige Komplexität) des Systementwurfs zu diskreten Zeitpunkten erfolgen. Die Reinitialisierung hilft dabei, Änderungen der Rand- und Umweltbedingungen, die über den aktuellen Flexibilitätskorridor hinausgehen im Systementwurf zu berücksichtigen. Sie ist somit ein Mittel, den Systementwurf über einen längeren Zeitraum robust zu gestalten.



Legende: DP: Start Systementwurf, SOP: Start Produktion, EOP: Ende der Produktion

Abbildung 1.3: Management der zeitabhängigen Komplexität im Lebenszyklus des Systems Engineering, eigene Darstellung i.A.a. Matt (2007)

Die abgebildeten Problemlösezyklen (Rekonfiguration) lassen sich im Falle der hybriden Montage auf die Organisation der Arbeitsteilung und -abläufe zwischen Mensch und Roboter und die Planung der zugehörigen Arbeitsreihenfolge und Interaktion der Prozessschritte anwenden.

Die Reinitialisierungszyklen zwischen Nutzungs- und Designphase adressieren den Abgleich

der zeitunabhängigen Systemanforderungen aus Produkt, Rand- und Umweltbedingungen sowie der aktuellen Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit der eingesetzten und verfügbaren Ressourcen.

Durch die Anwesenheit des Menschen im Produktionsprozess der hybriden Montage ist ein direktes Feedback in den Entwurf vorhanden, der in die Anforderungsermittlung der Designphase zurückgespielt werden kann – vgl. Bauernhansl (2014, S.19). Bezogen auf das Lebenszyklusmodell nach Matt (2007) gilt es, die nicht prognostizierbare, zeitabhängige Komplexität des hybriden Produktionssystems, durch wiederkehrende Reinitialisierung des Montageszenarios aus Mensch, Roboter und Montageaufgabe in eine zu beherrschende periodische Komplexität zu transformieren. Dieser Ansatz erlaubt eine längerfristige Verwendung des Systementwurfs und eine potentielle Verlängerung der Nutzungsdauer der Ressourcen. Weiterhin kann jederzeit ein optimierter Betriebszustand identifiziert und eingestellt werden. Das Produktionssystem wird durch dieses Vorgehen »agil« (Matt 2010, S.182) und im Idealfall resilienter gegenüber Veränderungen der Rand- und Umweltbedingungen.

Abbildung 1.4 illustriert den Lösungsansatz der Beherrschung einer volatilen Produktion durch den Einsatz rekonfigurierbarer Produktionssysteme. Deutlich werden die geringeren wirtschaftlichen Verluste über die Zeit sowie die Möglichkeit, den technologischen Betriebspunkt des Systementwurfs über die Flexibilitätskorridore hinaus zu verschieben und stets optimal zu halten. Die Verschiebung des Betriebspunktes des Produktionssystems erfolgt im Schritt der Reinitialisierung. Dabei ist anzustreben, dass der Zeitraum der Design- und Realisierungsphase Δt_{01} so kurz wie möglich gehalten wird (Matt 2007).

Die Problemlösezyklen im Zuge der Nutzungsphase können für die kontinuierliche Rekonfiguration des Systementwurfs, bspw. die Organisation der Arbeitsteilung, verwendet werden. Die Sprungweite der Anpassung der funktionalen Leistungsfähigkeit eines Systems ist für den Zeitraum Δt_{12} zwischen SOP und EOP fix. Im Schritt Reinitialisierung des Systementwurfs kann dieses Kriterium aktiv beeinflusst werden.

Abbildung 1.5 illustriert den Paradigmenwechsel über Produktionsvolumina und -varianz und deren Einfluss auf die dominierenden Produktionsparadigmen im Laufe der Zeit. Eine zunehmende Modularisierung der Produktarchitektur induziert eine wachsende Produktvarianz, während die Produktionsvolumina je Variante abnehmen. Es ist davon auszugehen,

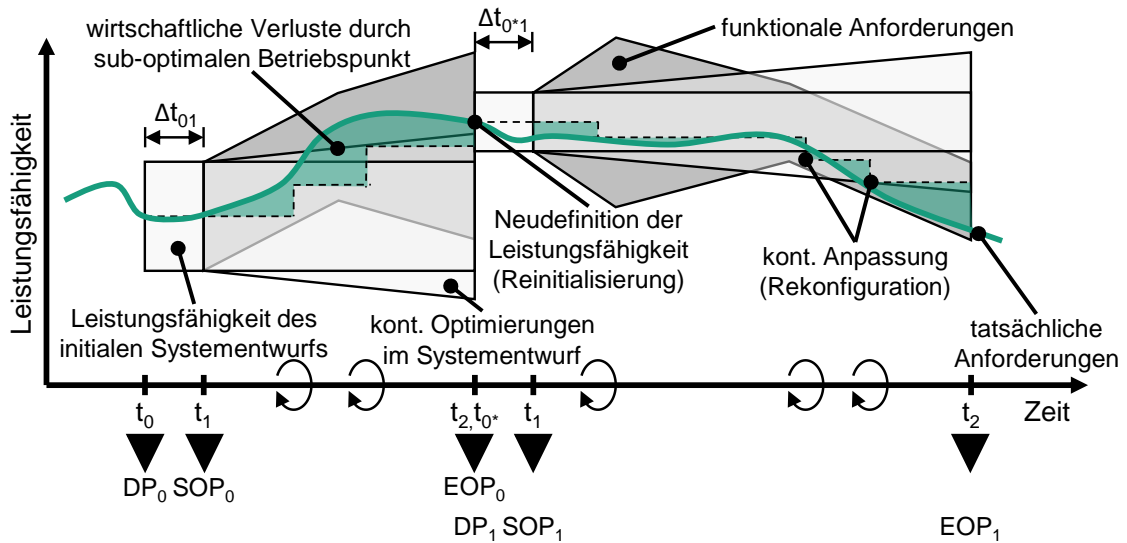


Abbildung 1.4: Lösungsansatz eines rekonfigurierbaren Produktionssystems, eigene Darstellung i.A.a. Matt (2007), Koren (2010), Nyhuis et al. (2013) und VDI 5201

dass sich der beschriebene Trend im Rahmen einer zunehmend personalisierten Produktion und einer fortschreitenden Regionalisierung der Märkte fortsetzen wird (Koren 2010, S.33).

Koren (2010, S.6f) prognostiziert in diesem Zusammenhang einen Bedarf an rekonfigurierbaren Produktionssystemen, um den Herausforderungen des Marktes zu begegnen. Entsprechend den Randbedingungen aus Produktionsvolumen je Stückzahl und Varianz der Bauteile und -gruppen sowie den dazugehörigen dominierenden Geschäftsmodellen der Produktion kann zwischen spezifischen Produktionslinien (Dedicated Manufacturing Lines, DML), flexiblen (Flexible Manufacturing System, FMS) und rekonfigurierbaren Produktionssystemen (Reconfigurable Manufacturing System, RMS) unterschieden werden. In Abbildung 1.5 ordnet Koren (2010, S.377) die beschriebenen Produktionssysteme den jeweils dominierenden Produktionsparadigmen zu.

Im Fall der RMS sind Produktionssysteme nicht mehr einmalig auf ein vorab definiertes Produkt- und Funktionsspektrum ausgelegt (vgl. DML), sondern in der Lage, sich kontinuierlich an sich verändernde Rand- und Umweltbedingungen anzupassen (Spur & Helwig 1986, S.591; Steegmüller & Zürn 2014, S.104). Dies kann einerseits durch im Systementwurf definierte Flexibilitätskorridore (FMS) oder durch Rekonfiguration des Systementwurfs (RMS) erfolgen (Heger 2007, S.2; Lotter 2014, S.511; Weber 2018, S.10f).

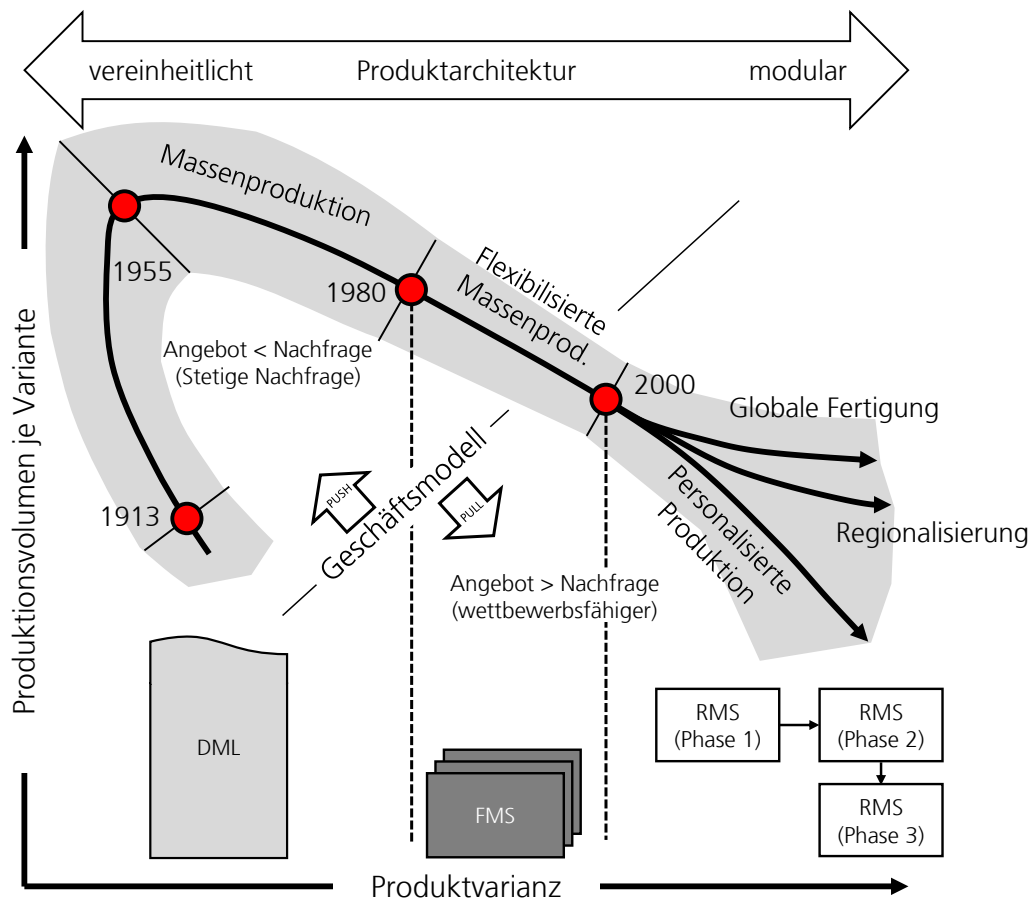


Abbildung 1.5: Ausprägung der dominierenden Produktionsparadigmen über die Änderungen der Produktvarianz und Produktionsvolumina im Laufe der Zeit (Koren 2010, S.377)

1.2 Herausforderungen

Die Herausforderungen einer wirtschaftlichen Systemgestaltung hybrider Montagearbeitsplätze unter Ausnutzung der technischen Potentiale und Eigenschaften von Mensch und Roboter stellen den gedanklichen Ausgangspunkt dieser Arbeit dar. Im Kern geht es darum, die Komplexität des Systementwurfs zu kapseln und mittels heuristischer Such- und Optimierungsverfahren quantifizierbare Lösungsalternativen im Schritt der Grobplanung automatisch zu generieren. Diese sollen als Entscheidungsgrundlage und Basis einer weiterführenden Planung (Feinplanung, Realisierung) dienen und damit den Anwendungsbereich hybrider Montagearbeitsplätze verbreitern. Insbesondere die bedarfsindividuelle Zuweisung von Arbeitsinhalten und die entsprechende Ablaufplanung zwischen Mensch und Roboter verspricht erhebliches Potential, die Wirtschaftlichkeit und Produktivität zu steigern

und über eine qualifikations- und persönlichkeitsfördernde Arbeit die Akzeptanz hybrider Montagearbeitsplätze zu steigern (Matthias & Ding 2013; Bauer et al. 2015).

Beim Entwurf hybrider Montagearbeitsplätze wird meist die Flexibilisierung konventioneller Robotersysteme mit trennender Schutzeinrichtung (KUKA AG 2019) oder die Automatisierung manueller Arbeitsinhalte aus Gründen der Rationalisierung direkter Lohnkosten als Ausgangspunkt der Gestaltung betrachtet (Feldmann 2014b, S.436f). Beide Zusammenhänge sind in Abbildung 1.6 dargestellt.

Eine Rationalisierung manueller Arbeit führt zu einer Verringerung variabler Kosten (Änderung der Steigung der Geraden) und eine Flexibilisierung automatischer Inhalte zu geringeren fixen Kosten (Verschiebung des horizontalen Ausgangswerts). Zu beachten ist, dass eine Steigerung des Automatisierungsgrades in den meisten Fällen mit einem Zuwachs an Komplexität des Systementwurfs und einer Abnahme der Flexibilität einhergeht. Ebenso wird in diesem Kontext der höhere Kontroll- und Steuerungsbedarf einer automatisierten Anlage oftmals nur unzureichend berücksichtigt (Fischer et al. 2017, S.9).

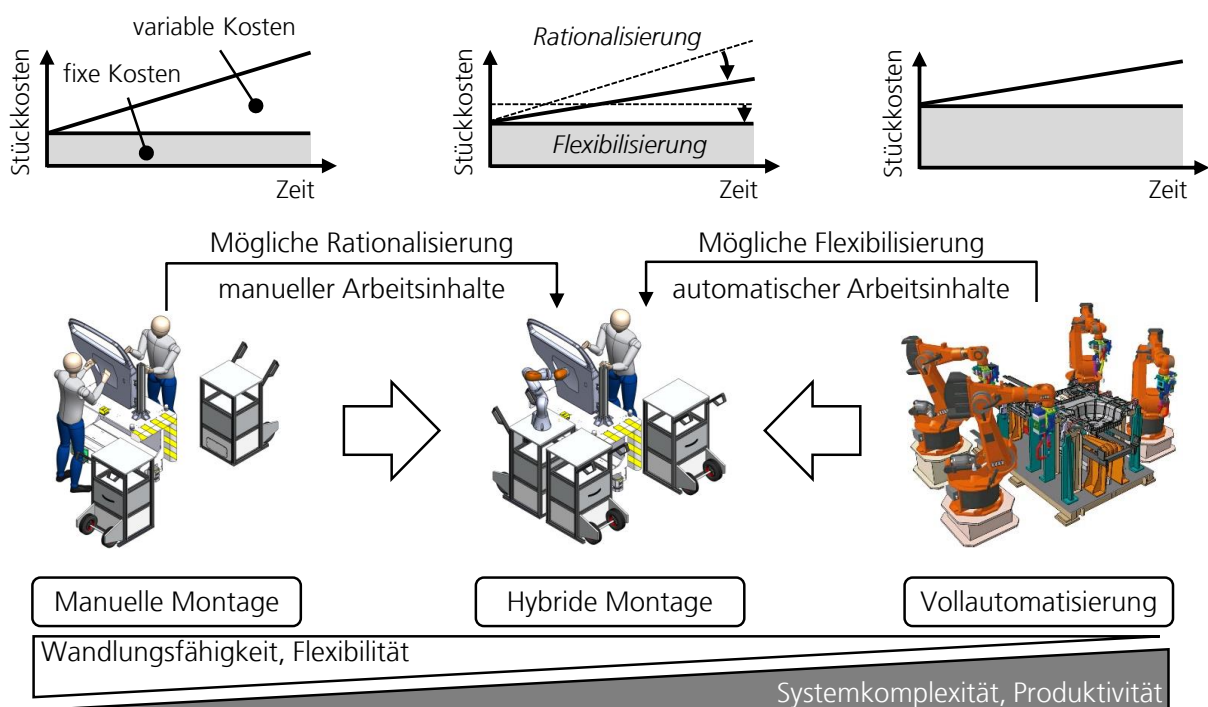


Abbildung 1.6: Spannungsfeld der hybriden Montageplanung inkl. qualitativer Darstellung der Stückkosten manueller, hybrider und automatischer Montagesysteme, eigene Darstellung i.A.a. Lotter & Wiendahl (2009, S.129), Lotter (2012b, S.3), Lotter (2012e, S.168), Feldmann (2014b, S.436f), Dietz (2019, S.71) und KUKA AG (2019)

Die Rekonfiguration und Konzeption eines hybriden Montagearbeitsplatzes schließt üblicherweise mehrere Themen- und Wissensfelder ein. Hierzu gehören Informationen aus der Analyse der Produktstruktur des zu fertigenden Produkts, die Identifikation erforderlicher Montageprozesse, die Auswahl geeigneter Produktionsressourcen sowie die Integration und Synthese unterschiedlicher Ressourcenkombinationen zur Optimierung des Gesamtentwurfs. Abbildung 1.7 visualisiert das grobe Vorgehen der Montageplanung und potentielle Einflussfaktoren, Freiheitsgrade und am Systementwurf beteiligte Kompetenzfelder.

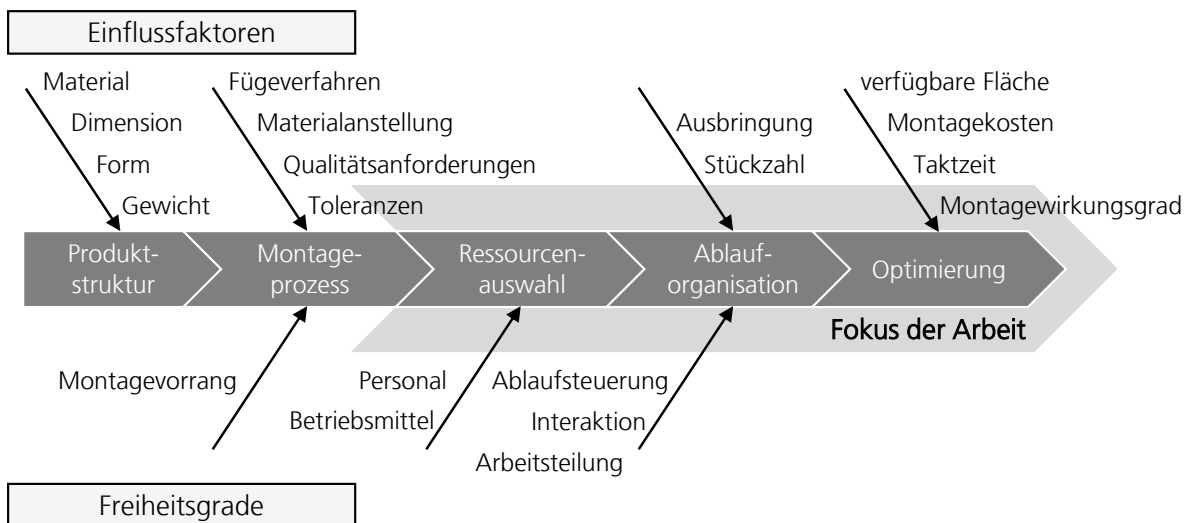


Abbildung 1.7: Grobes Vorgehen der Planung hybrider Montagearbeitsplätze inkl. Darstellung der Einflussfaktoren und Freiheitsgrade (ohne Anspruch auf Vollständigkeit). Farblich hervorgehoben ist der Fokus der Arbeit

Es ist davon auszugehen, dass die Häufigkeit kürzerer Produkt- und damit Produktionslebenszyklen (Schließmann 2014, S.453) sowie der inhaltliche Umfang der Maßnahmen zur Rekonfiguration eines Produktionssystems zukünftig zunehmen werden (Landherr et al. 2013, S.107f). Durch eine steigende Intelligenz der Systeme steigen darüber hinaus die Anforderungen zur Beherrschung der Komplexität des Produktionssystementwurfs (Fischer et al. 2017, S.10). Dies gilt umso mehr bei der Abschätzung langfristiger Effekte einer potentiellen Rekonfiguration in einem volatilen Marktumfeld (Gagsch & Herbst 2001, S.55).

Die heute in der Ausgestaltung von Produktionssystemen verwendeten, vornehmlich manuellen, Planungsansätze werden dabei in Bezug auf ihre Planungsgeschwindigkeit und die Größe des technisch möglichen Lösungsraums an Grenzen stoßen. Gründe hierfür können in der Begrenztheit des individuellen Experten- und Fachwissen des Planers und den zum

Zeitpunkt der Planung nur teilweise bekannten Umwelt- und Randbedingungen gefunden werden. Beide Restriktionen bergen die Gefahr, dass sub-optimale Produktionssysteme geplant, implementiert und nachfolgend betrieben werden.

Der Projektierungsanteil in der Kostenstruktur des Anlagenbaus beträgt mehr als 50% (Hirzle 2014, S.4), der maßgeblich durch manuelle Planungsleistung verursacht wird. Nach Großmann et al. (2013, S.227) gilt, dass rekonfigurierbare Montagesysteme nur dann erfolgreich sein werden, wenn der Aufwand der Rekonfiguration geringer ist als die ungeplanten oder im Rahmen der Flexibilität nicht vorgesehenen Änderungen und Ergänzungen. Reinhart et al. (2013, S.300) bestätigen diese Aussage, wonach der erforderliche Wandel stets mit geringen Kosten und geringem Zeitaufwand verbunden sein muss.

Untersuchungen zeigen, dass standardisierte Datenformate, geeignete Austausch- und Managementsysteme sowie eine automatische Generierung von Teilplänen («Automatisierung der Automatisierung») Produktivitätszuwächse versprechen (Biffel et al. 2017, S.193f) und damit erheblichen Einfluss auf potentielle Einsparungen im Unternehmen haben können. Das Einsparpotential durch Automatisierung unterstützender Tätigkeiten ist vermutlich größer, als es die Automatisierung mechanischer Tätigkeiten in der Produktion in den vergangenen Jahren aufgezeigt hat. Festzuhalten ist, dass diese Themen bisher nicht mit der gleichen Sorgfalt und Genauigkeit untersucht wurden, wie eine vergleichbare Automatisierung der Fertigungsprozesse (Flehsig et al. 2019).

Die robotergestützte Prozessautomatisierung (Robotic Process Automation, RPA) betrifft daher eine Vielzahl an Funktionen in den unterstützenden Bereichen mit dem Ziel der Senkung der Kosten, der Reduktion des Risikos, der Einhaltung von Vorschriften oder der Reduktion des Einflussfaktors Mensch (Compliance). Die Produktionsplanung steht hierbei noch am Anfang, bietet aber ähnliche Potentiale wie Anwendungen im Bereich Buchhaltung oder Personalmanagement (Kroll et al. 2016, S.7f), da auch hier die Mehrzahl der Entscheidungen systematisiert und regelbasiert beschrieben werden können.

1.3 Problemstellung

Der Planungsprozess technischer Anlagen basiert vordergründig auf menschlichen Entscheidungen des Entwurfs, der Auswahl und Integration von Komponenten und Technologien

für ein Produktionssystem (Feldmann 2014a, S.20f). Im Fokus des Systementwurfs stehen insb. die Fragestellungen nach Wandlungsfähigkeit und Flexibilität, der Beherrschung der Komplexität in den Planungsprozessen und des Systementwurfs sowie die Rolle des Menschen (Müller et al. 2013b, S.365). Die Vorgehensweisen können dabei mit Methoden der Produktentwicklung nach VDI 2221 oder VDI 2206 verglichen werden.

Hybride Montagearbeitsplätze, die von den Extrema einer rein manuellen oder rein automatischen Gestaltung ausgehen, sind meist durch die Flexibilisierung vorhandener Automatisierung oder die Rationalisierung manueller Arbeit getrieben (siehe Abbildung 1.6). Das Planungsvorgehen orientiert sich an den Randbedingungen aus Produkt und Umwelt sowie bereits bekannten hybriden Montagearbeitsplätzen. Die individuellen Stärken und Schwächen der Ressourcen Mensch und Roboter werden dabei nur unzureichend berücksichtigt. Das Vorgehen kann in diesem Zusammenhang als produktgetrieben und in der Ausprägung nach Hypothese 1 als imitierend beschrieben werden.

Je nach Anwendungsfall kann das Planungsvorgehen zu ungünstigen Arbeitsteilungen, zu verlängerten Durchlaufzeiten und somit höheren Kosten führen. In hybriden Szenarien darf der Mensch nicht zum Lückenbüßer der Automatisierung werden, indem ihm die »verbleibenden Tätigkeiten« mit schlechter Automatisierungseignung zugewiesen werden (Schließmann 2014, S.453). Fischer et al. (2017, S.10) definieren aus diesem Grund die aufgabenorientierte, die informationstechnische und die Perspektive der Organisation gesellschaftlicher Arbeit, die in einem hybriden Systementwurf zu berücksichtigen sind.

Die zu entwickelnde Methode soll aus den genannten Gründen einen systemgetriebenen und integrierenden Ansatz verfolgen, der eine Synthese technischer Fähigkeiten der Einzelressourcen verfolgt (siehe Abbildung 1.8) und die individuellen Stärken von Mensch und Roboter berücksichtigt.

Die hybride Systemgestaltung, im Sonderfall der Mensch-Roboter-Kollaboration, definiert den Handlungsrahmen. Der Montagearbeitsplatz wird dabei aus manuellen und automatischen Ressourcen integriert und iterativ optimiert. Die Ressourcen definieren sich aus den Anforderungen des zu montierenden Produkts unter Berücksichtigung gegebener technischer und wirtschaftlicher Randbedingungen sowie den Anforderungen des Montageplaners – vgl. Fokus auf Produkt, Montageressource und Produkt-/Montagefunktion nach Landherr (2014, S.42).

Der integrative Ansatz aus einzelnen Ressourcen ermöglicht eine kontinuierliche Rekonfiguration und Reinitialisierung des Systementwurfs. Durch Synthese unterschiedlicher Ressourcen und Definition individueller Arbeitsteilungen lassen sich so alternative Systemlösungen für einen gegebenen Satz an Rand- und Umweltbedingungen generieren.

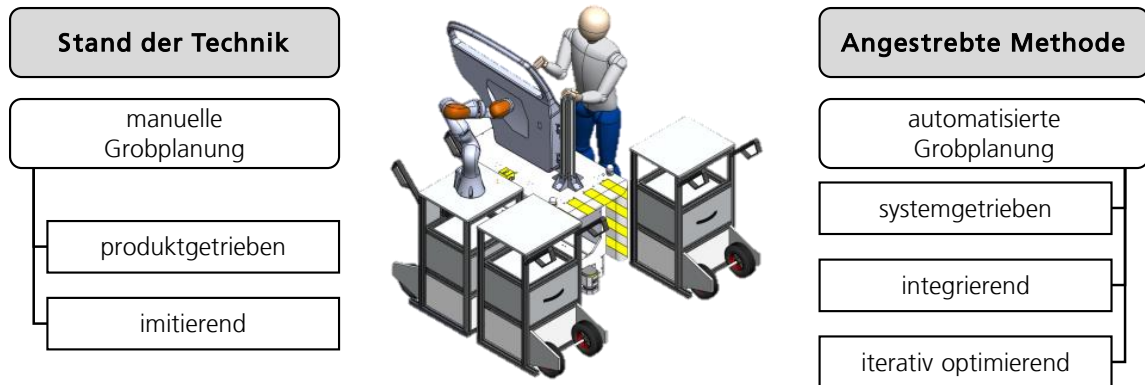


Abbildung 1.8: Spannungsfeld der Planung hybrider Montagearbeitsplätze zwischen produktgetrieben-imitierender und systemgetrieben-integrierender Herangehensweise

Das Resultat ist dabei stark vom individuellen Erfahrungsschatz des Planers sowie der zur Systemplanung verfügbaren Zeit abhängig. Hinzu kommt, dass im Falle eines Mangels an Expertenwissen im Unternehmen, dieses aufgebaut oder teuer eingekauft werden muss. Leitfäden und Handlungsempfehlungen der Montageplanung und -systemgestaltung existieren in den meisten Fällen nur für Teilbereiche der Aufgaben- und Problemstellung. Durch die Existenz mehrerer Alternativressourcen je Montagefunktion und die Abwägung einer automatischen und manuellen Verrichtung jedes Montageschritts wird deutlich, dass das zugrundeliegende Optimierungsproblem exponentiellen Charakter besitzt.

Abbildung 1.9 illustriert das Optimierungsproblem anhand der grafischen Darstellung des Lösungsraums technischer Lösungen Q . Erfolgt keine Planungsunterstützung, so ist in einem manuellen Planungsvorgehen in endlicher Zeit die Reproduktion oder Abwandlung einer potentiell bekannten Systemlösung q wahrscheinlich. Diese Nachbarschaftslösung betrachtet aber nur einen Bruchteil des technisch möglichen Lösungsraums Q und imitiert, wie bereits in Abbildung 1.8 dargestellt, höchstwahrscheinlich eine bereits bekannte Lösung. Es ist davon auszugehen, dass in diesem Zusammenhang das optimale Ergebnis der

Montageplanung q_{opt} in Bezug auf technische und wirtschaftliche Leistungsmerkmale nicht erreicht wird.

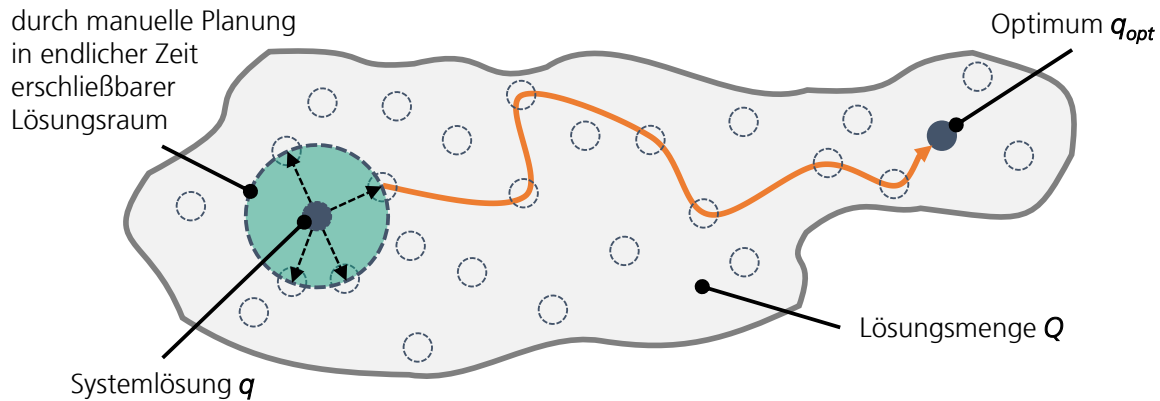


Abbildung 1.9: Darstellung des Optimierungsproblems anhand des Lösungsraums technischer Lösungen Q , des optimalen Ergebnisses q_{opt} und den Limitierungen einer manuellen Lösungssuche in der Nachbarschaft einer bekannten Lösung q

Eine Planungsunterstützung muss in der Lage sein, den kompletten Lösungsraum in kurzer Zeit vollständig zu explorieren oder mittels Näherungsverfahren (Heuristiken) eine optimierte Lösung in kurzer Zeit zu ermitteln. Der Vorgang einer heuristischen Lösungssuche ist mit dem orangenen Pfad dargestellt.

Das Zusammenspiel einzelner Objekte und die Auswirkungen getroffener Entscheidungen im Systementwurf sind dabei in den meisten Fällen a priori unbekannt und ergeben sich erst im Laufe einer fortschreitenden Grobplanung. Dies gilt im Besonderen für die Ermittlung wirtschaftlicher Kennzahlen (Witte et al. 2013, S.321) in einem volatilen Marktumfeld. Eine Aussage über die Qualität einer Lösungsalternative kann daher nur unter Betrachtung und Beurteilung technischer Alternativen gegeben werden (Bullinger & Ammer 1986). Ein direkter Vergleich mehrerer Lösungsalternativen kann nur unter Berücksichtigung identischer Randbedingungen erfolgen. Im Sinne der kontinuierlichen Rekonfiguration aufgrund sich wandelnder Rand- und Umweltbedingungen, gilt es einen Zustand zu definieren und den Systementwurf anhand dieser Anforderungen zu optimieren. Unter Berücksichtigung einer kurzen Optimierungszeit gilt es, mehrere Lösungsalternativen zu generieren, diese hinsichtlich den gegebenen Anforderungen zu bewerten und den optimierten Systementwurf für die zum aktuellen Zeitpunkt bekannten Herausforderungen zu definieren.

1.4 Zielsetzung und Forschungsfrage

Die Konzeption hybrider Montagearbeitsplätze war Schwerpunkt des Verfassers in Forschungs- und Industrieprojekten am Fraunhofer IPA. Die Projekte behandelten Applikationen aus dem Bereich der Vor- und Endmontage der Automobil- und Nutzfahrzeugproduktion, der Lebensmittelindustrie sowie der Montage von Haushaltsgeräten. Aus eigenen Erfahrungen können die nachfolgenden Punkte identifiziert werden, die zum aktuellen Zeitpunkt einen flächendeckenden Einsatz hybrider Montagearbeitsplätze einschränken. Diese Beobachtungen decken sich mit den Beschreibungen von Buxbaum & Häusler (2020, S.296ff) und Matthias & Ding (2013):

- Schwierigkeiten bei der Identifikation von Prozessen mit »geeignetem Automatisierungspotential« (Matthias & Ding 2013).
- »Mangelndes Expertenwissen« in der Konzeption, Auslegung und Programmierung hybrider Montagearbeitsplätze (Buxbaum & Häusler 2020, S.113).
- Bedenken hinsichtlich der »Wirtschaftlichkeit« aufgrund hoher Fixkosten der Automatisierung (Buxbaum & Häusler 2020, S.296).
- »Schlechte Erfahrungen mit MRK-Prototypen« in produktionsnaher Umgebung, insb. im Kontext der Rationalisierung manueller Arbeit und der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter (Buxbaum & Häusler 2020, S.297).
- Bedenken hinsichtlich einer »sicheren Zusammenarbeit« von Mensch und Roboter (Matthias & Ding 2013; Buxbaum & Häusler 2020, S.296).

Aus dieser Auflistung kann ein Methodenbedarf abgeleitet werden, der eine Unterstützung bei der technischen Allokation von Ressourcen und der nachfolgende Arbeitsteilung erfordert. Dies betrifft sowohl die Unterstützung des methodischen Planungsvorgehens, wie auch die Optimierung der Wirtschaftlichkeit der Montageszenarien. Matthias & Ding (2013), Bauer et al. (2016) und Ranz et al. (2018) bestätigen den Bedarf an Planungsunterstützung, der einen breiteren Einsatz der MRK-Technologie zum aktuellen Zeitpunkt erschwert.

Die Entscheidung, ob sich ein Montageprozess zur Automatisierung eignet, wird im Kontext dieser Arbeit ausgeklammert. Bewertungssysteme und Fragenkataloge hierzu

existieren und können bspw. bei Spingler & Beumelburg (2002), Beumelburg (2005) oder Thomas (2017) nachgeschlagen werden. Die Thematik der Qualifizierung von Prozessen oder die sichere Inbetriebnahme, Gefährdungsbeurteilung und Zertifizierung hybrider Montagearbeitsplätze werden ebenso nicht betrachtet. Zugehörige Arbeiten finden sich bspw. bei Awad et al. (2017) oder Oberer-Treitz (2018).

Um die einzelnen Aspekte einer »Automatisierung des hybriden Systementwurfs« herauszuarbeiten, soll die Zielstellung der Arbeit anhand dreier Arbeitshypothesen dargelegt werden. Die drei Hypothesen werden in Kapitel 7.2, unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Validierung, kritisch hinterfragt.

Hypothese 1: Der Faktor Mensch hemmt die Lösungsqualität und -breite

Ein iteratives Vorgehen der Montageplanung, das auf menschlichen Auswahlentscheidungen und -bewertungen basiert, kann in begrenzter Zeit nur Bruchteile des Lösungsraums explorieren und bewerten. Eine objektive Aussage zur erreichten Qualität einer Lösung ist dabei nur auf den untersuchten Teilbereich des Lösungsraums und einige wenige quantifizierbare Kriterien möglich (vgl. Abbildung 1.9).

Viele Entscheidungen im Planungsprozess werden anhand qualitativer Vergleiche getroffen. Aus Gründen der risikoaversen Natur des Menschen ist davon auszugehen, dass bereits bekannte und erprobte Komponenten und Systemlösungen präferiert und wiederverwendet werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass bei diesem Vorgehen ein technisches und organisatorisches Optimum erzielt werden kann, ist als gering einzustufen.

Hypothese 2: Optimierte Produktionsszenarien sind nur durch kontinuierliche Reinitialisierung und Rekonfiguration des Systementwurfs möglich

Matt (2007) beschreibt den Bedarf einer kontinuierlichen Rekonfiguration und wiederkehrenden Reinitialisierung des Systementwurfs zur Erreichung operativer Exzellenz in der Produktion. Dabei werden zyklischen Perioden der Reinitialisierung zwischen der Nutzungs- und Designphase sowie kontinuierliche Problemlösezyklen zur Systemverbesserung (Rekonfiguration, Adaption) während der Nutzungsphase unterschieden.

Das Vorgehen ermöglicht die Dynamisierung und damit die Beherrschung der Komplexität im Systementwurf, was langfristig zu einer besseren Ausnutzung der Ressourcen sowie einer gesteigerten Wirtschaftlichkeit und Resilienz¹ führen kann.

Hypothese 3: Der langfristige Horizont einer Investitionsentscheidung benachteiligt Automatisierungslösungen

Der langfristige Investitionshorizont im Systementwurf schränkt die Wahrscheinlichkeit der Auswahl automatischer Ressourcen ein. Gerade bei kleineren Stückzahlen und unsicheren Produktionsszenarien werden automatisierte Produktionssysteme benachteiligt, da die höhere Kapitalbindung mit meist längeren Amortisationszeiten als wirtschaftlicher Nachteil gesehen wird (Westkämper & Zahn 2009, S.15).

Üblicherweise wird bei Automatisierungskomponenten eine Kapitalwertverzinsung von bis zu 35%² angenommen. Ist der angenommene Zeitraum kurz oder die zu produzierende Losgröße gering, resultieren hohe Fixkosten. Da manuelle Montagearbeitsplätze einen geringeren Ressourcenbedarf und somit geringere Kapitaldienstkosten aufweisen, wirken sie, insbesondere im Fall volatiler Nachfragen und unsicherer Prognosen, wirtschaftlich attraktiver als Montagearbeitsplätze mit einem (hohen) Automatisierungsanteil.

Die zu entwickelnde Methode soll den Planer im Zuge der Neu- und Rekonfigurationsplanung des Systementwurfs technisch unterstützen und den manuellen Planungsaufwand reduzieren. In kurzer Zeit sollen mehrere Lösungsalternativen automatisch identifiziert werden, um den Aufwand der Projektierung zu reduzieren. Weiterhin sollen Planungsfehler vermieden und der Reifegrad einer Systemlösung gesteigert werden (vgl. Nutzeneffekte digitale Fabrik nach Landherr et al. (2013, S.124)).

Die Iterationsschleifen der Optimierung können dazu verwendet werden, unterschiedliche Systemlösungen per Szenariotechnik zu entwerfen und alternative Ausbau- und Entwicklungsstufen in einem frühen Stadium der Grobkonzeption zu betrachten (Reinhart et al. 2013, S.308f). Eine nutzerseitige Variation der Randbedingungen erlaubt es unterschiedliche Ressourcensetups und damit Arbeitsteilungen der Montageaufgabe zu generieren und

¹Eigenschaft eines Systems bei Störungen oder (Teil-)Ausfällen nicht vollständig zu versagen sowie handlungsfähig und produktiv betriebsfähig zu bleiben.

²Mündliche Überlieferung. Die Kapitalwertverzinsung dt. OEMs liegt zwischen 16% und 35%. Die Aussage deckt sich mit der üblichen Forderung nach drei Jahren Amortisationszeit.

miteinander zu vergleichen. Dieses Vorgehen hilft, eine geeignete Systemlösung zu identifizieren, die im nachfolgenden Schritt der Feinplanung weiter detailliert und spezifiziert werden kann.

Die sich dieser Aufgabenstellung anschließende Forschungsfrage fokussiert die Ausgestaltung hybrider Montagearbeitsplätze der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) und lautet:

“Wie kann ein Planer **methodisch unterstützt** werden, eine **fähigkeits- und ressourcenoptimale Arbeitsteilung** für hybride Montagearbeitsplätze zu identifizieren?”

Weiterführende Fragen der beschäftigen sich mit den folgenden Fragestellungen:

- *Inwieweit können »Informationsmodelle« und »heuristische Optimierungsverfahren« den Planungsprozess eines Montagearbeitsplatzes effizient unterstützen und eine »Entscheidungsgrundlage« für den Anlagenplaner liefern?*
- *Was sind »geeignete Optimierungskriterien« hybrider Montagearbeitsplätze und wie können »konkurrierende Zielgrößen« beim Systementwurf in Einklang gebracht werden?*
- *Wie können »Rand- und Umweltbedingungen« in der Optimierung berücksichtigt werden?*
- *Wie können auf Basis »unvollständiger Informationen« und in »begrenzter Zeit«, valide Aussagen zu technischen und wirtschaftlichen Lösungen gefunden werden?*
- *Wie gut sind die automatisch erstellten Montagearbeitsplätze im Vergleich zu einer »manuellen Expertenplanung«?*

1.5 Lösungshypothese und Forschungskonzeption

Die Einordnung der vorliegenden Forschung in die Wissenschaftssystematik erfolgt nach Ulrich & Hill (1976a, S.305). Das methodische Vorgehen wird den Realwissenschaften zugeordnet, da im Vordergrund die Beschreibung, Erklärung und Gestaltung empirisch wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte steht. Im Speziellen erfolgt eine Zuordnung zu

den angewandten (Handlungs-)Wissenschaften, die die Analyse menschlicher Handlungsalternativen zur Gestaltung sozialer und technischer Systeme in den Mittelpunkt rückt (siehe Abbildung 1.10). Das Vorhaben ist explizit nicht grundlagenorientiert und folgt einem anwendungsorientierten Ansatz.

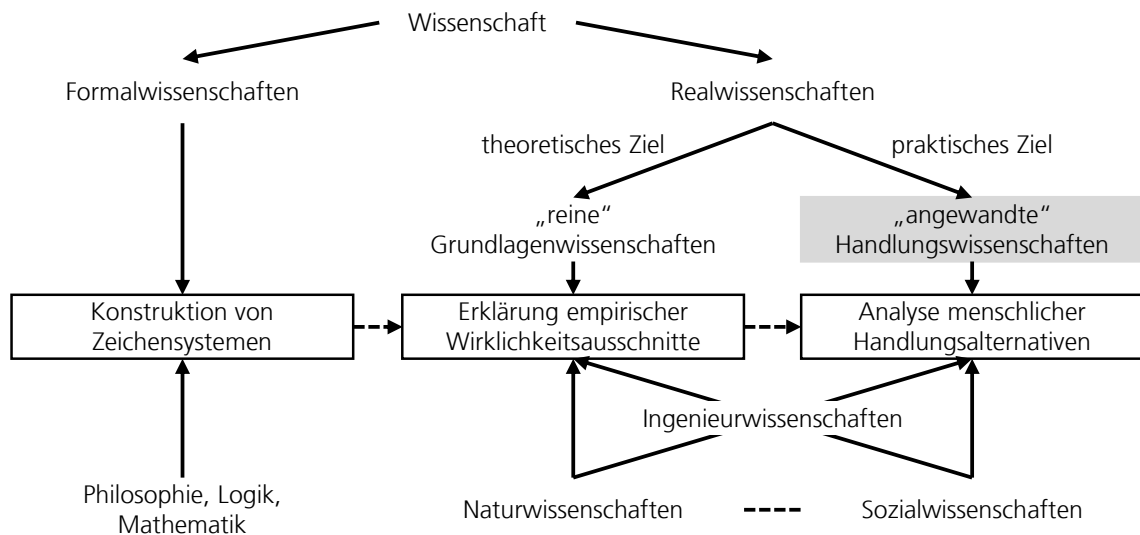


Abbildung 1.10: Einordnung der Arbeit in die Wissenschaftssystematik nach Ulrich & Hill (1976a, S.305)

Für die Ingenieurwissenschaften als Teil der Realwissenschaften gilt, dass Ergebnisse jederzeit einer faktischen Wahrheit unterworfen werden müssen. Ulrich & Hill (1976a, S.306) argumentieren, dass *„Realwissenschaften [...] Formen des Denkens nach bestimmten Regeln sind mit dem Zweck, subjektiv wahrgenommene Wirklichkeitsausschnitte zu explizieren (präzises, intersubjektiv mitteilbares Beschreiben mittels Begriffen), zu generalisieren (verallgemeinernde Abstraktion von Einzelfällen) und Handlungsalternativen zur ihrer Gestaltung zu entwerfen“*.

Bei der Lösung realwissenschaftlicher Probleme gilt es, zwei Grundprobleme zu lösen (Ulrich & Hill 1976a, S.306). Auf der einen Seite das Problem der Subjektivität durch Interessensbezüge und Wahrnehmungsfiler, auf der anderen Seite die Problematik präziser Sprache und Verallgemeinerungen.

Während sich die Grundlagenwissenschaften auf die Lösung theoretischer Probleme beschränken, entstehen die Probleme der angewandten Handlungswissenschaft im Praxiszusammenhang (Kubicek 1977). Tomczak (1992, S.83) hat zur Untersuchung dieser

praxisorientierten Probleme eine eigenständige Forschungsmethodologie unter dem Namen »explorative Forschung« entwickelt. Ziel der »explorativen Forschung« ist die Konzeption wissenschaftlicher Systeme der Entscheidungsunterstützung bei Handlungsalternativen (Kromrey & Strübing 2009, S.20).

Abbildung 1.11 illustriert den Forschungszyklus nach Tomczak (1992, S.84). Im Vordergrund steht ein iterativer Lernprozess zur Gestaltung wissenschaftlicher Aussagen (Kubicek 1977, S.13). Die Ergebnisse basieren dabei immer auf Erfahrungswissen und theoretischen Grundlagen. Durch wiederholendes Fragen an die Realität und Aufnahme in ein theoretisches Verständnis lassen sich neue Erkenntnisse gewinnen.

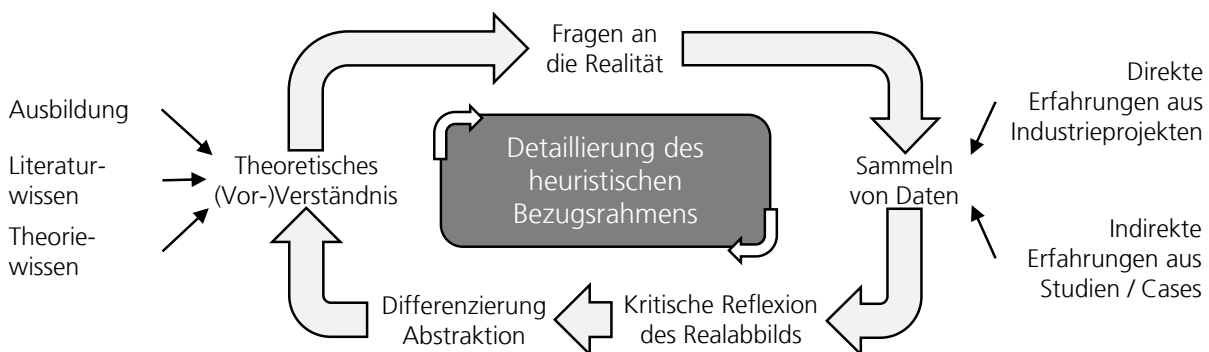


Abbildung 1.11: Forschungsmethodisches Vorgehen i.A.a. Tomczak (1992, S.84) und Holtewert (2018, S.10)

Im Mittelpunkt des Forschungszyklus steht der heuristische Bezugsrahmen, der auf Basis vorhandenen Vorwissens zu detaillieren ist (Kubicek 1977, S.28). Der heuristische Bezugsrahmen der vorliegenden Arbeit ist in Abbildung 1.12 dargestellt. Ausgehend von der Grobplanung hybrider Montagearbeitsplätze sind mehrere Merkmalsausprägungen und ihr gegenseitiger Einfluss auf das übergreifende Optimierungsergebnis zu untersuchen. Hierzu zählen Abhängigkeiten aus dem Montageprodukt und den Montageprozessen, die Allokation technischer Ressourcen im hybriden Anwendungsfall, Effekte der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter sowie Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit der Systemlösungen.

Die vorliegende Arbeit lässt sich dem confirmatorischen Teil der Forschung zuordnen. Forschungsfragen und -hypothesen wurden in Kapitel 1.4 eingeführt. In einem ersten Schritt gilt es, die Methode entsprechend dem heuristischen Bezugsrahmen aus Abbildung 1.12, zu entwickeln. In einem zweiten Schritt sollen die in den Hypothesen genannten

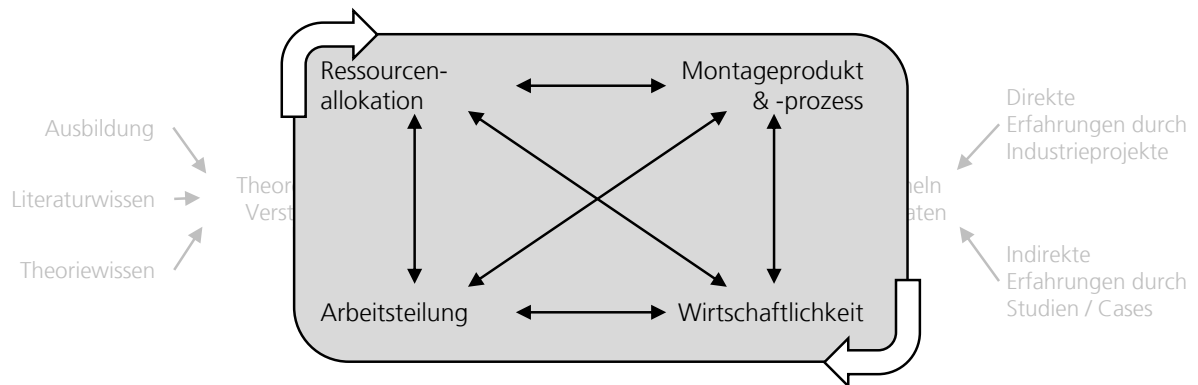


Abbildung 1.12: Heuristischer Bezugsrahmen dieser Arbeit i.A.a. Kubicek (1977)

Limitierungen einer manuellen Planung überwunden werden, um den Raum möglicher Lösungsalternativen zu vergrößern. Hierfür eignet sich die analytisch-deduktive Herangehensweise, die auf den Aktivitäten »Modellkonstruktion«, »Ableitung von Prognosen« und »Transformation in situationsspezifische Handlungsanweisungen« beruht (Ulrich & Hill 1976b, S.347f).

Das Gewinnkriterium wird oftmals für die Bewertung der wissenschaftlichen Ergebnisse im Rahmen des Verwendungszusammenhangs herangezogen. Im Fall der Generierung hybrider Montagearbeitsplätze würde dies den Schwerpunkt der Betrachtung auf den Betreiber legen und die Belange der Fertigungsmitarbeiter und anderer beteiligter Interessengruppen (Planung, Inbetriebnahme) unzureichend berücksichtigen.

Diese Parteilichkeit der Sichtweise gilt es nach Ulrich & Hill (1976b, S.350) zu vermeiden. Dies kann bspw. durch Einbeziehung zusätzlicher Interessensgruppen oder die Formalisierung und Systematisierung inhaltlicher Abhängigkeiten aus praktisch-normativer Sicht in die Entscheidungsmodelle erfolgen. Wie in Abbildung 1.12 dargestellt, stehen neben der Wirtschaftlichkeit, Aspekte der Arbeitssteilung und Ressourcenallokation im Spannungsfeld des heuristischen Bezugsrahmens.

1.6 Aufbau der Arbeit

Der Forschungsprozess und Aufbau der Arbeit orientieren sich am Forschungsansatz von Ulrich (1984, S.193), der durchgängig den Praxisbezug in den Vordergrund stellt. Die Struktur kann Abbildung 1.13 entnommen werden.

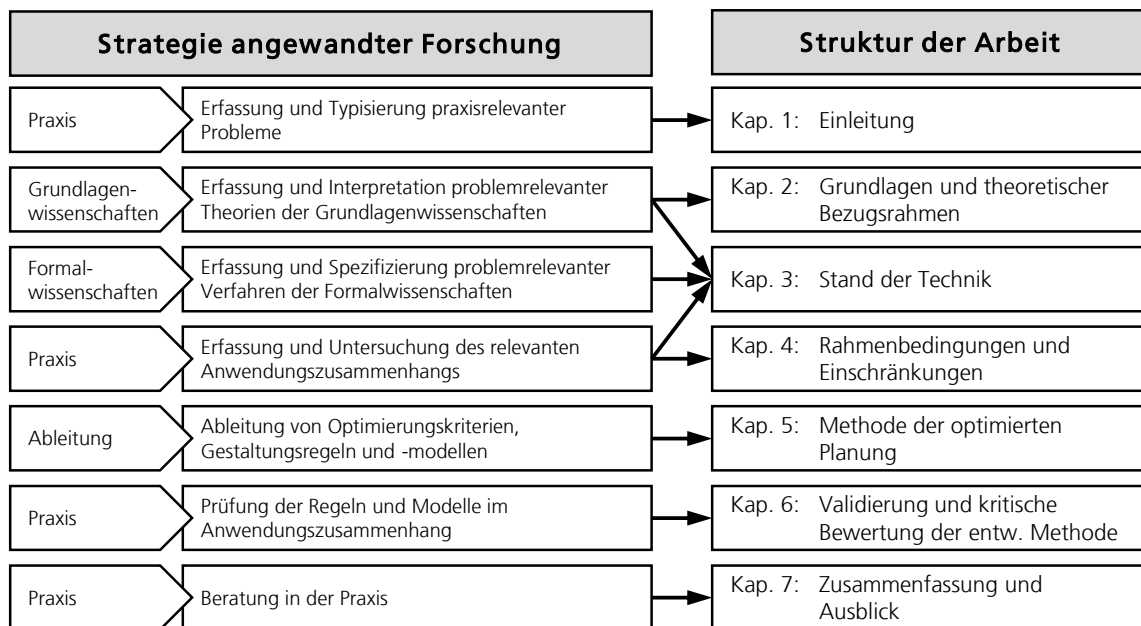


Abbildung 1.13: Strategie angewandter Forschung und Struktur der Arbeit i.A.a. Ulrich (1984, S.192)

Kapitel 2 beschäftigt sich mit den Grundlagen und dem theoretischen Bezugsrahmen dieser Arbeit. Hierzu werden Begriffsdefinitionen, ein Vergleich unterschiedlicher Produktionssysteme sowie Grundlagen der Systemgestaltung produktionstechnischer Systeme präsentiert. Die Schwerpunkte liegen auf der Abgrenzung unterschiedlicher Montagevarianten und der Informationsmodellierung.

In Kapitel 3 werden die Rahmenbedingungen und Besonderheiten des Sonderfalls der hybriden Montage im Kontext der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) beschrieben. Weiterführende Punkte adressieren die Kosten- und Investitionsrechnung im Anwendungsfall hybrider Montagearbeitsplätze. Das Kapitel endet mit einer formellen Beschreibung des Optimierungsproblems dieser Arbeit und einer Ableitung des zu adressierenden Forschungsbedarfs.

Der Fokus von Kapitel 4 liegt in der Beschreibung der Anforderungen an die Methode, der Definition der Einschränkungen sowie der Identifikation und Ableitung von Kriterien zur Bewertung hybrider Montagearbeitsplätze im Sonderfall der MRK.

Kapitel 5 beschreibt ausführlich die entwickelte Methode der automatischen Generierung hybrider Montagearbeitsplätze. Es umfasst eine Beschreibung des methodischen Planungs-

vorgehens und geht auf die verwendeten Werkzeuge zur Generierung, Bewertung und Optimierung von Lösungsalternativen ein. Der Schwerpunkt des Kapitels liegt auf der Spezifizierung und Formulierung des Optimierungsproblems, der automatischen Generierung alternativer Systemlösungen, der quantitativen Ermittlung der Systemeigenschaften und der Ableitung eines multi-kriteriellen Bewertungs- und Optimierungsvorgehens. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung der verschiedenen Lösungsverfahren des Optimierungsproblems.

Zur Validierung der Methode werden in Kapitel 6 Praxisbeispiele eingeführt. Anhand dieser werden die heuristischen Verfahren mit den Ergebnissen einer manuellen Planung sowie einer vollständigen Enumeration des Lösungsraums verglichen. Dieses Vorgehen erlaubt Aussagen zur Leistungsfähigkeit der einzelnen Lösungsverfahren.

Die Arbeit schließt in Kapitel 7 mit einer kritischen Würdigung der erreichten Ergebnisse, einer Zusammenfassung der Arbeiten und einem Ausblick auf zukünftige Forschungsschwerpunkte. Im Mittelpunkt steht die Vision einer automatisierten, digitalen Planungskette («Automatisierung der Automatisierung») der rekonfigurierbaren Montageplanung, um eine Verringerung der nicht-wertschöpfenden Arbeitsschritte zu erreichen und Prozessautomatisierung in der Montageplanung zu etablieren.

Im Anhang – Kapitel A - E – finden sich detaillierte Informationen zu den Praxisbeispielen und Auszüge der Datensätze der Validierung. Weiterhin wird die Implementierung der Java-Applikation beschrieben, die als Grundlage für die Validierung dient.

2 Grundlagen und theoretischer Bezugsrahmen

Das Kapitel behandelt die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen inkl. einer Abgrenzung und Definition relevanter Begriffe im Kontext der vorliegenden Arbeit. Hieran schließt sich eine detaillierte Beschreibung der Ausgangssituation sowie eine Definition der Rekonfigurierbarkeit im Kontext der Montage an. In den folgenden Unterkapiteln erfolgt eine Abgrenzung der Montagesystemvarianten und eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Verfahren der strukturierten Planung technischer Montagesysteme mit einem Schwerpunkt auf dem Schritt der Grobplanung. Das Kapitel schließt mit der informationstechnischen Modellierung und der Beschreibung der Beziehungen innerhalb eines Montagesystementwurfs.

2.1 Begriffsdefinitionen

Der nachfolgende Abschnitt definiert die grundlegenden Begriffe und Zusammenhänge mit Relevanz für die zu entwickelnde Methode dieser Arbeit. Diese werden in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt.

Brown- und Greenfieldplanung

Die Brownfieldplanung beschreibt die produktionsnahe Planung oder (Um-)Planung im Bestand, während die Greenfieldplanung die vollständige Neuplanung einer Montage mit wenigen Restriktionen beschreibt (Küber 2017, S.54; VDI 5200 Blatt 4).

Flexibilität

Nach Heger (2007, S.21) und Nyhuis et al. (2013, S.215) beschreibt Flexibilität die Fähigkeit sich in bestimmten Grenzen und mit geringem finanziellen Aufwand sich an verändernde

Anforderungen aus Teileprogramm und technologischem Prozess anzupassen. Flexibilität beinhaltet vorgehaltene Änderungsmöglichkeiten und Maßnahmenbündel, die ein System mitbringt, um auf zum Zeitpunkt der Planung bekannte und angedachte Änderungen (Flexibilitätskorridore) bedarfsgerecht reagieren zu können (Abele et al. 2006).

Fügen

Das Fügen beginnt, wenn ein minimaler Zusammenhalt auch bei Entfall der Handhabungsfunktionen sichergestellt ist. Der Vorgang endet, wenn die geforderte Festigkeit der Verbindung bei gewünschter Position und räumlicher Lage der zu fügenden Partner erreicht ist (Stöferle et al. 1974, zitiert nach Feldmann (2014a, S.8)).

Informationsmodell

In der Informationstechnik ist ein Informationsmodell eine abstrakte Abbildung von Objekten mit ihren Eigenschaften und Beziehungen. Das Informationsmodell ergänzt das Datenmodell um Kontextangaben, die es ermöglichen, Daten einheitlich zu interpretieren und zu nutzen. Das Informationsmodell liefert Strukturen, die das von einer Person oder einer Gruppe von Personen in einer konkreten Situation benötigte Wissen explizit sichtbar machen. (IEC 2019, S.25ff)

Methode

Methoden sind planmäßig angewandte, begründete Vorgehensweisen zur Erreichung von festgelegten Zielen (Hesse et al. 1992; Schilling 2020, S.133f). Im Allgemeinen bezeichnet eine Methode die konzeptionelle Grundlage für planmäßiges Handeln und besteht aus Vorgehensmodellierung, Datenmodellierung und zugehörige Werkzeugen. Sie ist ein Verfahren, das auf einem System von Regeln und Annahmen basiert und auf ein bestimmtes Ziel gerichtet ist, bspw. das Erreichen von Erkenntnissen oder auch die Herstellung praktischer Ergebnisse.

Methodik

Die Methodik beschreibt die Gesamtheit der systematischen Vorgehensweisen bei der Gewinnung von Erkenntnissen. Sie bezeichnet die Wissenschaft, die sich als Theorie und Lehre von den Methoden versteht (Schilling 2020, S.134).

Montage

Die Montage bezeichnet die Gesamtheit aller Vorgänge für den Zusammenbau von Körpern mit geometrisch bestimmter Form (VDI 2860; Weck et al. 1999, S.10-17). Baugruppen sind in diesem Kontext »geometrisch bestimmte Gebilde, die durch Fügen von mindestens zwei Einzelteilen (niedrigerer Ordnung) entstanden sind und in eine Montageeinheit höherer Wertigkeit eingehen« – siehe Abbildung 2.1. Einzelteile sind technische Gebilde und nur durch Zerstörung trennbar. Sie entstehen durch Bearbeitung eines Werkstoffs ohne Fügen mit einem anderen Bauelement (Hesse 2012b, S.37).

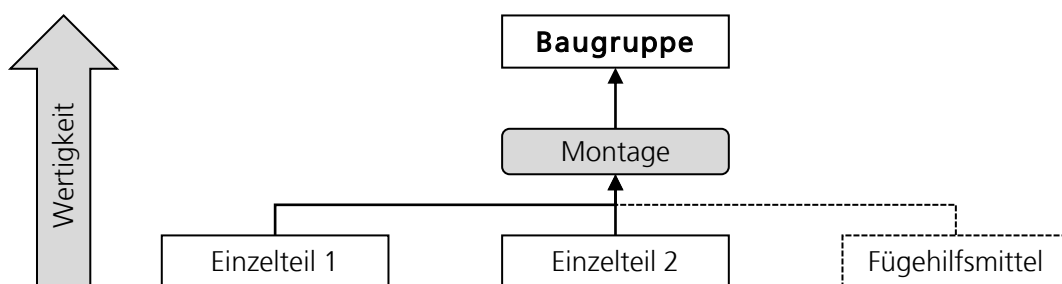


Abbildung 2.1: Hierarchische Definition einer Produktstruktur

Zur Montage zählen die Hauptfunktionen des Fügens (DIN/ISO 8593) zweier Einzelteile zu einem Produkt sowie Nebenfunktionen, die dem Fügen vor- oder nachgelagerte Tätigkeiten beschreiben und nicht unmittelbar zur Wertschöpfung beitragen. Zu diesen gehören die Tätigkeiten der Handhabung, des Transportierens, des Lagerns, des Anpassens und Kontrollierens (Weck et al. 1999, S.10-17; Eversheim 1989). Zusatzaufgaben der Montage entfallen auf die Tätigkeiten der Kontrolle, Justage sowie möglicher zusätzlich Sonderoperationen (Lotter 2012c, S.2; Weckenmann et al. 2014, S.836; Müller et al. 2016, S.212).

Produkte

Ein Produkt ist ein auf technischen Wegen hergestelltes Gut. Dieses kann ein zu produzierendes Teil-, Zwischen- oder Endprodukt der Montage sein (Drath 2010, S.84).

Im Kontext dieser Arbeit ist ein Produkt als eine zu montierende Baugruppe zu verstehen. Diese besteht aus mindestens zwei Einzelteilen und kann optionale Fügehilfsmittel beinhalten – siehe Abbildung 2.1.

Prozesse

Prozesse repräsentieren eine Interaktion zwischen Ressourcen und Produkten. Die zu montierenden Einzelteile der Produkte erfordern Produktionsprozesse, die von Produktionsressourcen ausgeführt werden (Drath 2010, S.83). Der Zusammenhang ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Im Sinne der Montage ermöglichen Prozesse die wertschöpfende Transformation von niederwertigen Einzelteilen zu höherwertigen Baugruppen – siehe Abbildung 2.1. Prozesse besitzen eine zeitabhängige Komponente und dienen als Grundlage der Geschäftsmodelle der Produktion.

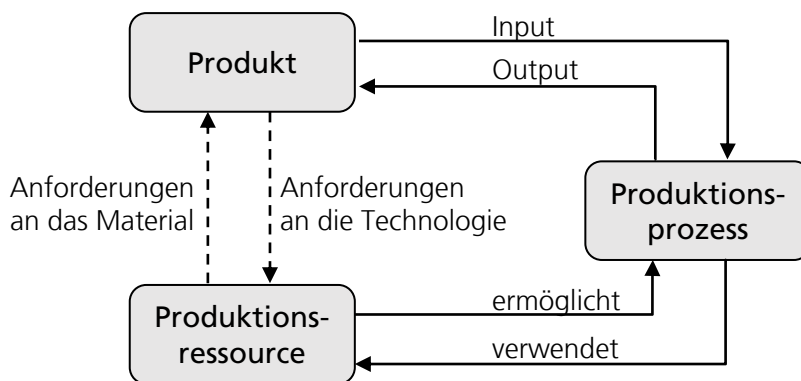


Abbildung 2.2: Modellierung der Zusammenhänge zwischen Produkt, Prozess und Ressource (van Brussel et al. 1998; Drath 2010; Stanev 2012, S.9)

Rekonfiguration

Die Rekonfiguration stellt einen fertigungstechnischen Lösungsansatz zur Flexibilisierung von Produktionsanlagen dar. Produktionssysteme sind dabei in einzelne funktionsfähige

Komponenten gegliedert, die in kurzer Zeit und mit wenig Aufwand ausgetauscht oder neu parametrisiert werden können. Hierdurch erfolgt eine Anpassung an die geänderten Anforderungen und Rahmenbedingungen. (Nyhuis et al. 2013, S.220)

Resilienz

Resilienz steht allgemein für die Widerstandsfähigkeit und Überlebensfähigkeit von Systemen. Resiliente Wertschöpfungssysteme sind in der Lage, bei widrigen Ereignissen wirtschaftlich handlungsfähig und produktiv betriebsfähig zu bleiben (Scharte & Thoma 2016, S.129 & S.147). Die dabei notwendige Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen führt nicht zwangsläufig zu einer Rückkehr zum Status quo vor der Störung, sondern beinhaltet eine adaptive Dimension der Systemveränderung. Lösungsansätze zur Schaffung von resilienten Wertschöpfungssystemen sind z.B. Redundanz, Standards und klare Regeln, dezentrale Organisationen und systematisches Lernen aus vergangenen Krisen.

Ressourcen

Eine Ressource beschreibt eine an der Produktion beteiligte Einrichtung oder Person. Im Kontext der vorliegenden Arbeit handelt es sich dabei in erster Linie um Betriebsmittel der Montage. Diese handhaben, be- und verarbeiten Einzelteile und Fügehilfsmittel zu einer Baugruppe entsprechend Abbildung 2.1. Ressourcen beinhalten neben den Hardware- auch die zugehörigen Softwarekomponenten (Drath 2010, S.84ff). Die vorliegende Betrachtung schließt auch die Ressource Mensch ein, die insb. für die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) wichtig ist.

Taktzeit

Die Taktzeit ist die Dauer eines Montageprozesses vom Start des ersten Montageschritts bis zum Beginn des ersten Montageschritts des nachfolgenden Produkts. Sie kann als die Zeit aufgefasst werden, die im Zusammenspiel gegebener Ressourcen benötigt wird, um die funktionalen Arbeitsinhalte aller Montageoperationen eines Montageprozesses vollständig zu erfüllen.

Wandlungsfähigkeit

Unter der Wandlungsfähigkeit eines Montagesystems versteht man das Potential, durch system- und strukturimmanente Wandlungsbefähiger reaktiv oder proaktiv eine zielgerichtete Neu- oder Rekonfiguration der Wandlungsobjekte auf allen Systemebenen außerhalb vorgehaltener Flexibilitätskorridore in kurzer Zeit, bei geringem Aufwand und unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen der Systemelemente durchzuführen, um die interne und externe Effizienz zu erhöhen oder zu erhalten (Hernandez & Wiendahl 2005, S.211; Nyhuis et al. 2013, S.222). Wandlungsfähigkeit wird als Set an Eigenschaften verstanden, das eine offene, frühzeitige und vorausschauende Anpassung der Strukturen und Prozesse der Fabrik auf allen Ebenen ermöglicht, um unvorhergesehene Funktionen und Fähigkeiten in das bestehende System zu integrieren. (Berkholz 2008, S.14).

Wertschöpfung

Wertschöpfung bezeichnet das Ziel produktiver Tätigkeit indem vorhandene Güter in Güter höherer Wertigkeit transformiert werden. Der Wertschöpfungsanteil kann aus der Differenz der Kosten beschaffter Güter und Dienstleistungen anderer Unternehmen und dem Marktwert der gefertigten Produkte berechnet werden (Rutherford 1977). Die Wertschöpfung betrachtet damit den Wert, der durch die Aktivitäten des Unternehmens und seiner Mitarbeiter geschöpft wird.

Nach Lotter (2012a, S.49) kann die Montage in wertschöpfende Tätigkeiten der Primär- und nicht-wertschöpfende Tätigkeiten der Sekundärvorgänge unterschieden werden. Diese Unterscheidung ist insb. bei der Bestimmung des Montagewirkungsgrads relevant.

(Wissens-)Domäne

Wissen bezieht sich immer auf ein Wissens- und Fachgebiet oder einen Kontext, bspw. Wissen über ein Produkt, einen Kunden oder über Methoden und Vorgehensweisen. Die Domäne behandelt ein konkretes Fach- und Wissensgebiet im Kontext des Wissensmanagements und erlaubt eine klare Eingrenzung und Definition (Mertins & Seidel 2009, S.17).

Im Kontext dieser Arbeit bezieht sich der Begriff Domäne auf die unterschiedlichen Fachgebiete eines Montagesystems, wie Randbedingungen, Produkte, Prozesse und Ressourcen.

2.2 Vergleich der Produktionssysteme

Nach Nyhuis et al. (2008), Steegmüller & Zürn (2014, S.104) und Weber (2018, S.9) lassen sich die Begriffe Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Wandlungsfähigkeit folgendermaßen voneinander trennen:

- **Flexibilität** ist als eine Eigenschaft von Produktionssystemen definiert, sich schnell und mit geringem Aufwand, in den Grenzen eines vorgegebenen Bereiches, der sogenannten Anpassungsfähigkeit, an geänderte Rahmenbedingungen anzupassen.
- **Rekonfigurierbarkeit** von Produktionssystemen bedeutet, dass sich Produktionssysteme aus standardisierten und autonomen Funktionseinheiten (Modulen) zusammensetzen, so dass im Bedarfsfall ein schneller Austausch und eine Entwicklungsfähigkeit des Systementwurfs gewährleistet werden kann.
- Ein **wandlungsfähiges Produktionssystem** kombiniert beides. Es ist flexibel in einem engem Betrachtungsrahmen, um eine hohe Anpassungsfähigkeit zu gewährleisten und rekonfigurierbar, um eine langfristige Entwicklungsfähigkeit abzubilden.

Abbildung 2.3 stellt die Begriffe Wandlungsfähigkeit, Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit, Agilität und Resilienz in einem gemeinsamen Kontext dar. Anhand dieser Darstellung sollen die einzelnen Begriffe und ihre Potentiale hinsichtlich der Leistungsfähigkeit eines Montagearbeitsplatzes, unter dem Einfluss externer Treiber über die Zeit, abgegrenzt werden.

Die »Flexibilität« gibt den Korridor der Anpassungsfähigkeit (Leistungsfähigkeit) in einem definierten Intervall wieder, während die »Wandlungsfähigkeit« eine Verschiebung des Korridors der Leistungsfähigkeit beschreibt.

Die »Rekonfiguration« wiederum charakterisiert das Potential, die Leistungsfähigkeit des Systems durch Anpassung der Konfiguration und unter Ausnutzung der Entwicklungsfähigkeit der Funktionseinheiten zu verändern. Dies kann bspw. durch das Hinzufügen,

Entfernen oder die physische Verlagerung von Produktionsressourcen zwischen (mehreren) Arbeitsstationen erfolgen (grauer Pfeil) (ElMaraghy & Wiendahl 2009).

»Resilienz« beschreibt die Robustheit eines Systementwurfs und damit die Widerstandsfähigkeit mit den internen und externen Änderungen fertig zu werden. In Abbildung 2.3 wird dies durch die Verlagerung eines Leistungsbandes innerhalb einer Arbeitsstation dargestellt (grüner Pfeil).

Zuletzt soll der Begriff der »Agilität« am Beispiel der Wandlungsgeschwindigkeit und der Reaktionsfähigkeit auf externe Veränderung deutlich gemacht werden. Erkennbar am Abfall der Leistungsfähigkeit von Montagearbeitsplatz 1, kann in einem definierten Zeitraum, die ursprüngliche Leistungsfähigkeit wiederhergestellt oder ein neues Leistungsniveau erreicht werden (Weber 2018, S.10)

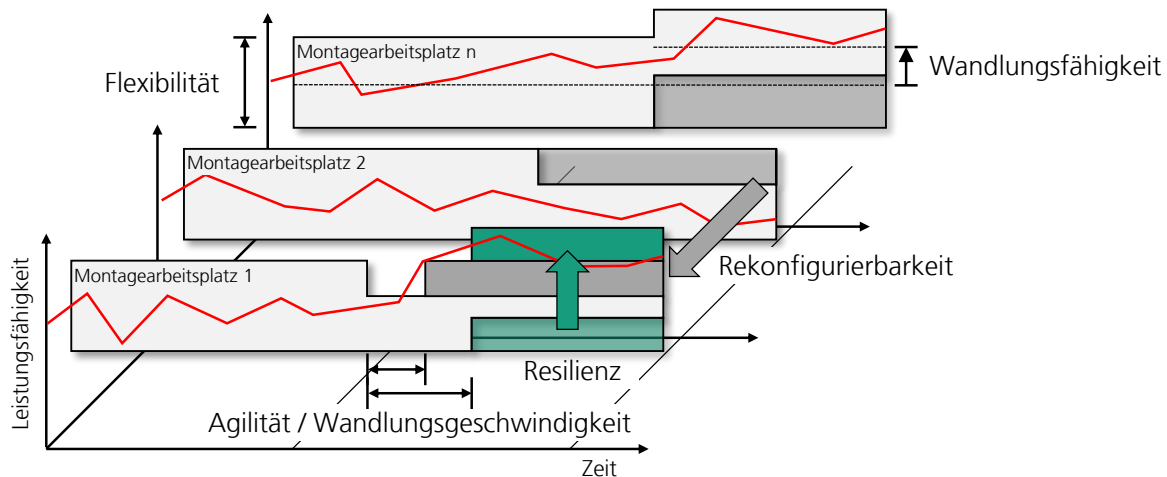


Abbildung 2.3: Abgrenzung der Begriffe Wandlungsfähigkeit, Rekonfigurierbarkeit, Flexibilität, Agilität und Resilienz, eigene Darstellung i.A.a. Nyhuis et al. (2013), Koren (2010) und VDI 5201

Nach Koren (2010, S.6f & 17f) können drei Produktionssystemvarianten unterschieden werden – siehe Abbildung 1.5. In der nachfolgenden Aufzählung soll auch das Matrixproduktionssystem (MMS) aufgeführt werden, das die Eigenschaften von flexiblen oder rekonfigurierbaren Produktionssystemen mit den Eigenschaften einer flexiblen Verkettung kombiniert. Abbildung 2.4 setzt alle vier Produktionssysteme entlang der beiden Achsen Funktionalität und Kapazität zueinander in Relation.

- Konventionelle, auf einen dezidierten Anwendungsfall ausgelegte **Produktionslinien** (Dedicated Manufacturing Line, DML) besitzen einen initial definierten, optimalen

Betriebspunkt (Steegmüller & Zürn 2014) und sind in der Regel starr miteinander verkettet. Eine Anpassung der Leistungsfähigkeit der DML kann üblicherweise nur in engen Grenzen im Rahmen eines vorab definierten Flexibilitätskorridors erfolgen – vgl. Abbildung 1.1.

- **Flexible Produktionssysteme** (FMS) versprechen die Möglichkeit der Produktion unterschiedlicher (Produkt-)Varianten auf einem Produktionssystem. Sie sind in ihrer Produktivität den spezialisierten Produktionssystemen (DML) unterlegen (Koren 2010, S.7), bieten aber einen breiteren Flexibilitätskorridor – vgl. Abbildung 2.3. Erschwerend kommt hinzu, dass die Flexibilität bereits in der frühen Planungsphase berücksichtigt werden muss. Dadurch können hohe technische und zeitliche Mehraufwände in der Auslegung verursacht werden. FMS sind aus diesem Grund kostenintensiver in Anschaffung und Wartung (Koren 2010, S.6f).
- Um den genannten Nachteilen zu begegnen, propagiert Koren (2010, S.17) den Einsatz **rekonfigurierbarer Produktionssysteme** (RMS). RMS zielen auf die vorhandene Lücke zwischen DML und FMS – siehe Abbildung 2.4 (Lohse et al. 2005; Koren 2010, S.18; ElMaraghy & Wiendahl 2009, S.4). Die Modularisierung der Systeme und die Standardisierung der Modulschnittstellen ermöglicht eine Anpassung der Struktur, Funktionalität, Kapazität und Technologie (Westkämper & Zahn 2009, S.116) über den Lebenszyklus des Produktionssystems. RMS bieten nicht die volle Funktionalität vergleichbarer FMS. Sie bedienen stets den aktuell benötigten Funktionsbedarf der Produktionsaufgabe.
- **Matrixproduktionssysteme** (MMS) bestehen aus flexibel miteinander verketteten, rekonfigurierbaren Prozessmodulen. Jedem Produkt wird eine individuelle Abfolge an Prozessmodulen ermöglicht, die idealerweise entsprechend den Anforderungen des Produkts optimiert ist. Diese Flexibilität der Verkettung ermöglicht neue Freiheitsgrade der Steuerung im Hinblick auf den Arbeitsplan und die Operationsreihenfolge. Die Zuordnung der Produkte zu den Prozessmodulen erfolgt in Abhängigkeit des Montagevorranggraphs, der verfügbaren Funktionalitäten und dem gegenwärtigen Zustand der einzelnen Prozessmodule zum Zeitpunkt der Produktion. (Foith-Förster & Bauernhansl 2015; Greschke 2015)

Bei den MMS ist kritisch anzumerken, dass sie Nachteile in der Flächennutzung implizieren und eine Pseudo-Flexibilität suggerieren, die insb. durch eine hohe Investition in Ressourcen (Redundanz und Modularität der Prozessmodule) und einen hohen Flächenbedarf erkauft wird. Weiterhin erschwert die freie Verkettung der Prozessschritte die übergreifende Transparenz über das Produktionssystem, was die Identifizierung von Verschwendung und die übergreifende Optimierung des Gesamtsystems erschwert.

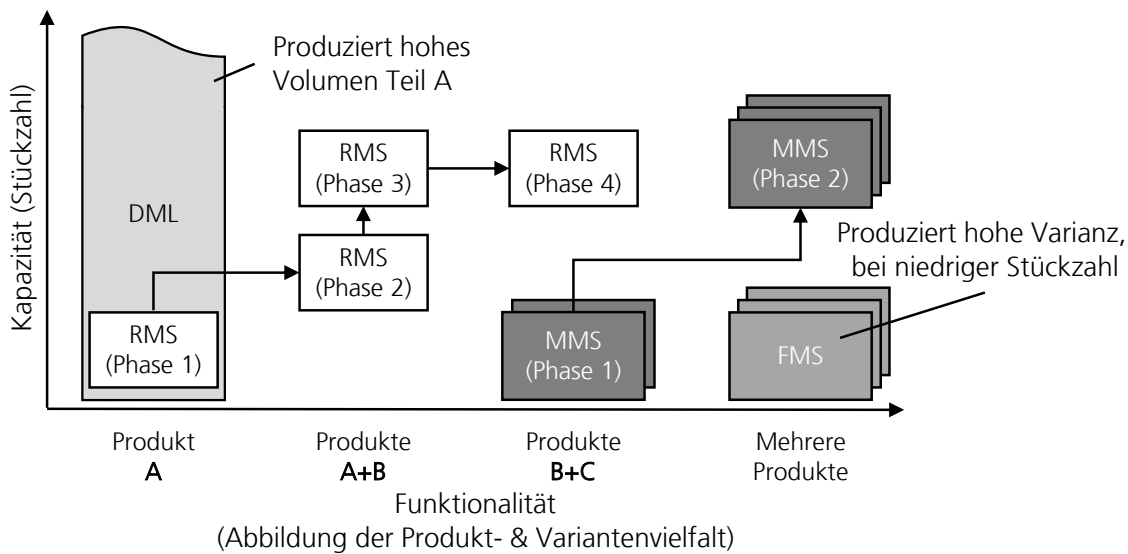


Abbildung 2.4: Vergleich der Ausprägungen der vier betrachteten Produktionssysteme hinsichtlich Produktvarianz und Kapazität, eigene Darstellung i.A.a. Koren (2010, S.18) und Fries et al. (2021)

Tabelle 2.1 gibt einen qualitativen Vergleich der unterschiedlichen Produktionssysteme wieder. Die Kriterien orientieren sich dabei an den Anforderungen einer Massenproduktion individualisierter Produkte und sind Fries et al. (2021) entnommen.

Grundlage der RMS und MMS sind modulare rekonfigurierbare Strukturen, die es erlauben, den bestehenden Systementwurf in kurzer Zeit zu überarbeiten und alternative Systemlösungen zu entwickeln. Lohse et al. (2005) merken an, dass RMS in der Vergangenheit im Fokus hinsichtlich ihrer Architektur, ihres physischen Aufbaus und ihrer Steuerung untersucht wurden. Die planerischen Aspekte der Entscheidungsunterstützung während des rekonfigurierenden oder reinitialisierenden Systementwurfs lagen dabei oftmals außerhalb des Betrachtungsraums (Lohse et al. 2005, S.302).

Tabelle 2.1: Bewertung und Gegenüberstellung der Produktionssystemalternativen i.A.a. Fries et al. (2021)

	DML	FMS	RMS	MMS
hohe Produktionskapazität	●	○	◐	◐
Abbildung von Varianten- & Produktvielfalt	○	●	◐	●
Flexibilität hinsichtlich volatiler Nachfrage	◐	◐	◐	●
Flexibilität hinsichtlich Varianten-Mix	○	●	◐	◐
einfache Rekonfigurationsmöglichkeit	○	◐	●	●
Möglichkeit der Integration neuer Technologien	◐	◐	●	●
niedrige Komplexität der Produktionssteuerung	●	◐	◐	○
hohe Anpassungsgeschwindigkeit	○	◐	◐	●
niedrige Betriebskosten	●	○	◐	◐
Fähigkeit zur Produktion in »Stückzahl 1«	○	●	◐	●

Legende: ●: voll erfüllt, ◐: teilweise erfüllt, ○: nicht erfüllt

Wie in Abbildung 1.3 dargestellt, kann eine funktionale und kapazitive Anpassung des Produktionssystems auf zwei Arten erfolgen. Die zyklische Reinitialisierung oder die kontinuierliche Rekonfiguration des Systementwurfs. Im Zusammenhang mit dem kontinuierlichen Problemlösezyklus des Lebenszyklus eines Produktionssystems erfolgt eine Rekonfiguration vornehmlich dispositiver Komponenten, bspw. der Arbeitsorganisation und Aufgabenteilung im Produktionssystem. Im Fall der zyklischen Reinitialisierung des Systementwurfs zwischen Nutzungs- und Designphase erfolgt eine tiefergehende Neubewertung der Rand- und Umweltbedingungen und eine damit verbundene Reinitialisierung operativer, materieller und dispositiver Komponenten.

Im Rahmen der Auslegung wandlungsfähiger Produktionssysteme definieren Heger (2007, S.76f), Heinen et al. (2008, S.28) und Wiendahl et al. (2010, S.125f) die maßgeblichen Befähiger zu »Neutralität, Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität der Produktionsressourcen«. Diese Befähiger ermöglichen es, den Änderungen in den Anforderungen an das Produktionssystem in kürzester Zeit zu begegnen. Die Zuverlässigkeit und die Robustheit des Produktionssystems wird davon nicht beeinflusst (Koren 2010, S.18).

2.3 Montagesysteme und Mensch-Roboter-Kollaboration

Das Unterkapitel befasst sich mit den theoretischen Grundlagen der Montagesysteme und der Mensch-Roboter-Kollaboration als Sonderfall der hybriden Montage. Ein Montagearbeitsplatz ist eine lokale Einrichtung, der die Durchführung von Montageprozessen für ein Produkt erfüllt. Er lässt sich in die Hierarchiestufen Montagevorgang (Arbeitsplatz, Montagestation), Montagezelle (Arbeitssystem, Montageabschnitt) und Montagesystem (Gesamtarbeitssystem, Montageteilsystem) einteilen. Ein Montagesystem besteht immer aus der systemtechnischen Zusammenstellung materieller, dispositiver und operativer Komponenten. Im produktionswirtschaftlichen Sinn entspricht dies einer Kombination von Produktionsfaktoren zu einer wertschöpfenden Einheit (Spur & Stöferle 1986, S.593).

Eine Klassifizierung der Montagesysteme und -stationen kann anhand des Automatisierungsgrades (Level of Automation, LoA) (Fasth et al. 2008) erfolgen. Dieser betrachtet die physische Komponente der Ausführung einer Montagetätigkeit sowie die Steuerungs- und Informationsgewalt des Menschen in der Produktion. Nach Abbildung 2.5 können sieben Stufen unterschieden werden (Frohm et al. 2008, S.19).

Weiterhin lässt sich eine generalisierte Beschreibungsform in manuelle, automatische und teilautomatisierte Montagesysteme (Lotter 2012b, S.3) definieren. Ab einem Automatisierungsgrad größer zwei kann von einer (Teil-)Automatisierung gesprochen werden. Sollten die informationsverarbeitenden Schritte, wie auch die physischen Schritte mehrheitlich automatisiert ausgeführt werden, so spricht man von einer Automatisierung. Der Übergang von einem teilautomatisierten zu einem automatisierten Montagesystem ist dabei fließend und kann nur schwer exakt definiert werden.

Nach Spath & Rally (2013, S.12) repräsentieren manuelle und hybride Montagearbeitsplätze bis zu 75% aller Montagesysteme in Deutschland. Die Montage, als lohnintensiver Bestandteil der Fertigung (Lotter & Wiendahl 2012, S.VII), besitzt eine geringe Kostenverantwortung, kumuliert aber einen großen Anteil der Kostenentstehung (Ehrlenspiel et al. 2007, S.11f). Im Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung trägt die Montage durch ihren hohen Anteil an der Gesamtfertigungszeit (ein Drittel) maßgeblich zur Wertschöpfung der Produktion bei (Eversheim 1989, S.140). Demgegenüber steht der Aspekt, dass dadurch der Lohnkostenanteil der Montage mit mehr als 45% vergleichsweise hoch ausfällt und die

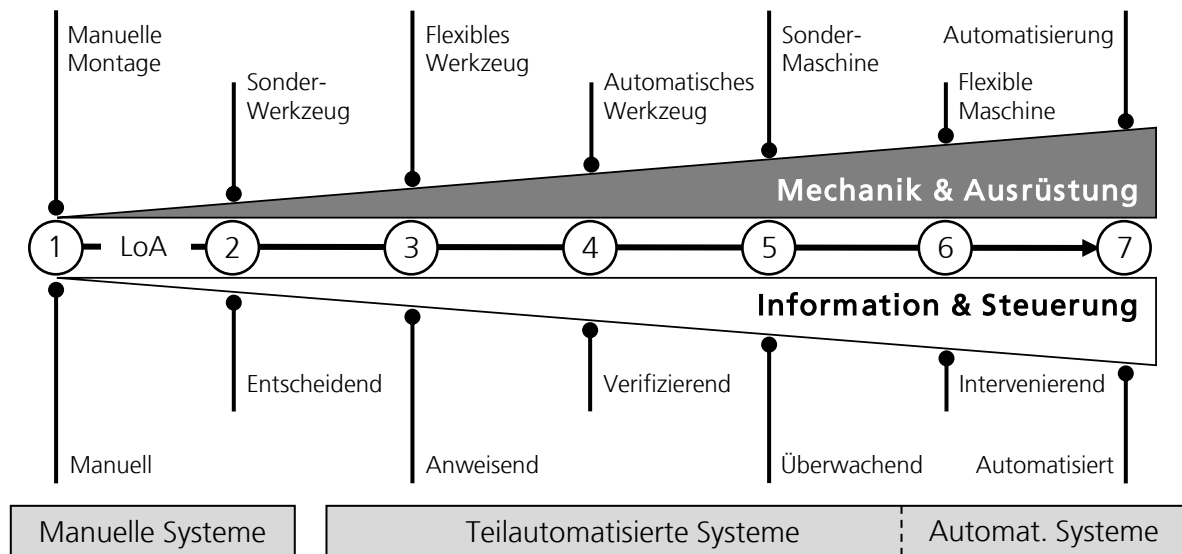


Abbildung 2.5: Level of Automation (LoA) aufgetragen hinsichtlich der »Mechanik und Ausrüstung« sowie der zugehörigen »Informationsverarbeitung und Steuerung«, eigene Darstellung i.A.a. Frohm et al. (2008, S.19) und Fasth et al. (2008, S.169)

Lohnintensität am Standort Deutschland einen besonderen Wettbewerbsfaktor darstellt (Tepper & Witte 2013, S.68). Gerade die Einzel- und Kleinserienfertigung ist zu einem hohen Grad auf Facharbeiter und deren manuelle Fähigkeiten angewiesen (Eversheim 1989, S.141; Lotter 2014, S.483) und folgt daher den Arbeitskräften und Märkten (Feldmann 2014a, S.6f).

Entsprechend den beispielhaften Anforderungen Stückzahl, Varianz oder gewünschter Flexibilität eignen sich die unterschiedlichen Montagesysteme für unterschiedliche Einsatzszenarien. Eine erste grobe Abgrenzung der Anwendungsbereiche je Montagesystem kann Abbildung 1.2 entnommen werden.

Weiterhin beschreiben Lotter & Wiendahl (2009) eine feinere Klassifizierung anhand der Kategorien Produktkomplexität (Anzahl der Einzelteile) und Ausbringung (Stückzahl/Stunde) – siehe Abbildung 2.6. In starren Montagesystemen, die vornehmlich automatisiert sind, liegt der Fokus auf dem technischen Systementwurf, während in flexiblen Montagesystemen die manuelle Arbeit dominiert und die Optimierung des Arbeitsplatzlayouts überwiegt (Lotter & Wiendahl 2009, S.128).

Bauer et al. (2015) deuten in ihren Arbeiten an, dass sich das von Lotter (2012b, S.3) definierte Anwendungsspektrum der hybriden Montage für die Automatisierung qualitätsbestimmender Füge- und Prüfvorgänge, insb. mit dem Einzug kollaborierender Leichtbau-

roboter weiter vergrößern wird. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 1.2 durch einen transparenten Kasten dargestellt.

2.3.1 Manuelle und teil-automatisierte Montagesysteme

Die manuelle Montage ist vornehmlich im Bereich variantenreicher Produktion kleinerer Stückzahlen oder der Montage komplexer Produkte anzutreffen. Sie zeichnet sich durch eine geringe Investition in Maschinen und Anlagen sowie eine hohe Flexibilität der Verrichtung aus (Lotter 2012b, S.3; Lotter 2012e, S.168). Das Kennzeichen der manuellen Montage ist, dass keine technischen Energieformen zum Einsatz kommen und die Ausführung der Bewegungen und Steuerung der Prozesse dem Menschen obliegt (Seliger & Neu 1999, S.10-30; Frohm et al. 2008, S.13). Im Gegensatz zur manuellen Montage werden im teil-automatisierten Montagesystem Teilumfänge durch technische Energieformen substituiert (Seliger & Neu 1999, S.10-31). Die Informationsverarbeitung findet in allen Fällen manuell statt. Die Einordnung der manuellen Montage kann Abbildung 2.5 entnommen werden.

Durch die physiologischen und kognitiven Fähigkeiten ist der Mensch in der Lage, sich an gegebene Randbedingungen anzupassen und neue Sachverhalte schnell zu erlernen (Frohm 2008, S.25; Lotter 2012d, S.109; Schließmann 2014, S.454). Die Stärken des Menschen liegen in der Sensitivität und Feinfühligkeit der Handhabung von Gegenständen, der Möglichkeit externes Feedback (optisch, akustisch, taktil) wahrzunehmen und zu verarbeiten sowie der kognitiven Fähigkeit, sich innerhalb kürzester Zeit neue Produkt- und Montagevarianten anzueignen (Ogorodnikova 2008, S.26). Weiterhin ist der Mensch prädestiniert für die Ausführung überwachender Tätigkeiten, wie bspw. die Kontrolle der Produktionsabläufe, die Durchführung von Wartungstätigkeiten oder die Qualitätskontrolle am Produkt (Fischer et al. 2017, S.17).

Die Nachteile manueller und mechanisierter Montagen resultieren in einer geringen Wirtschaftlichkeit bei großen Stückzahlen (Lotter 2012c, S.3). Einschränkungen ergeben sich aus der menschlichen Physiologie – bspw. im Bereich der Traglast, Reichweite und Ausdauer sowie Betrachtungen der Ergonomie. Diese zielen darauf ab, eine dauerhafte Schädigung des Menschen in der Produktion zu vermeiden, um ein wirtschaftlich und qualitativ optimiertes Ergebnis zu erhalten (Ogorodnikova 2008, S.31). Als Limit definieren Lotter & Wiendahl

(2009, S.128) die maximale Ausbringung eines manuellen Montagesystems zu circa 720 Einheiten/Stunde, was einer Taktzeit von fünf Sekunden entspricht – siehe Abbildung 2.6. Es gilt in diesem Fall jedoch anzumerken, dass solch kurze Taktzeiten theoretischer Natur sind und in der Realität in Verbindung mit manueller Arbeit nicht auftreten.

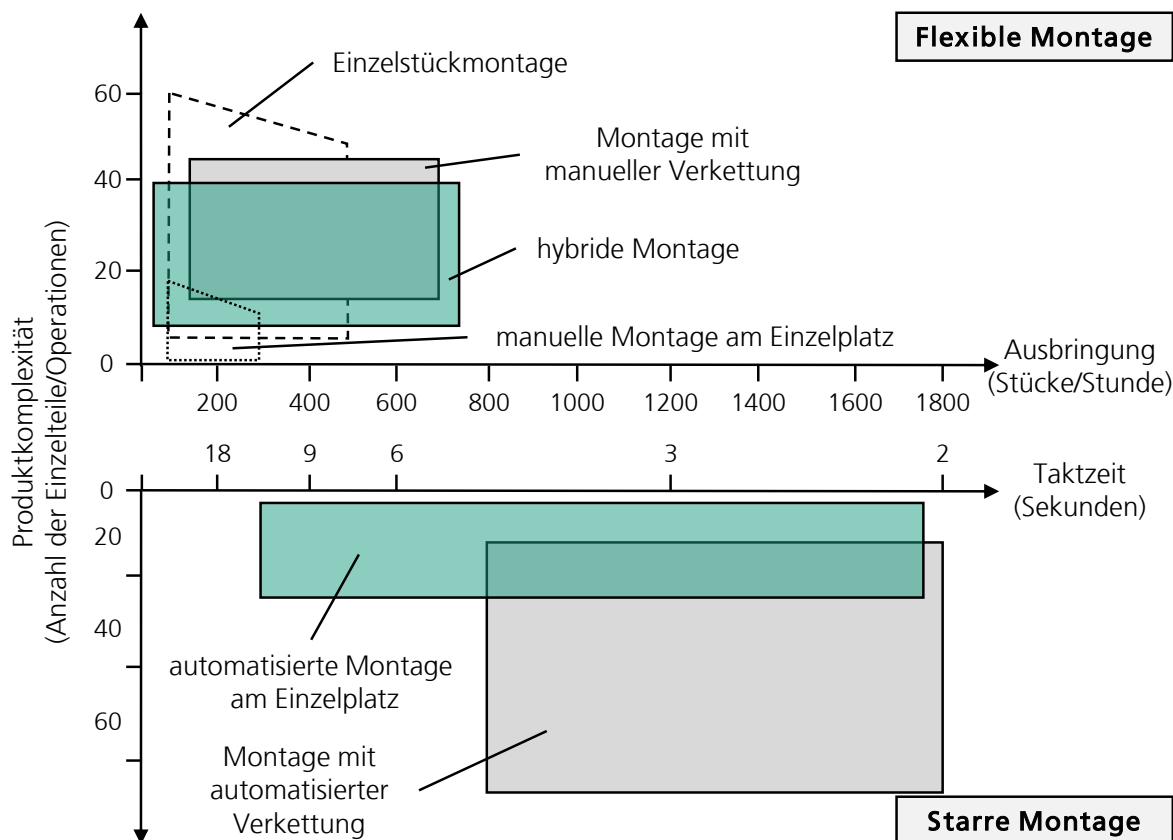


Abbildung 2.6: Klassifizierung der Montage anhand der Kategorien Produktkomplexität, Ausbringung und Taktzeit i.A.a. Lotter & Wiendahl (2009, S.129)

2.3.2 Automatisierte Montagesysteme

Wenn numerische Steuerungssysteme (NC) oder speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) die Ablaufsteuerung und Überwachung des Systems übernehmen und die Ausübung der physischen Tätigkeiten durch Maschinen erfolgt, spricht man von automatisierten oder automatischen Montagesystemen (Seliger & Neu 1999, S.10-31; Frohm et al. 2008, S.13). Automatische Montagesysteme sind vornehmlich in Bereichen hoher Stückzahlen und einer hohen Standardisierung des Produktumfangs zu finden. Ausbringungen von bis zu 1.800

Einheiten/Stunde sind dabei denkbar (Lotter & Wiendahl 2009, S.128), was einer Taktzeit von zwei Sekunden entspricht (vgl. Abbildung 2.6).

Der Einsatz automatisierter Montagesysteme ist aufgrund hoher Investitionen in Hardware und Engineering (Lotter 2012e, S.184) mit einem hohen wirtschaftlichen Risiko verbunden (Seliger & Neu 1999, S.10-31). Typische Implementierungen automatischer Systeme stellen Sondermaschinen dar, die meist speziell für einen Anwendungszweck oder ein Produkt gebaut werden, um in einem vorab definierten Betriebspunkt hocheffizient zu arbeiten (Koren 2010, S.6; Steegmüller & Zürn 2014, S.103f). Änderungen an automatischen Systemen sind meist nur unter hohem Aufwand in Bezug auf Auslegung, Konstruktion, Einkauf und Inbetriebnahme möglich (Koren 2010, S.7; Tilley 2017). Aus diesen Gründen nimmt in den letzten Jahren die Verwendung modularer Automatisierungskomponenten zur Generierung alternativer Systemlösungen (Rekonfiguration) zu, um Anwendungen bedarfsgerecht zu implementieren und Veränderungen der Randbedingungen proaktiv zu begegnen (Hesse 2012c, S.195).

Industrieroboter gehören der Klasse frei programmierbarer Bewegungseinrichtungen mit mehreren angetriebenen Achsen an. Die Bewegungen können in Bezug auf Abfolge und Art, allein durch Programmierung, ohne einen mechanischen Eingriff, angepasst werden. Es kann zwischen Robotern ohne selbsttätige Programmbeeinflussung (Ablauf eines festen Programms), mit selbsttätiger Programmselektion und selbsttätiger Programmadaption, bspw. durch Sensorik, unterschieden werden.

Industrieroboter zeichnen sich durch eine hohe Wiederholgenauigkeit, eine skalierbare Traglast und Reichweite sowie geringe Betriebskosten aus (Weck et al. 1999, S.10-19; Hägele et al. 2016, S.1392). Darüber hinaus können sie durch entsprechende Peripheriegeräte an vielfältige Anwendungsfälle des Fügens und Handhabens, wie auch an weiterführende Sonderoperationen, angepasst werden. Für die Montage von Produktvarianten bei mittleren bis hohen Stückzahlen sowie für komplexe, bahngesteuerte Fügeverfahren eignen sich Industrieroboter aufgrund der Flexibilität in der Konfiguration und Programmierung mehrerer Achsen besonders gut.

2.3.3 Hybride Montagesysteme

Eine teilautomatisierte Gestaltung von Montagesystemen erfolgt immer dann, wenn Teilschritte der Automatisierung zu aufwendig, technisch nicht möglich oder nicht wirtschaftlich abbildbar sind. Ebenso ist denkbar, dass eine Automatisierung erst zu einem späteren Zeitpunkt angestrebt wird (Seliger & Neu 1999, S.10-33). Wie bereits in Abbildung 1.2 dargestellt, wird durch die Teilautomatisierung eine Synergie der Vorteile manueller und automatischer Montage im kleinen bis mittleren Stückzahlbereich angestrebt.

Hybride Montagesysteme sind gut geeignet, den verkürzten Produktlebenszyklen und der wachsenden Produktvarianz in der Montage zu begegnen (Lotter 2012e, S.167). Über einen gleitenden Automatisierungsgrad kann ein optimiertes Verhältnis zwischen manuellem und automatischem Arbeitsinhalt für die zugrundeliegende Montageaufgabe definiert werden (Lotter 2012e, S.167). Auf diese Art lassen sich bspw. monotone Arbeitsschritte der Handhabung und qualitätsbestimmende Montageschritte des Fügens und Prüfens durch eine Automatisierung substituieren. Im Idealfall finden sich die varianzbildenden Montageprozesse in den manuellen Arbeitsinhalten wieder (Lotter 2014, S.489).

Es wird empfohlen, den Planungsprozess hybrider Montagesysteme von der manuellen Montage ausgehend zu starten. Über die Definition eines geeigneten Automatisierungsgrades gilt es, das richtige Verhältnis zwischen manueller und automatischer Verrichtung der Montageschritte zu ermitteln und eine optimale Arbeitsteilung zu identifizieren. (Lotter 2012e, S.167)

Ein weiterer Vorteil des hybriden Systementwurfs liegt in der höheren Abstraktion der Komponenten. Dieser geringere Spezialisierungsgrad eröffnet die Möglichkeit, Betriebsmittel nach Ende eines Produktlebenszyklus einfacher zu rekonfigurieren und in einem anderen Montageszenario wiederzuverwenden (Lotter & Wiendahl 2009, S.141; Lotter 2012e, S.169).

2.3.4 Mensch-Roboter-Kollaboration in der Montage

Die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) kann als ein Sonderfall der hybriden Montage verstanden werden. Die automatischen Montageschritte erfolgen durch eine Sonderform an Industrierobotern – den sogenannten kollaborierenden Robotern, auch »Cobots« genannt.

Abbildung 2.7 verdeutlicht, dass für den Fall der MRK mehrere Ausprägungen der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter existieren. Diese unterscheiden sich in der Art der Interaktion und der damit verbundenen Expositionsdauer der Gefährdung des Menschen durch den Roboter (Aaltonen et al. 2018).

Entsprechend der Norm DIN EN ISO 10218-2 werden vier Kollaborationsarten unterschieden, die ebenfalls in Abbildung 2.7 dargestellt sind. Nur im Fall der »Leistungs- und Kraftbegrenzung« kann von einer physischen Kollaboration und Interaktion zwischen Mensch und Roboter gesprochen werden. Hierbei teilen sich Roboter und Werker den identischen Arbeitsraum und ermöglichen so die gemeinsame Ausführung von Montageaufgaben.

Die Anwendungsfälle »Sicherheitsbewerteter überwachter Halt« und »Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung« repräsentieren eine Vollautomatisierung ohne trennende Schutzeinrichtung. Eine Interaktion zwischen Mensch und Roboter ist jederzeit möglich, beschränkt sich aber auf synchronisierte Bewegungen oder eine räumliche Koexistenz.

Im Fall des »Handführens« kann von einer Kooperation gesprochen werden, da beide Partner zur gleichen Zeit am identischen Werkstück zusammenarbeiten. In diesem Fall kann keine der Ressourcen ohne den jeweiligen Partner die Aufgabe durchführen.

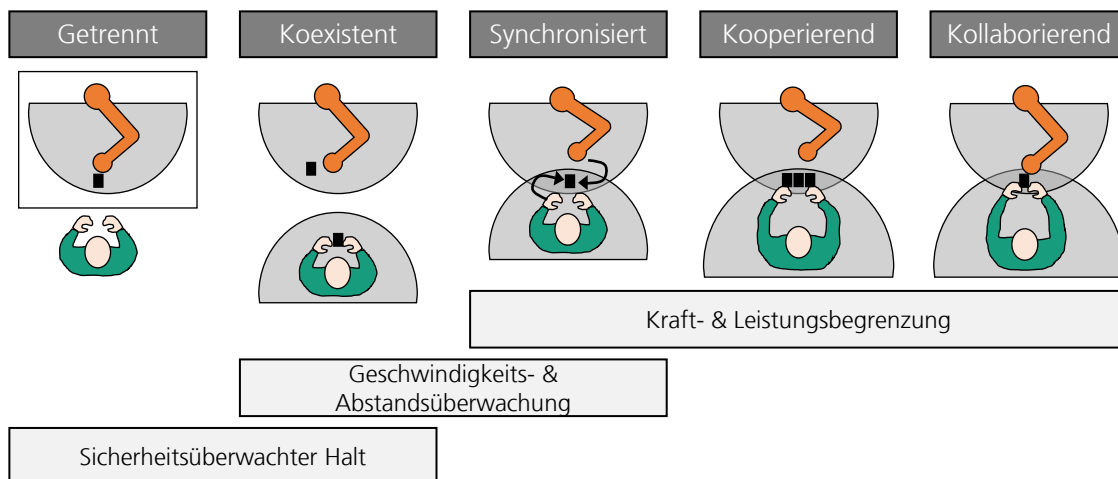


Abbildung 2.7: Interaktionsszenarien zwischen Mensch und Roboter, eigene Darstellung i.A.a. DIN EN ISO 10218-2 und Bauer et al. (2016, S.9)

Obwohl spezielle Komponenten und komplette MRK-Systeme seit mehreren Jahren am Markt verfügbar sind, wird das volle Potential kollaborierender Leichtbauroboter in der Montage oftmals nicht gehoben (Naumann & Fechter 2015, S.14f). Eine Vielzahl

hybrider Montageszenarien, die in der Produktion anzutreffen sind, verwenden lediglich ein koexistentes Interaktionsszenario und nutzen das volle Spektrum der physischen Interaktion nach Abbildung 2.7 nicht aus.

Nach Aussagen von Bauer et al. (2016, S.9f) liegt der Fokus aktueller Anwendungen vielmals auf der Verbesserung der Ergonomie in manuellen Montageszenarien durch bspw. Vermeidung von Überkopfarbeit und Monotonie in den Montagetätigkeiten.

Die zeitlich optimierte Sequenz der Arbeitsabläufe und -inhalte zwischen Mensch und Roboter stellt eine zentrale Herausforderung bei der Auslegung von MRK-Systemen dar (Matthias & Ding 2013). Die Bestimmung einer optimierten Arbeitsverteilung und Operationsreihenfolge ist daher Bestandteil aktueller Forschungen und soll in Kapitel 3.1 detailliert betrachtet werden. Es gilt, durch eine zeitliche und lokale Koordination der Prozesse von Mensch und Roboter eine gegenseitige Behinderung auszuschließen, die verwendeten Ressourcen gleichmäßig auszulasten (Bänziger et al. 2018) und einen fließenden Arbeitsablauf zu erreichen (Hoffman 2019).

Weiterhin ist zu vermeiden, dass der Roboter den Arbeitsablauf des Menschen dominiert und der Mensch zu einem »Lückenbüßer« der Produktionsabläufe der Maschine degradiert wird (Fischer et al. 2017, S.10). Eventuelle Wartezeiten des Menschen (Lotter 2012e, S.167) oder durch den Arbeitsablauf bedingte Stresssituationen sind daher zu vermeiden.

Die limitierenden Faktoren MRK-basierter Montagesysteme sind in Abbildung 2.8 dargestellt. Es kann festgehalten werden, dass der optimale Betriebspunkt hybrider Montagesysteme, die variantenreiche Produktion kleinerer bis mittlerer Stückzahlen (vgl. Abbildung 1.2) heutzutage mehrheitlich durch Maßnahmen einer optimierten Auftragssteuerung und Ablauforganisation oder durch die Schaffung modularer Produktbaukästen erreicht wird. Weiterhin greifen konventionelle Ansätze der Nutzen- und Wirtschaftlichkeitsberechnung³ zu kurz, was bspw. eine Quantifizierung der ergonomischen Vorteile hybrider Montagearbeitsplätze unmöglich macht (Buxbaum & Häusler 2020, S.311). Nachteilig wirken sich ebenso die höheren Fixkosten durch die Investition in automatisierte Produktionsressourcen aus – vgl. Hypothese 3 aus Kapitel 1.5.

Ein weiterer Grund, der gegen MRK-Systeme spricht, sind die gesteigerten Anforderungen an eine Qualifizierung und Sicherheitsfreigabe nach Maschinenrichtlinie (Awad et al.

³vgl. Nutzenbewertung der digitalen Fabrik (Landherr et al. 2013, S.124)

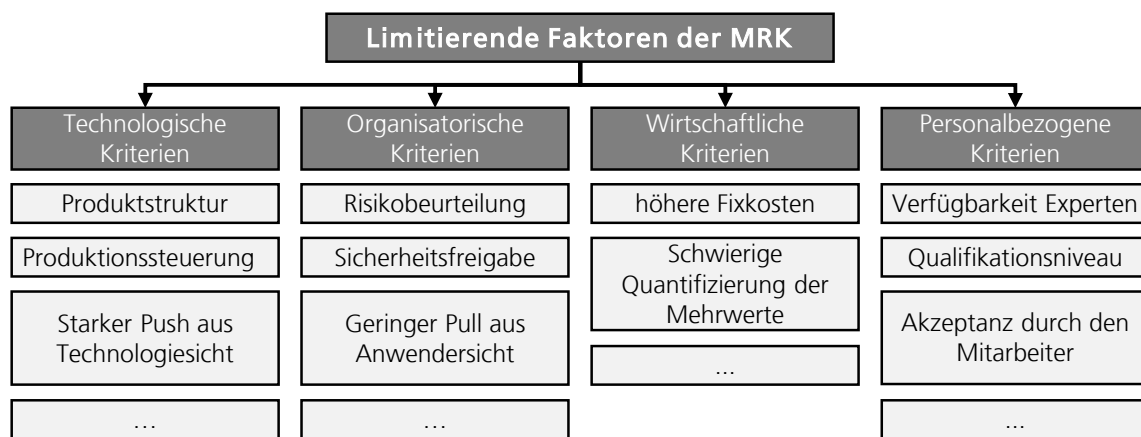


Abbildung 2.8: Limitierende Faktoren, die zum aktuellen Zeitpunkt gegen eine flächendeckende Einführung der MRK sprechen, eigene Darstellung i.A.a. die Bewertungskriterien für Montagesysteme nach Eversheim (1981)

2017; Oberer-Treitz 2018). Ebenso existiert ein Mangel an erfahrenen und qualifizierten Mitarbeitern, welche die Anlagen konzeptionell entwickeln, in Betrieb nehmen und operativ betreuen können.

Wie bei jeder Einführung einer neuen Technologie kann konstatiert werden, dass nach einer anfänglichen, teilweise inflationären und technologisch getriebenen Euphorie (vgl. »Gartner Hype-Zyklus«), eine Phase überzogener Erwartungen Einzug gehalten hat. Das »Tal der Enttäuschungen« nach einem anfänglich starken »Push aus Technologiesicht«, getrieben aus der breiten Verfügbarkeit der neuartigen Leichtbaurobotertechnologie, wird aktuell durchschritten.

Wöllhaff (2020, S.111) schreibt, dass "[...] MRK-Roboter in den nächsten zehn Jahren keine große praktische Bedeutung haben werden". Erst mit der Entwicklung neuer Technologien in Bezug auf Schnelligkeit und Reichweite, geringerem Implementierungsaufwand und gesteigerter Intelligenz sind nach seiner Aussage Fortschritte denkbar (Wöllhaff 2020, S.111f).

Diese Aussage deckt sich mit dem Kern der Ausarbeitung dieser Arbeit. Durch eine neue Generation an Planungstools können hybride Montagesysteme stärker unter einem arbeitsorganisatorischen und betriebswirtschaftlichen Aspekt geplant werden, was zu einem stärkeren »Pull aus Anwendersicht« der Technologie führen kann.

2.4 Planung von Montagesystemen

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Grobplanung hybrider Montagesysteme für die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK). Aus diesem Grund soll eine Unterteilung des Planungskapitels vorgenommen werden. Einerseits in die Betrachtung grundlegender Planungsansätze der Montagesystemgestaltung und andererseits in die Methoden der Konzeption technischer Systemlösungen.

Die für die vorliegende Arbeit relevanten Planungsebenen der Fabrik beziehen sich auf die Strukturplanung eines Montagesystems, insbesondere die Planung des Montageteilsystems (Eversheim 1989, S.206f) oder der Montagestation (Hernández Morales 2003). In der theoretischen Herangehensweise kann für diese Planungsebene zwischen einer produkt- und einer systemgetriebenen Planung unterschieden werden (Steinwasser 1997; Cuiper 2000, S.72f).

Im Fall der produktgetriebenen Planung erfolgt das Planungsvorgehen anhand von Produkt- (Einzelteile, Montagevorrang, Qualifikationsbedarfe, ...) und Produktionsdaten (Ausbringung, Stückzahlen, ...) (Eversheim 1989, S.195; Cuiper 2000, S.75). Unter Berücksichtigung eines Top-Down-Ansatzes der Montageplanung (vgl. Abbildung 1.8) hat die Produktstruktur einen maßgeblichen Einfluss auf den Anlagenaufbau, die Bauteilgestalt auf die Handhabung und die gewählte Verbindungstechnik auf die einzusetzenden Fügeverfahren (Kluge 2011, S.40; Müller 2013, S.712).

Im Fall der system- oder anlagengetriebenen Planung sind die Produkte und Prozesse so zu gestalten, dass diese auf bestehenden Anlagen gefertigt werden können (Cuiper 2000, S.76; Landherr 2014). Der Gedanke der Wiederverwendung und Rekonfiguration vorhandener Betriebsmittel, gewinnt unter der eingangs beschriebenen Berücksichtigung kürzerer Produktlebenszyklen zunehmend an Bedeutung. Es gilt, die Anforderungen aus Sicht der Funktionsstruktur sowie der gegebenen Randbedingungen der Montageaufgabe abzuleiten und mit den Fähigkeiten der (vorhandenen) Ressourcen abzugleichen. Die integrierten Funktionalitäten und Eigenschaften der Ressourcen eines Montagesystems rücken in diesem Vorgehen in den Vordergrund (Steinwasser 1997, S.48f).

2.4.1 Montageplanung

Nach Müller (2013, S.704) ist die Kernaufgabe der Montagesystemgestaltung *“[...] die Definition der Einzelfunktionen der Montage und die sinnvolle Auswahl, Zusammenstellung und Vernetzung einzelner Prozesse, basierend auf den Anforderungen des zu montierenden Produkts”*. Die Montageplanung hat die Aufgabe, Montagesysteme möglichst effizient und wirtschaftlich zu gestalten und die Zusammenhänge der unterschiedlichen Teilbereiche eines Montagesystementwurfs aus Produkt, Prozess und Ressource unter gegebenen Randbedingungen in Einklang zu bringen (Müller 2013, S.713). Mit zunehmender Variantenvielfalt und Verringerung der durchschnittlichen Losgrößen erhöht sich die Komplexität der Auswahl optimaler Ressourcen und die Anzahl der Zusammenhänge und Parameter im Systementwurf (Müller et al. 2013b, S.366).

Das Unterkapitel betrachtet fünf Ansätze der Montageplanung, die in Abbildung 2.9 dargestellt sind (Eversheim 1989, S.160f; Konold & Reger 2009, S.32f; Hartel & Lotter 2012, S.365f; Witte et al. 2013, S.335). Die Verfahren unterscheiden sich in der Granularität des Vorgehens und des Detaillierungsgrads, weisen aber eine vergleichbare Sequenz der vier aufeinanderfolgenden Phasen der Analyse, Grobplanung, Feinplanung und Realisierung auf (Stähr 2020, S.22).

Die »Planungssystematik der REFA« stellt einen verfahrens- und anlagenneutralen Leitfaden für die Planung komplexer Produktionssysteme dar (REFA 1990; Hartel & Lotter 2012, S.365ff). Der Aufbau gliedert sich in sechs Stufen aus Analyse und Planung (REFA 2014, S.9), denen zumeist Methoden, Checklisten oder Gestaltungsempfehlungen zugeordnet sind. Am Ende einer jeden Stufe steht eine Entscheidung an. Der Automatisierungsgrad wird bspw. anhand der sieben Einflussgrößen nach Konold & Reger (2009, S.42ff) bestimmt. So beeinflussen bspw. eine hohe Absatzmenge, ein langer Produktlebenszyklus, verfügbares Kapital oder hohe Personalkosten eine Automatisierung, während eine hohe Zahl an Bauteilen (Produktkomplexität), ein hoher Schwierigkeitsgrad der Montage oder eine hohe Variantenvielfalt eine manuelle Montage attraktiver erscheinen lassen.

Im »Vorgehen nach Eversheim« werden vier aufeinander aufbauende Schritte definiert, die sich inhaltlich am Vorgehen der REFA orientieren (Eversheim 1989). Im Schritt der Feinplanung findet eine Unterteilung nach Anforderungsermittlung der Systemkomponenten

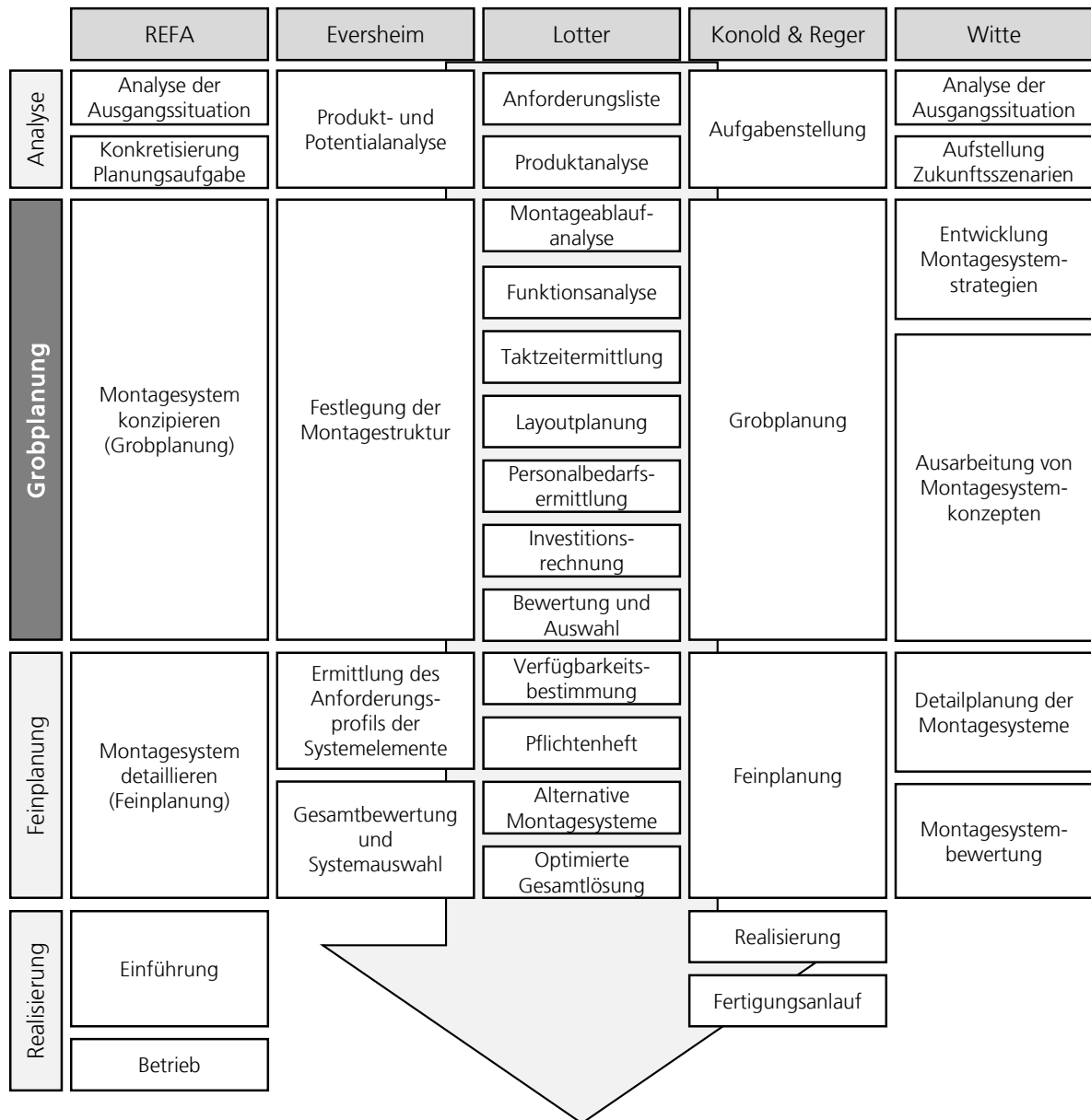


Abbildung 2.9: Vergleich der Vorgehensweisen der Planung von Montage- und Produktionssystemen nach Eversheim (1989), Lotter (1992), Konold & Reger (2009), Hartel & Lotter (2012), Witte et al. (2013) und REFA (2014), Darstellung i.A.a. Kluge (2011, S.47)

sowie deren Bewertung und Auswahl statt. Dieser Schritt findet sich ebenso bei Lotter (1992) und Witte et al. (2013) wieder.

Die »Planungssystematik von Lotter« definiert elf konsekutive Schritte der systematischen Planung. In der Regel werden im Schritt der Lösungssynthese mehrere Varianten iteriert, um vor dem Hintergrund unsicherer Prognosen eine Entscheidungsgrundlage zu haben. Über Nutzwertanalysen, die Berechnung der Montagekosten je Stück oder Verfahren der Wirtschaftlichkeitsrechnung kann nachfolgend eine Auswahl getroffen werden (Lotter 1992; Hartel & Lotter 2012, S.367-372).

Das »Vorgehen nach Konold & Reger« gliedert sich in die fünf Phasen der Aufgabenstellung, Grobplanung, Feinplanung, Realisierung und Fertigungsanlauf (Konold & Reger 2009, S.32f). Mehrere Systemalternativen werden ausgehend von der Aufgabenstellung grob konzipiert, nachfolgend detailliert und in einer qualitativen und quantitativen Bewertung miteinander verglichen (Konold & Reger 2009, S.39f).

Das »Vorgehen nach Witte et al.« orientiert sich inhaltlich am Planungsvorgehen von Konold & Reger (2009). Zur Bewertung unterschiedlicher Szenarien bzgl. unsicherer Anforderungen an das Montagesystem findet die Szenariotechnik Anwendung. Üblicherweise wird von drei Zukunftsszenarien in den Ausprägungen neutral, pessimistisch und optimistisch ausgegangen, die miteinander verglichen werden. Im Mittelpunkt der Betrachtungen steht eine wirtschaftliche Abwägung des Risikos einer Investitionskostenentscheidung (Witte et al. 2013).

2.4.2 Konzeption technischer Systemlösungen

Abbildung 2.9 skizziert den Ablauf der Montageplanung. Von Bedeutung für die weitere Arbeit ist in diesem Zusammenhang speziell der Schritt der Grobplanung, da dieser maximale Auswirkungen auf die technischen und betriebswirtschaftlichen Eigenschaften des Montagearbeitsplatzes hat und maßgeblich das Endergebnis der Systemplanung beeinflusst. Nach Eisele (2018, S.69) enthält die Phase der Grobplanung die Schritte, die die Struktur des Systems definieren und daher für die Verschwendung im Montagesystem bedeutsam sind.

Die Schritte der Feinplanung, der Anforderungsanalyse sowie der Realisierung nach Abbildung 2.9 liegen nicht im Fokus dieser Arbeit und werden daher nicht weiter betrachtet.

Das vorliegende Unterkapitel greift aus diesem Grund explizit Methoden der Formalisierung der Auswahl und Gestaltung technischer Einzel- und Subsysteme im Schritt der Grobplanung auf. Entsprechend dem später adressierten V-Modell der VDI 2206 unterstützen alle aufgeführten Methoden den quantitativen Vergleich bei der Auswahl einzelner Systemkomponenten sowie die iterative Synthese von Einzel- zu Gesamtlösungen. Alle Methoden eint das Vorgehen der Dekomposition eines komplexen Problems in einzelne, funktionale Teilprobleme mit anschließender Synthese der Gesamtlösung aus Einzelkomponenten (Winzer 2016). Eine grafische Gegenüberstellung der Vorgehensweisen findet sich in Abbildung 2.10.

Das »Systems Engineering« beschreibt eine durchgängige, fachübergreifende Methode der Konzeption aufwendiger technischer Systeme und umfasst die Aspekte paralleler Entwicklungsaktivitäten heutiger multidisziplinärer Systeme. Bahill & Gissing beschreiben Systems Engineering als eine Vorgehensweise zur gemeinsamen Identifikation von Problemen, der Zuordnung zu Systemen und der Lösung in interdisziplinären Teams (Bahill & Gissing 1998). Grundlage hierfür bietet die Auffassung, dass alle Produkte und Prozesse einen Systemcharakter haben und sich jedes System spezifisch charakterisieren lässt (Winzer 2016). Federführendes Ziel ist die Integration aller beteiligten (Teil-)Bereiche über den Entwicklungsprozess bis zum Projektabschluss.

Das »Model-Based Systems Engineering (MBSE)« erweitert das Vorgehen des Systems Engineering und nutzt die Möglichkeiten einer integrativen IT-Landschaft zur funktionalen Beschreibung und Auslegung der Systemarchitekturen. Bereits zu einer frühen Planungs- und Konzeptionsphase werden physikalische Modelle in den Planungsprozess eingebunden, die eine disziplinübergreifende Simulation unterstützen (Eigner 2013). In den Arbeitsschritten der Modellbildung und -analyse sowie der Systemabsicherung und -integration unterstützt das Vorgehen beim Anforderungsmanagement und der Änderungsnachverfolgung.

Das Hauptaugenmerk der »Methode des Entwurfsprozesses mechatronischer Systeme (VDI 2006)« liegt auf Vorgehensweisen, Methoden und Werkzeugen in einer frühen Phase der Entwicklung mit Schwerpunkt auf dem Systementwurf (VDI 2206, S.8). Das Vorgehen stützt sich auf zwei zentrale Kernelemente:

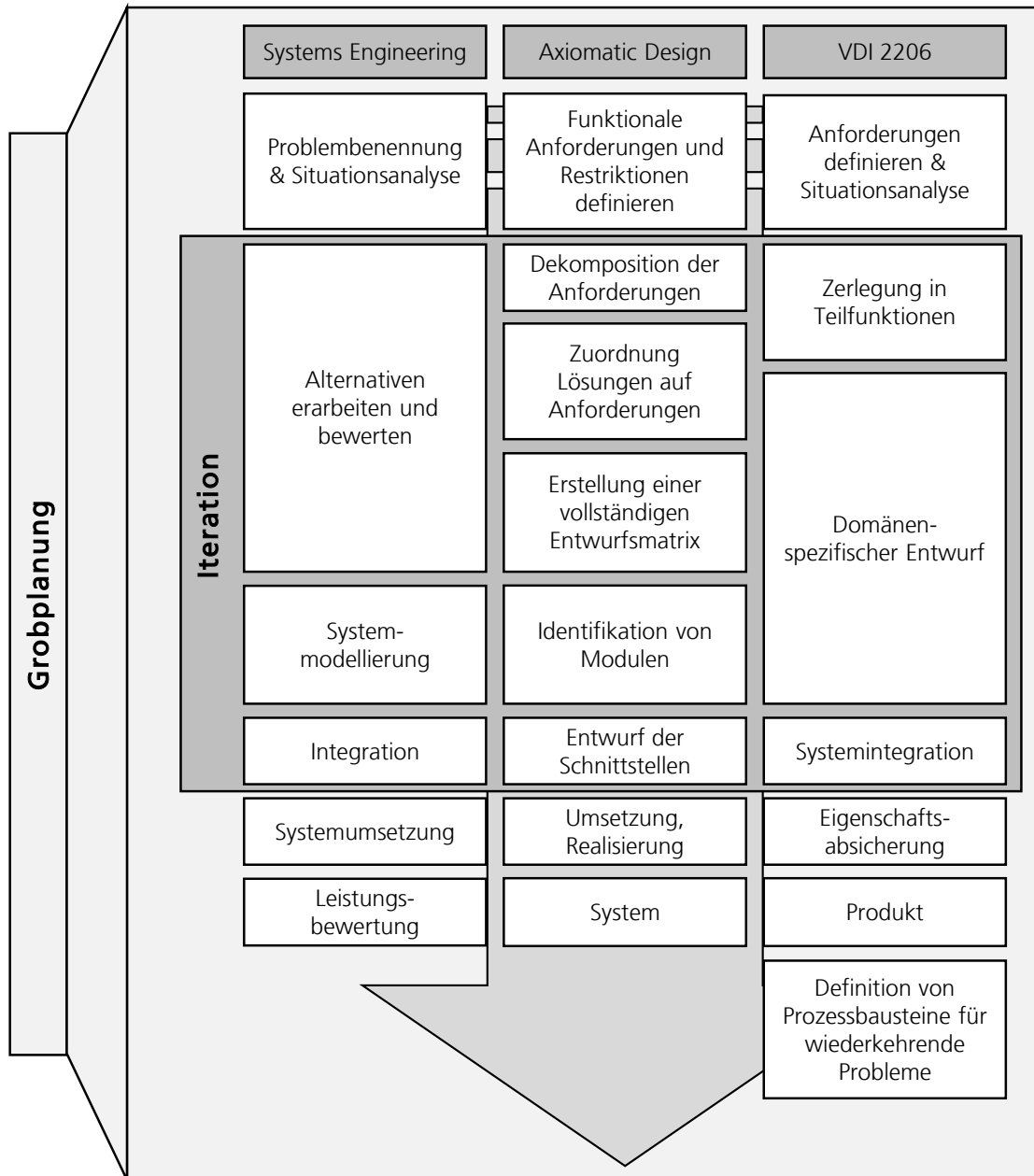


Abbildung 2.10: Vergleich der Konzeptionsmethoden technischer Systemlösungen nach Suh (1990), Bahill & Gissing (1998), VDI 2206 und Lüttich & Fiege (2008) für den Planungsschritt der Grobplanung, eigene Darstellung

Der »Problemlösezyklus auf Mikroebene« zur Situationsanalyse und Zielübernahme geht in eine wechselseitige Synthese und Analyse sowie eine iterative Bewertung und Entscheidung zur Lösungsfindung über. Grundlegender Inhalt dieses Arbeitsschritts ist die Suche nach Lösungen für ein gegebenes Problem auf Basis einer Situationsanalyse oder Zielformulierung. Zur Strukturierung logischer Abfolgen kritischer Teilprozesse wird als zweites Kernelement das »V-Modell« aus dem Bereich der Softwareentwicklung übernommen und an die Anforderungen mechatronischer Systeme adaptiert. Das V-Modell beschreibt den generischen Entwurf und umfasst das Konzipieren, ausgehend von konkreten Anforderungen eines Entwicklungsauftrags zu einem konkreten technischen System. Je durchlaufenem Zyklus des V-Modells nimmt der Reifegrad und die Konkretisierung des Systementwurfs zu. Der zyklische Schritt der Eigenschaftsabsicherung des integrierten Gesamtsystems stellt sicher, dass die spezifizierten Anforderungen erfüllt werden.

Eine dritte Herangehensweise stellt die Methode des »Axiomatic Designs« dar, die von Suh als Methode zur Beherrschung komplexer Systeme entwickelt wurde (Suh 1990). In den letzten Jahren hat die Methode vermehrt Einzug in Anwendungsfälle der Produktionstechnik gehalten und wird dort wissenschaftlich untersucht (Babic 1999; Cochran et al. 2001; Rauch 2013, S.102f; Fechter et al. 2016; Weber 2018, S.29f).

Axiomatic Design dient als Grundlage für den strukturierten Entwurf beliebiger Objekte und Systeme und basiert auf einem formalisierten Top-Down-Ansatz, ausgehend von den dokumentierten Anforderungen des Kunden, hin zur Integration von Prozessen und Funktionalitäten.

Der kreative Prozess der Modellierung wird im Axiomatic Design systematisiert, indem die unterschiedlichen Betrachtungsgegenstände voneinander abgegrenzt werden. Durch dieses Vorgehen soll die Modellierung vereinfacht und zufällige »Trial-and-Error«-Schritte im Entwurf reduziert werden (Suh 2001; Fiege 2009). Axiomatic Design stützt sein Vorgehen dabei auf zwei grundlegende Annahmen:

- Das **Unabhängigkeitsaxiom** beschreibt das ideale Design eines Systems als Zustand der Unabhängigkeit der Elemente, ohne Wechselwirkungen zwischen den funktionalen Anforderungen⁴.

⁴”Maintain the independance of the functional requirements [...].” (Suh 1990)

- Das **Informationsaxiom** besagt, dass von allen Lösungen, die das Unabhängigkeitsaxiom erfüllen, diejenige Lösung zu präferieren ist, die den geringsten Informationsgehalt aufweist⁵.

Interessant sind im Kontext der Planung von Produktionssystemen beide Axiome, besonders interessant für die vorliegende Arbeit ist jedoch das Informationsaxiom, da es die Qualität einer Lösung bewertet. Es eignet sich aus diesem Grund gut, um die Komplexität von Prozessen oder die technische Eignung einer Ressourcenauswahl zu bewerten (Brown 2006; Slatineanu et al. 2017; Kulak & Kahraman 2005).

Tabelle 2.2 stellt die Verfahren der technischen Konzeption anhand der nachfolgenden Kriterien gegenüber:

- **Strukturierung zeitlicher Abfolgen:** Die Verfahren sollen einen strukturierten Ablauf zeitlich aufeinander folgender Schritte vorweisen. Dies gilt insbesondere unter dem Aspekt der softwaretechnischen Implementierung.
- **Möglichkeit der Iteration:** Die Verfahren sollen ein iteratives Vorgehen abbilden können, da angenommen wird, dass sich ein optimiertes Ergebnis erst nach mehreren Iterationsschritten einstellen wird.
- **Quantifizierbarkeit der Entscheidungen:** Alle Entscheidungen und Bewertungen sollen quantifizierbar und nachvollziehbar sein.
- **Formalisier- und Systematisierbarkeit:** Für eine softwaretechnische Implementierung ist ein hoher Grad an quantitativer Formalisierung vorteilhaft.

2.5 Informationsmodellierung

Im Zuge der vierten industriellen Revolution gilt es, standardisierte Schnittstellen und Austauschformate zwischen den Engineering-Systemen zu realisieren (Vogel-Heuser 2014, S.41f). Insbesondere die Ausgestaltung von Anlagen und Systemen erfordert einen fachbereichsübergreifenden Austausch von Engineering-Daten, um parallele Prozesse effektiv und

⁵“Minimize the information content of the design [...]“ (Suh 1990)

Tabelle 2.2: Bewertung und Gegenüberstellung der technischen Konzeptionsmethoden

	Strukturierung zeitlicher Abfolgen	Möglichkeit der Iteration	Quantifizierbarkeit der Entscheidungen	Formalisier- und Systematisierbarkeit
Systems Engineering	●	●	○	◐
Model-Based Systems Engineering	●	●	●	◐
VDI 2206	●	●	○	◐
Axiomatic Design	●	●	◐	●

Legende: ●: voll erfüllt, ◐: teilweise erfüllt, ○: nicht erfüllt

effizient zu unterstützen und gewerkeübergreifende Konsistenzprüfungen zu ermöglichen (Biffel et al. 2017, S.208).

Für Unternehmen und Organisationen ist es in diesem Kontext entscheidend, dass Gruppen und Individuen mit der gleichen Aufgabe das gleiche Verständnis aus den gleichen Informationen ableiten. Jedoch ist dies, aufgrund unterschiedlicher Informationsstände und Vorkenntnisse, oft nur schwer zu erreichen. Gleiches Verständnis kann nur geschaffen werden, wenn alle Individuen Zugang zu den gleichen formalen Informationen erhalten (Schäffer et al. 2018).

Dies bedeutet, dass Informationsbestandteile strukturiert vorliegen und einen spezifischen Kontext und Maßstab sowie die zugehörigen Regeln der Interpretation bereitstellen müssen. Informationsmodelle repräsentieren in diesem Zusammenhang Modelle, wie Informationen interpretiert werden sollen. Damit können die Nutzung und der Nutzer des Modells unterschieden und eine korrekte Interpretation gewährleistet werden (Nielsen 2003; Diedrich et al. 2017, S.422f).

Zum besseren Verständnis der Informationsmodellierung ist es wichtig zu verstehen, wie die Bedeutung einer Information ausgetauscht und wie einer möglichen Fehlinterpretation vorgebeugt wird. Der Mensch nutzt zum Verständnis der Bedeutung einer Information den zusätzlich verfügbaren Kontext (Wissen, Erfahrung) und wahrnehmbare Signale (Mimik, Gestik), die mitgesendet werden. Informationen besitzen daher immer einen Kontext, der

die Bedeutung einschränkt und Mehrdeutigkeiten vermeiden soll.

Maschinen besitzen diese Möglichkeit der Kontextwahrnehmung nicht. Sie verstehen die Welt durch die Anwendung von Daten- und Informationsmodellen. (IEC 2019, S.23f)

Das Ziel der Informationsmodellierung ist der Transfer impliziten Wissens der realen Welt in eine maschinenlesbare Form. Dies geschieht in den meisten Fällen durch eine manuelle Kapselung der Information als explizites Wissen (IEC 2019, S.26f). Es gilt zu beachten, dass Informationsmodelle nicht besser sind als erstens das Wissen der modellierenden Person und zweitens die Fähigkeiten der Modellierung ebendieser Person (IEC 2019, S.26).

Ontologien als eine Form der technischen Informationsmodellierung beschreiben im Themenfeld der Computerwissenschaften "*[...] eine formale, explizit digitale Spezifikation (Konzeptualisierung) einer Wissensdomäne*" (IEC 2019, S.24), die Informationen als grundlegende Entitätstypen einer Anwendungsdomäne und deren strukturelle Beziehungen untereinander abbilden. Sie beschreiben somit semantisch relevante Beziehungen, die zur Dateninterpretation auf Maschinen und Systemen genutzt werden können (Sabou et al. 2017; IEC 2019, S.24). Die Wissensdomäne umfasst dabei sowohl die Syntax (Form) als auch die Semantik (Inhalt, Bedeutung) (Hitzler 2008).

2.5.1 Modellierung der Domänen eines Montagesystems

Nach Nyhuis et al. (2013) ist ein Produktionssystem ein sozio-technisches System, das Input (bspw. Betriebsmittel, Methoden, Know-how) in wertschöpfenden (bspw. Fertigung oder Montage) und assoziierten Prozessen (bspw. Handhaben, Sonderoperationen) zu Output (bspw. Produkte, Kosten, Reststoffe) transformiert (Mersmann et al. 2013, S.18f).

Ausgehend vom integralen Montagemodell (Rampersad 1995; Steinwasser 1997, S.50f) hat sich eine Dreigliederung der Wissensdomäne Montagesystem etabliert, die eine Abbildung der hierarchischen und logischen Zusammenhänge ermöglicht. Die Montageplanung ist dabei mit der Konstruktion vergleichbar, da die Domänen Produkt, Prozess und Ressource (PPR) gemeinsam betrachtet werden müssen (Rudolf 2007, S.87; Müller 2013, S.712). Diese Gliederung findet sich bspw. auch in der Modellierung der digitalen Fabrik wieder (Stanev 2012, S.9f; Cutting-Decelle et al. 2016, S.220). Für den PPR-Ansatz existieren

ausführliche Definitionen, wie sie bspw. im AutomationML-Austauschformat beschrieben und implementiert sind (Drath 2010, S.83f).

Um eine übergreifende Informationsmodellierung zu erhalten, gilt es, die Zusammenhänge und Inhalte der einzelnen Domänen eines Montagearbeitsplatzes zu beschreiben und zueinander in Relation zu setzen. Dabei ist entscheidend, dass unterschiedliche Wissensrepräsentationen in Abhängigkeit der konkreten Aufgabenstellung ableitbar sind (Rudolf 2007, S.89) und Erzeugnisse eines Engineering-Arbeitsschritts verlustfrei und mit geringem Aufwand wieder- und weiterverwendet werden können (Schäffer et al. 2019, S.62).

2.5.2 Modellierung von Montagesystemen und -prozessen

Die Domänen Produkt und Ressource eines Montagearbeitsplatz werden, wie bereits in Abbildung 2.2 dargestellt, über Montageprozesse zueinander in Relation gesetzt (Brassler & Schneider 2001). Diese leiten sich aus den Eigenschaften des zu fertigenden Produkts, den zugehörigen Fügeverfahren und den gegebenen Rand- und Umweltbedingungen der Montageaufgabe ab. Der Prozess verwaltet hierbei die zum Fertigungs- oder Montagefortschritt beitragenden Aktionen (Jonas 2000).

Prozesse der Montage können nach VDI 2860 für die Handhabung sowie nach DIN/ISO 8593 und DIN/ISO 8580 für das Fügen beschrieben und klassifiziert werden. Für die Montage ergeben sich die Basisoperationen zu Handhaben, Fügen, Inbetriebnahme, Hilfsprozesse und Sonderoperationen (Müller 2013, S.703f). Diese sind in Abbildung 2.11 dargestellt. Eine Funktionsfolge der Montage besteht nach Hartel & Lotter (2012, S.370) grundsätzlich aus den Schritten Ordnen, Zuführen, Fügen und Prüfen.

Die Basisoperationen des Handhabens, Fügens, der Inbetriebnahme sowie der Sonderoperationen besitzen in der Montage einen wertschöpfenden Anteil und können aus diesem Grund der Primärmontage zugeordnet werden. Hilfsprozesse stellen Sekundäranteile der Montage dar, die keinen direkten Beitrag zum Montagefortschritt leisten und daher keine Steigerung der Wertigkeit des Produktes erzeugen (Spur & Helwig 1986, S.591; Müller 2013, S.709).

Ein Ansatz der Modellierung von Montageprozessen ist es, die Vorgänge in wiederverwendbare Funktionsblöcke zu unterteilen, die detailliert durch Prozessparameter beschrie-

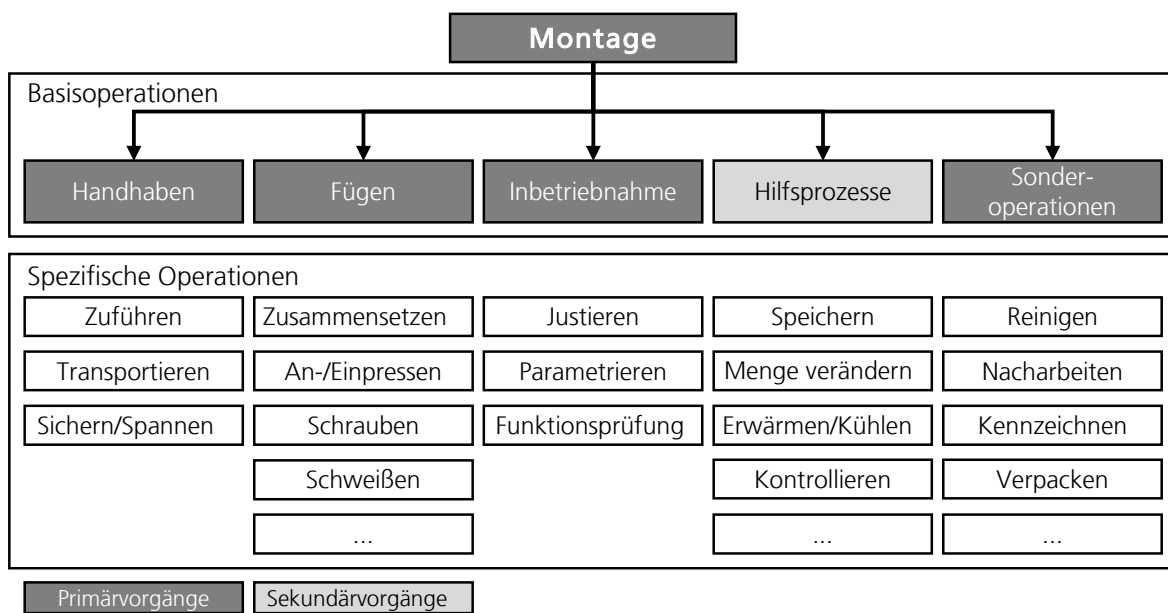


Abbildung 2.11: Basisoperationen der Montage, klassifiziert nach Primär- und Sekundärvorgängen (Müller 2013, S.705)

ben werden können. Dieses Vorgehen wird hierarchische Task Analyse (HTA) genannt (Frohm 2008, S.16; Costa Mateus et al. 2018) und findet sich bspw. in der fähigkeitsbasierten Programmierung von Industrierobotern (Andersen et al. 2014) oder der fähigkeitsbasierten Planung von Montagesystemen (Lohse et al. 2005; Reichenbach 2010) wieder.

Abbildung 2.12 illustriert die hierarchische Unterteilung eines Auftrags in Montageprozesse, -schritte und zugehörige Funktionalitäten der Montageoperationen (Nikolakis et al. 2018, S.10). Ein Auftrag beschreibt dabei die Menge aller Einzelprozesse, um das Produkt in der gewünschten Stückzahl zu produzieren. Ein Montageprozess wiederum fokussiert einen konkreten Montageumfang, der sich in einzelne Montageschritte unterteilen lässt. Der Montageschritt besteht aus mehreren Operationen, die die funktionalen Anforderungen und somit die erforderlichen Fähigkeiten zur Verrichtung der Montageaufgabe abbilden.

Das Vorgehen der HTA wird in der arbeitswissenschaftlichen Methode des »Methods-Time Measurement« (MTM) verwendet, um im industriellen Umfeld manuelle Arbeitsabläufe in der Montage zu planen (Bokranz & Landau 2012). Hierbei werden sämtliche Tätigkeiten der manuellen Montage auf Grundoperationen heruntergebrochen und in ihren Zeitaufwänden abgeschätzt. Reichenbach zeigt, dass zu jeder Grundfunktion der VDI 2860 und DIN 8593 ein Pendant der arbeitswissenschaftlichen MTM-Operationen existiert. Dies schränkt die minimal

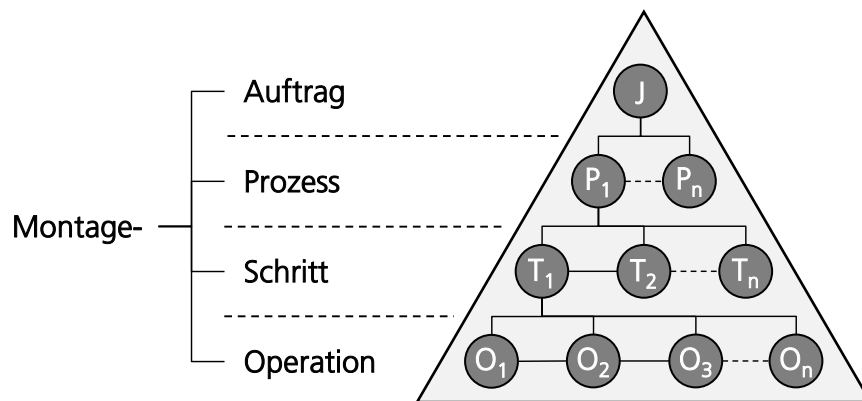


Abbildung 2.12: Hierarchie von Montageaufgaben und deren Zerlegung von Aufträgen zu Operationen, eigene Darstellung i.A.a. Nikolakis et al. (2018, S.10)

benötigte Zahl an MTM-Elementarfunktionen der Montage auf dreizehn ein (Reichenbach 2010, S.57). Anhand der Elementarfunktionen können Basisoperationen abgeleitet werden, die durch technische Parameter eindeutig zu definieren sind und mit den Funktionalitäten der Ressourcen abgeglichen werden können. In Analogie zur Modellierung der MTM kann auf Seiten der Handhabung durch einen Roboter die Prozesszeit durch die Methode der »Robot Time and Motion« (RTM) abgeschätzt werden.

Jeder Montageprozess hat darüber hinaus Verbindungen (Abhängigkeiten) zu vor- und nachgelagerten Prozessen, die für die zeitliche Abfolge der Verrichtung der Montageprozesse wichtig sind. Diese Beziehungen werden üblicherweise in einem Montagevorranggraphen dargestellt (Konold & Reger 2009, S.118f; Küber 2017, S.175). Der Montagevorranggraph dient dazu, die Montage in Teilmontagen zu unterteilen und eine Gliederung der Montageprinzipien zu erhalten. Restriktionen der Reihenfolgenplanung ergeben sich aus der Funktionsfolge der Montage (Hartel & Lotter 2012, S.370) sowie den Zusammenhängen der Produktstruktur.

2.5.3 Dateninteroperabilität

Das Kapitel behandelt Datenaustauschformate der Planung automatischer Montagesysteme und der standardisierten Kommunikation zwischen Maschinen und Services (M2M-Kommunikation). Die verwendete Klassifizierung orientiert sich am Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0), das in Abbildung 2.13 dargestellt ist (Plattform Industrie 4.0

2018).

Das RAMI4.0-Modell ermöglicht Technologien entlang der drei Achsen der Hierarchiestufen einer vernetzten Fabrik (vgl. Automatisierungspyramide), dem Lebenszyklus von Produkten und Anlagen (vgl. PLM) sowie der IT-Repräsentanz einer Industrie 4.0-Komponente (Grundfragen zur Geschäftsidee, Vereinbarungen zur Kommunikation, vgl. OSI-Modell der Kommunikation) zu verorten (Schewe 2016; Plattform Industrie 4.0 2018).

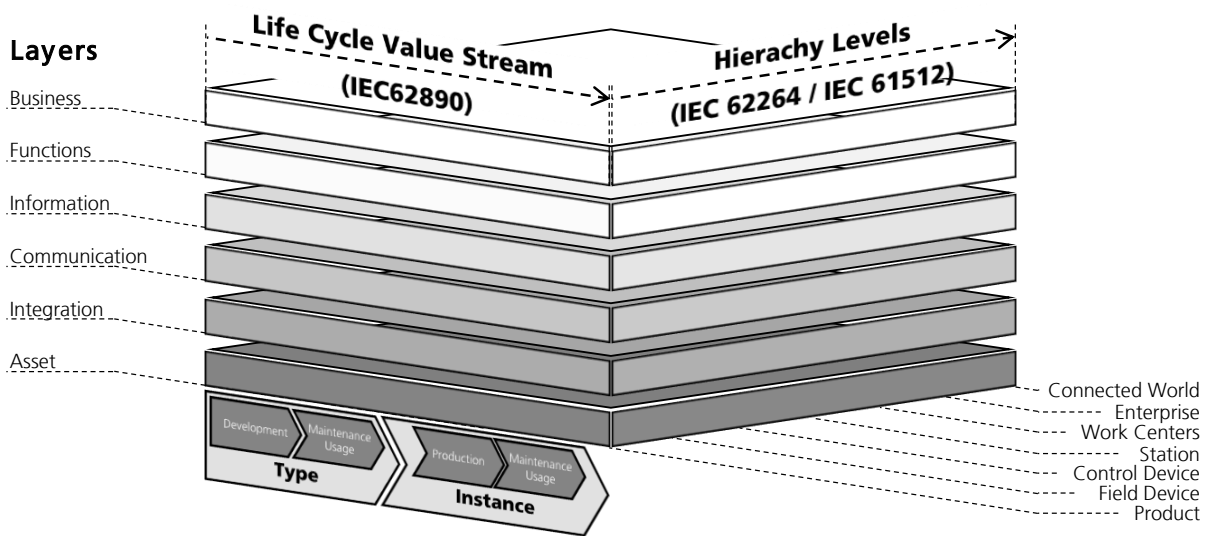


Abbildung 2.13: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0, eigene Darstellung i.A.a. Plattform Industrie 4.0 (2018)

In der nachfolgenden Betrachtung soll zwischen reinen Datenaustauschformaten der Anlagenplanung (bspw. AutomationML), Informationsmodellen (bspw. ECLASS, OPC-UA-CS), Middleware-Implementierungen (bspw. BaSys) und Standards für den Datenaustausch mit Informationsmodellierung (bspw. OPC-UA) unterschieden werden.

AutomationML (AML)

AML repräsentiert ein Datenaustauschformat, das für den Entwurfsprozess von Produktionssystemen definiert wurde und als ein Beispiel einer integrativen IT-Landschaft der Planung verstanden werden kann. Das Format hat zum Ziel, die Weitergabe der Planungsergebnisse für jede beliebige Paarung von Werkzeugen der Entwurfskette zu ermöglichen (Lüder et al. 2014, S.6) und unterstützt die objektorientierte Modellierung von Anlagenkomponenten

(Schäffer et al. 2019, S.63). Nach Bugge (2021) kann AML dem »Information-Layer« im Produktlebenszyklus einer Instanz für die unteren Ebenen der Hierarchie der vernetzten Fabrik zugeordnet werden.

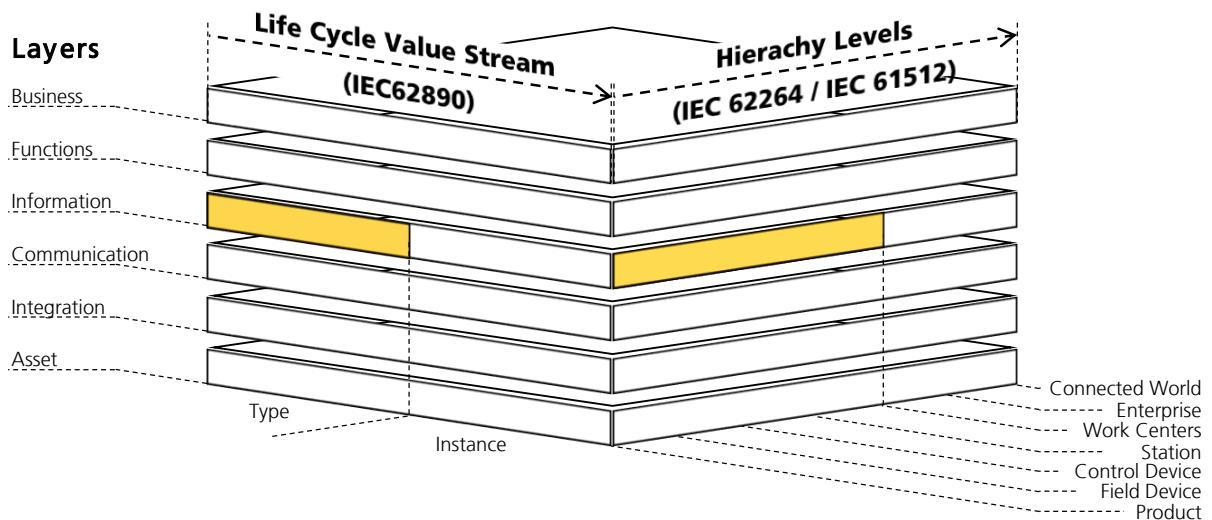


Abbildung 2.14: Einordnung des AML-Datenaustauschformats im RAMI4.0, eigene Darstellung i.A.a. ZVEI (2018, S.25f) und Bugge (2021)

Die *Instanzhierarchie* nach Abbildung 2.15 repräsentiert die Struktur und Topologie der Anlage (Lüder et al. 2014, S.6f). Diese unterstützt bspw. die Gliederung entsprechend der unterschiedlichen PPR-Domänen des Montagesystementwurfs. *Systemklassen* beschreiben (herstellerspezifische) Komponenten (Lüder et al. 2014, S.7) und ermöglichen den semantisch eindeutigen Austausch zwischen unterschiedlichen Werkzeugen der Entwurfskette (Hundt & Prinz 2014, S.12f).

Die *Rollenbibliothek* definiert eine eindeutige Semantik für Anlagenkomponenten und deren Beschreibungsmittel. Hierdurch kann unabhängig von der Benennung, eine eindeutige Zuordnung der Komponenten im Rahmen des Entwurfs erfolgen. Die *Schnittstellenbibliothek* erlaubt die Modellierung und Wiederverwendung von Zusammenhängen inner- und außerhalb der unterschiedlichen Domänen des Montagesystementwurfs. Weiterhin wird durch die Verwendung von Schnittstellen eine Verknüpfung zu extern abgespeicherten Informationen ermöglicht (Drath 2010; Lüder et al. 2014; Schäffer et al. 2019).

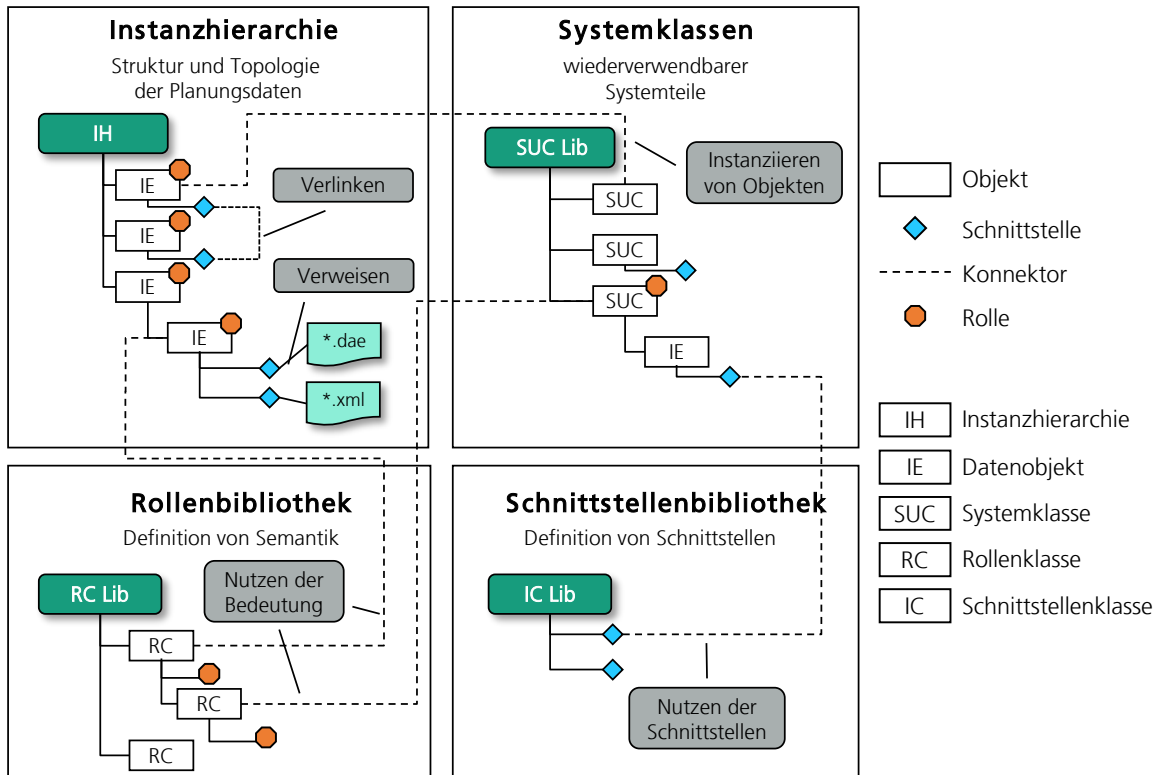


Abbildung 2.15: Zusammenhänge und Abhängigkeiten im AutomationML Datenaustauschformat, eigene Darstellung i.A.a. Drath (2010) und Lüder & Schmidt (2017)

ECLASS

ECLASS definiert einen branchenübergreifenden Standard für die eindeutige Beschreibung von Produkten und Dienstleistungen. Produktstammdaten können mittels ECLASS über Unternehmensgrenzen hinweg individuellen Branchenstandards zugeordnet und digital ausgetauscht werden. Die Stärken der ECLASS-Standardisierung liegen im Prozessdatenmanagement, insbesondere im Kontext eines übergreifendes Wörterbuchs (Dictionary) für Begriffe und Bedeutungen der Komponenten und Beziehungen (ECLASS e.V. 2021).

Eine Verortung des ECLASS-Standards im RAMI4.0 kann Abbildung 2.16 entnommen werden. ECLASS adressiert die unteren Layer der Hierarchie der vernetzten Fabrik in der Beschreibung von Produkt- und Ressourceninstanzen.

Hinsichtlich der Hierarchieebenen gilt es zu unterscheiden, ob der Namensraum nur für die unternehmensexterne (dunkel) oder auch für die unternehmensinterne (hell) Interoperabilität genutzt werden soll. Beide Varianten sind möglich und in Abbildung 2.16 in unterschiedlichen Farbstufen grafisch dargestellt.

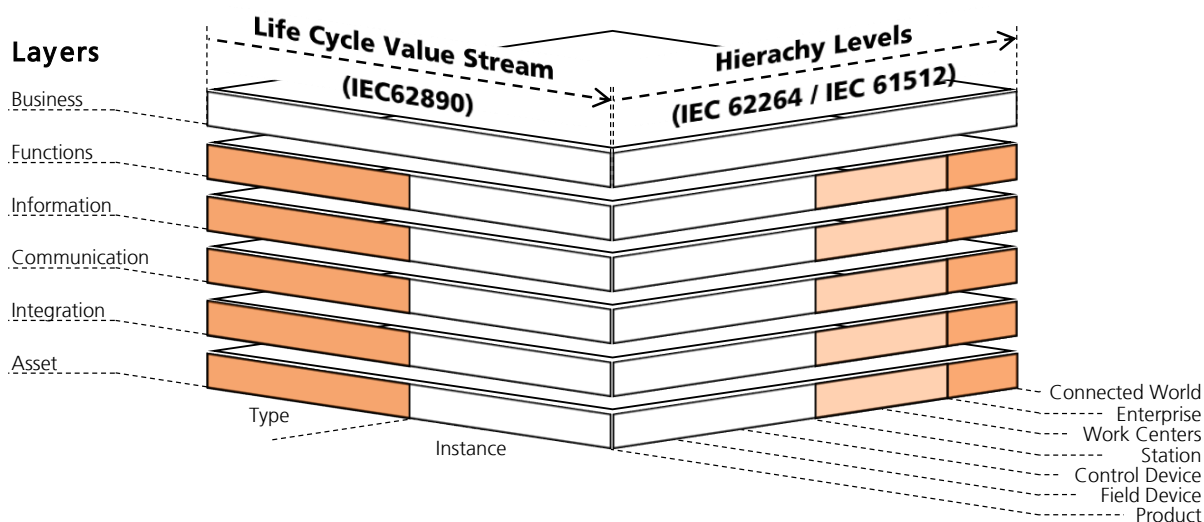


Abbildung 2.16: Einordnung des ECLASS-Standards im RAMI4.0, eigene Darstellung i.A.a. Bugge (2021)

OPC-UA

Das OPC-UA Protokoll ist ein Interoperabilitätsstandard für den plattform-, sprach- und herstellerunabhängigen Informationsaustausch (Hoppe 2017, S.371) in einer service-orientierten Architektur (SOA). Die Verortung im -Modell ist in Abbildung 2.17 dargestellt. OPC-UA gewährleistet die offene Konnektivität, Interoperabilität, Sicherheit und Zuverlässigkeit industrieller Automatisierungssysteme (Microsoft 2017) auf den Ebenen *Information* und *Communication* des RAMI4.0-Referenzmodells vom Sensor auf Feldebene bis zur Fabrikebene (Hoppe 2017; Bugge 2021). Mittels standardisierter Integration von Daten inkl. deren Struktur und Bedeutung eignet sich OPC-UA besonders für die Kommunikation und den Datenaustausch im Umfeld der Industrieautomation mit Schwerpunkt auf Anwendungen zwischen Maschinen und dem Transport von M2M-Daten (Hoppe 2017, S.375)

BaSys

Die BaSys-Projektfamilie adressiert eine Referenzarchitektur für Produktionssysteme. Die Flexibilität, Interoperabilität und Abstraktion der Produktion soll anhand einer dienstbasier-

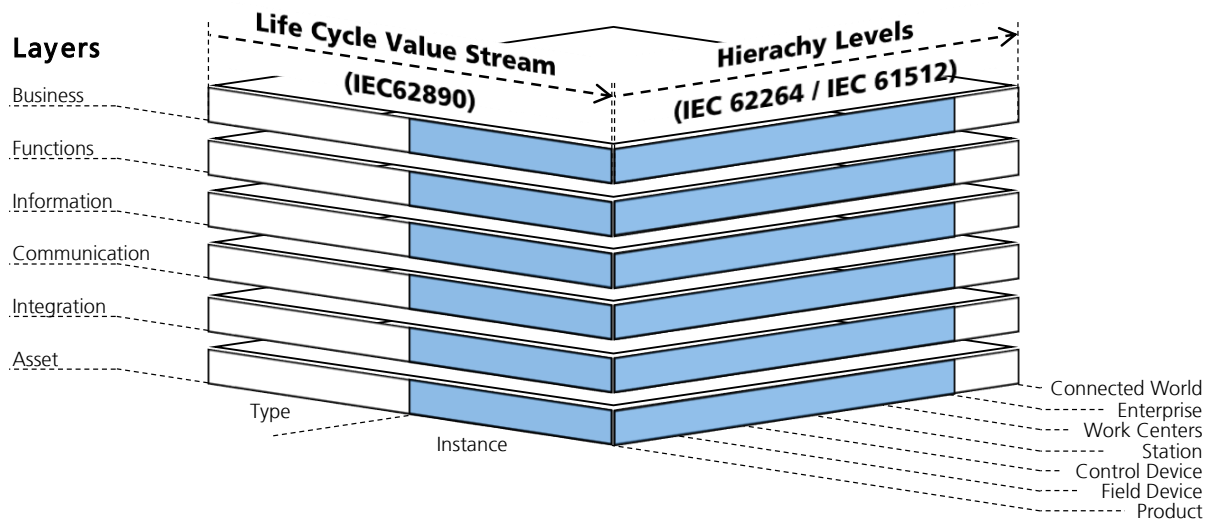


Abbildung 2.18: Einordnung der BaSys-Projektfamilie im RAMI4.0, eigene Darstellung i.A.a. Bugge (2021)

tionssystem, einen Mitarbeiter oder ein Produkt repräsentiert werden.

Die Verwaltungsschale beinhaltet oder verweist auf alle Informationen dieses Assets. Sie repräsentiert eine Abstraktionsschicht, mit der der Zugriff auf die Informationen eines Assets vereinheitlicht wird. Mit diesem Ansatz wird die Wiederverwendbarkeit der Assets und Softwaredienste erhöht, was die Rekonfiguration und Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen erhöht. Die Kombination eines Assets mit seiner Verwaltungsschale wird Industrie 4.0-Komponente genannt. (Kuhn et al. 2019)

3 Stand der Technik

Das Kapitel 3 behandelt relevante Forschungsthemen im Fokus der Planung hybrider Montagesysteme. Schwerpunkte liegen dabei auf der Identifikation spezifischer Forschungsarbeiten im Kontext der Ressourcenallokation, der Automatisierungseignung und der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit automatischer Montagesysteme sowie der Beschreibung des Optimierungsproblems.

3.1 Forschungsspezifische Planung von MRK-Montagesystemen

Im Fokus der Arbeit steht die optimierte Planung hybrider Montagesysteme unter Ausnutzung der individuellen Stärken von Mensch und Roboter. Nachfolgend soll auf zwei Spezifika einer hybriden Montagesystemgestaltung eingegangen werden, die entscheidend für den Planungserfolg sind. Einerseits die Bewertung der Eignung eines Prozessschritts für eine potentielle Automatisierung und andererseits die Zuweisung einer technologisch passenden Ressource (Ressourcenallokation).

3.1.1 Verfahren zur Identifikation der Automatisierungseignung

Zu Beginn der Ressourcenallokation ist es wichtig zu wissen, ob und wenn ja wie gut sich ein Montageschritt mit seinen individuellen Produkt- und Prozessparametern unter den gegebenen Randbedingungen für eine Automatisierung eignet. Zu diesem Zweck werden die Produkt- und Bauteildaten untersucht, die sich aus Zeichnung und Stückliste ableiten lassen. Ebenso können auch die vorhandenen Metadaten über bspw. die Materialbereitstellung oder die räumliche Situation des Montagearbeitsplatzes in Betracht gezogen werden. Es existieren unterschiedliche Ansätze, die Automatisierungseignung eines Prozesses quantitativ zu bewerten. Allen Methoden gemein ist das Verständnis, dass die physischen wie auch informationsverarbeitenden Anforderungen des jeweiligen Prozessschrittes im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen, siehe Abbildung 2.5.

Eine Einschätzung über die generelle Eignung einer Handhabungs- oder Fügeoperation zur Automatisierung kann bei Eversheim (1989, S.219f) und Hesse (2012a, S.195) nachgeschlagen werden. Spezifischere Methoden zur Bestimmung der Automatisierungseignung berücksichtigen zusätzlich die Randbedingungen des Produktionsauftrags. Nach Spingler & Beumelburg (2002) und Beumelburg (2005) kann anhand der Beantwortung eines Fragenkatalogs eine dimensionslose Kennzahl abgeleitet werden, die den Grad der Automatisierungseignung bestimmt. Diese Kennzahl gibt Auskunft darüber, ob eine manuelle oder automatische Verrichtung des untersuchenden Montageschritts zu bevorzugen ist.

Frohm (2008) verwendet für die Ermittlung der Automatisierungseignung eine Entscheidungsmatrix entsprechend den Vorarbeiten von Price (1985, S.37). Diese trägt die Eignung eines Prozesses für Mensch und Maschine auf und definiert sechs Kennfelder im Spannungsfeld zwischen einer rein manuellen und rein automatischen Verrichtung.

Hengstebeck et al. (2016) untersuchen den Bedarf einer semantischen Erweiterung der Beschreibung manueller Arbeitsschritte anhand des MTM-Formats, um daraus die relevanten Produkt-, Prozess- und Arbeitsplatzparameter einer automatisierten Lösung abzuleiten. Schröter (2018) führt im Kontext der Automatisierungseignung eine um MRK-Features erweiterte MTM-Prozessbeschreibung für kollaborierende Montageaufgaben ein. Durch Vereinheitlichung soll eine allgemeingültige Nomenklatur für Roboter- und manuelle MTM-Bewegungen entwickelt werden, die ebenso eine Bewertung und Eignung der Prozessschritte je untersuchtem Montageschritt ermöglicht.

3.1.2 Verfahren der Ressourcenallokation

Die Verfahren der Ressourcenallokation beschäftigen sich mit der Zuordnung technologisch geeigneter Ressourcen entsprechend den Anforderungen aus Produktarchitektur, Fügeverfahren und Randbedingungen der Produktionsaufgabe. Nach Fasth et al. (2012) ist die Ressourcenallokation besonders dann interessant, wenn Mensch und Roboter, wie im Fall der MRK, beide in der Lage sind die Aufgabe zu verrichten.

Das Vorgehen der Ressourcenallokation kann als Lösungsfindungsprozess der Suche, Bewertung und Optimierung möglicher Ressourcenalternativen betrachtet werden (Lohse et al. 2005). Der Fokus der Arbeiten zur Ressourcenallokation liegt auf der Implementierung von

Informationsmodellen und Regeln, die den Planer bei der Suche, quantitativen Bewertung und Auswahl geeigneter Ressourcen unterstützen.

Fähigkeitsoptimierende Verfahren

Im Kontext der fähigkeitsoptimierenden Verfahren fokussiert die Arbeit von Lohse et al. (2005) die produktgetriebene Neuplanung von Montagesystemen. Die Arbeiten von Stanev (2012), Landherr (2014) und Ferrer et al. (2015) adressieren den Anwendungsfall der fähigkeitsbasierten Rekonfiguration bereits bestehender Anlagen in einem systemgetriebenen Entwurfs- und Planungsprozess.

Im Schwerpunkt der Planung hybrider MRK-Systeme entwickelt Beumelburg (2005) ein Systemmodell für die Montageablaufplanung. Darin können Montageumfänge entsprechend den individuellen Fähigkeiten auf die beiden Ressourcen Mensch und Roboter verteilt und hinsichtlich Arbeitsteilung und Durchlaufzeit optimiert werden.

Bei Müller et al. (2016) erfolgt die individuelle Zuordnung der Montageschritte anhand der Eigenschaften der Baugruppe sowie den Fähigkeiten von Mensch und Roboter. Neben den technischen Fähigkeiten der Ressourcen sind Aspekte der Ergonomie, Akzeptanz und Kosten entscheidend für den Erfolg einer Systemlösung.

Ranz et al. (2017) beschreiben in diesem Kontext ein zweistufiges Verfahren der fähigkeitsbasierten Allokation. In einem ersten Schritt erfolgt eine Einteilung der Prozesse in solche, die eindeutig nicht automatisierbar sind und solche, die automatisiert werden müssen. Alle verbleibenden Prozessschritte, für die beide Varianten möglich sind, werden in den Kriterien Kosten, Zeit und Qualität bewertet, miteinander verglichen und anschließend zugeteilt.

Reichenbach (2010) verfolgt in seiner Arbeit den Ansatz eines zentralen Wissensspeichers aus Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten mit dem Ziel, den kompletten technischen Lösungsraum quantitativ bewerten zu können. Das Vorgehen zielt darauf ab, das Potential und Risiko der gewählten Systemlösung abzuschätzen. Die Anwendung adressiert dabei explizit den Vergleich der Fähigkeiten eines Leichtbauroboters mit den Fähigkeiten eines Menschen in der Montage.

Fechter et al. (2018) untersuchen in ihrem Ansatz die fähigkeitsbasierte Allokation geeigneter Ressourcen im hybriden Systementwurf anhand eines automatischen Abgleichs der

technischen Anforderungen aus Produkt und Prozess unter den gegebenen Randbedingungen der Montageaufgabe. Der Ansatz verfolgt das Ziel einer multikriteriellen Optimierung des Gesamtsystems. Durch eine automatische Morphologie technischer Ressourcen je Montageschritt können in kurzer Zeit mehrere alternative Systemlösungen generiert und quantitativ miteinander verglichen werden.

Kostenoptimierende Verfahren

Ausgehend von einer Zuordnungsmatrix kalkulieren Takata & Hirano (2011) verschiedene Wandlungsszenarien bzgl. zu produzierender Produktmodule und prognostizierter Absatzzahlen. Die kleinste Summe über die Investitionskosten der Automatisierung und die variablen Arbeitskosten der Werker, multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit des entsprechenden Szenarios, ergibt den optimierten Systementwurf.

Chen et al. (2011) untersuchen unterschiedliche Szenarien der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter in einem diskreten Zustandsmodell mittels stochastischer Petri-Netze. Die Transitionen zwischen den einzelnen Montageprozessen sind in diesem Anwendungsfall mit Wahrscheinlichkeiten belegt. Dies führt dazu, dass menschliche Fehler oder Maschinenstillstände im Montageablauf zu Varianzen der Prozesszeit eines Montageschritts führen, die sich auf die Taktzeiten und Kosten des Systementwurfs auswirken. Es gilt, einen Kompromiss zwischen der Taktzeit und den Lohnkosten, anhand der Freiheitsgrade Ressourcenallokation und Reihenfolgenplanung der Montageschritte, in einem hybriden Montagesystemen zu erreichen. (Chen et al. 2012; Chen et al. 2014)

Weckenborg & Spengler (2019) untersuchen die modellgestützte Entscheidung bei der Ressourcenallokation und Abtaktung einer hybriden Montage aus mehreren Arbeitsstationen. Unter Berücksichtigung der individuellen Kosten der Ressource Mensch und Roboter sowie einer optimierten Reihenfolge der Montageschritte kann eine Kostenersparnis im Fall der hybriden Montage erzielt werden.

Zeitoptimierende Verfahren

Neben der Allokation von Ressourcen zu Montageschritten aufgrund vorab bekannter, statischer Annahmen, existiert weitere Forschung im Themenfeld der dynamischen Allokation

der Arbeitsinhalte zur Laufzeit der Montage. Die dynamische Allokation hat den Vorteil, dass dem Aspekt der Unplanbarkeit menschlicher Handlungen Rechnung getragen wird und eine belastbare Abschätzung der manuellen Prozesszeiten zur Laufzeit der Montage erfolgt. Die dynamische Methode wird aus diesem Grund zu tendenziell besseren, realitätsnäheren Planungsergebnissen führen. (Ding et al. 2014)

Ausgehend von den Beobachtungen manueller Prozessabläufe können die individuelle Eignung der Ressourcen und zugehörige Zeitwerte je Prozessschritt ermittelt werden. Diese Zeiten können in die Planung zurückgespielt und der Montageablauf zur Laufzeit optimiert werden (Gerkey & Mataric 2002; Malvankar-Mehta & Mehta 2015; Nikolakis et al. 2018). Nikolakis et al. (2018) beschreiben einen zweistufigen Ansatz, der eine zeitoptimale Ressourcenallokation unter Berücksichtigung der technischen Fähigkeiten der Ressourcen ermöglicht. Das Modell erlaubt eine dynamische Re-Allokation und Re-Organisation der Montageschritte zur Laufzeit der Montageaufgabe aufgrund unvorhergesehener Ereignisse oder Abweichungen in den Annahmen. Dabei werden entweder die verbleibenden Tätigkeiten eines bereits begonnenen Montageschritts oder der komplette Montageschritt zur Laufzeit neu allokiert.

Tabelle 3.1 vergleicht die beschriebenen Verfahren entsprechend den folgenden Kriterien:

- **Bewertung monetärer Kosten:** Die Ressourcenallokation soll monetäre Kosten als Kriterium berücksichtigen.
- **Fähigkeiten der Ressourcen:** Die Zuordnung einer optimierten Ressource kann nur unter Berücksichtigung von Alternativen getroffen werden. Dabei ist neben der grundsätzlichen Unterscheidung zwischen Mensch und Roboter, eine detaillierte Betrachtung der Fähigkeiten der individuellen Ressourcen anzustreben.
- **Faktor Mensch:** Eine Ressourcenallokation in einem hybriden Montageszenario ist nur dann erfolgreich, wenn der Mensch inkl. seiner Eigenschaften und Präferenzen bei der Planung berücksichtigt wird.
- **Laufzeitverhalten der Optimierung:** Das Kriterium bewertet, inwieweit mögliche Fehlerzustände und unvorhergesehene Ereignisse zur Laufzeit der Montage in der Arbeitsplanung oder Ressourcenallokation berücksichtigt werden können.

- **Aufwand der Optimierung:** Das Kriterium bewertet den Aufwand und explizit auch die Dauer des Optimierungsverfahrens.

Tabelle 3.1: Bewertung und Gegenüberstellung der Verfahren der Ressourcenallokation

	Monetäre Kosten	Fähigkeiten der Ressourcen	Faktor Mensch	Laufzeitverhalten der Optimierung	Aufwand der Optimierung
Kostenoptimierende Verfahren					
Takata & Hirano 2011	●	○	○	○	○
Zeitoptimierende Verfahren					
Ding et al. (2014)	○	○	◐	●	◐
Weckenborg & Spengler (2019)	●	◐	◐	○	●
Zeit- und kostenoptimierende Verfahren					
Chen et al. (2011)	◐	○	◐	◐	◐
Chen et al. (2014)	●	○	◐	◐	●
Zeit- und fähigkeitsoptimierende Verfahren					
Beumelburg (2005)	◐	◐	○	○	◐
Reichenbach (2010)	○	●	◐	○	◐
Müller et al. (2016)	●	●	◐	○	◐
Ranz et al. (2017)	●	●	◐	○	○
Fechter et al. (2018)	◐	●	◐	○	●
Nikolakis et al. (2018)	○	◐	◐	●	●

Legende: ●: voll erfüllt, ◐: teilweise erfüllt, ○: nicht erfüllt

3.2 Kosten- und Investitionsrechnung

Im Zuge der Wirtschaftlichkeitsbewertung alternativer Montagearbeitsplätze existieren statische und dynamische Verfahren der Investitionskostenrechnung (Horváth 2003, S.521; Westkämper & Decker 2006, S.105). Zum frühen Zeitpunkt der Grobplanung alternativer Montagearbeitsplätze unter Berücksichtigung ungewisser Prognosen sind insbesondere statische Verfahren zielführend.

3.2.1 Montage- und Stückkostenrechnung

Die Aufteilung der Kosten eines Unternehmens erfolgt über die Kostenarten-, Kostenstellen- und Kostenträgerrechnung (Westkämper & Decker 2006, S.79f; Fleschutz 2010, S.35).

Die Kostenarten helfen dabei, nicht wertschöpfende und notwendige Kosten zu identifizieren. Einzelkosten können dabei einem Kostenträger bspw. einem verkaufsfähigen Produkt direkt zugeordnet werden. Gemeinkosten wiederum lassen sich nicht eindeutig zuordnen, da sie für mehrere Produkte und damit Kostenträger entstehen. Dies betrifft bspw. Verwaltungskosten oder Kosten des Werkschutzes (Westkämper & Decker 2006, S.80).

Die Investitionen in Ressourcen verursachen fixe Kosten, die wiederum Abschreibungen und kalkulatorische Zinsen beinhalten. Weiterhin sind feste Aufwendungen für bspw. die Instandhaltung und die Raummiete aufzubringen. Fixe Kosten fallen auch dann an, wenn nicht produziert wird.

Demgegenüber stehen die variablen Kosten, die proportional zur Produktionsdauer und damit der Nutzungszeit der Ressourcen anfallen (Eversheim 1989, S.263f; Westkämper & Decker 2006, S.80). Hierzu gehören bspw. die Lohnkosten, Energie- und Materialkosten sowie die anfallenden Verbrauchskosten.

Die Kostenstellenrechnung weist die anfallenden Kosten Organisationsbereichen zu. Sie wird zur Führung verwendet, da sie das Bindeglied zwischen der Erfassung der Kosten (Kostenartenrechnung) und der Steuerung und Kontrolle (Kostenträgerrechnung) darstellt. Die Kostenstellenrechnung beantwortet die Frage, wo die Kosten entstanden sind und wem sie zugeordnet werden müssen (Westkämper & Decker 2006, S.86).

In der Kostenträgerrechnung werden die Kosten einzelnen Produkten und Leistungen

zugerechnet. Dies können Aufträge, Chargen, Produkte oder Dienstleistungen sein. Sie hilft bei Kalkulation der Herstell- und Selbstkosten (Westkämper & Decker 2006, S.91; Fleschutz 2010, S.35).

Im Sonderfall rekonfigurierbarer Produktionssysteme (RMS) werden neben variablen und fixen Kosten, zusätzlich die Wandlungskosten betrachtet (Wiendahl et al. 2007; Stähr 2020, S.12). Diese beinhalten wiederum drei Kostenarten, die in Abbildung 3.1 dargestellt sind.

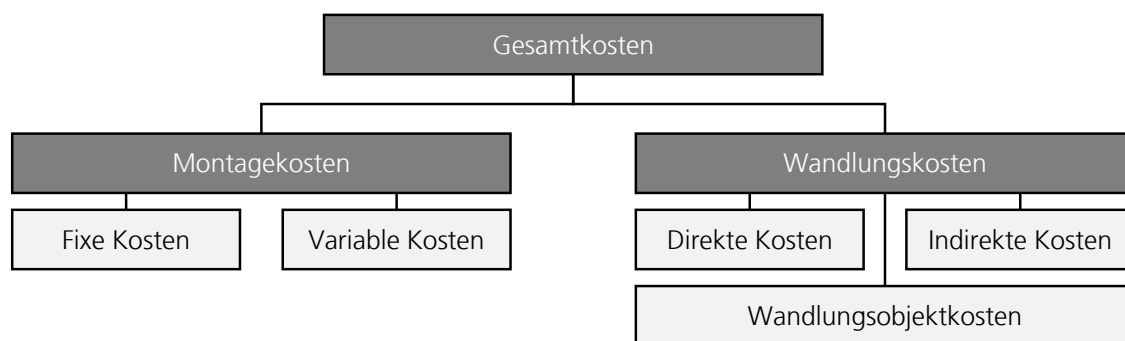


Abbildung 3.1: Kostenarten rekonfigurierbarer Montagesysteme (RMS) in der Unterteilung nach Montage- und Wandlungskosten

Die direkten Wandlungskosten, die durch die Implementierungs- und Inbetriebnahmeaufwände im Prozess der Wandlung sowie die indirekten Wandlungskosten, die durch den Stillstand der Ressource zum Zeitpunkt der Wandlung entstehen. Hierzu gehören fixe Anlagekosten aufgrund Stillstand wie auch Opportunitätskosten aus verpassten Verkäufen. Als dritten Aspekt der Wandlungskosten betrachtet Stähr (2020, S.12) die Wandlungsobjektkosten. Diese sind unmittelbar mit der Anschaffung und Entsorgung des zu wandelnden Objekts verknüpft, bspw. der einmalige Auf- und Abbau von Peripherie für die Montage oder die Transaktionskosten beim Erwerb und Verkauf der Ressourcen.

Ein qualitativer Kostenvergleich der Stückkosten über die Produktionsmenge ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Darstellung beschreibt den Verlauf der Montagestückkosten über das Produktionsvolumen anhand der Beispiele eines manuellen Produktionssystems, eines hybriden MRK-Systems, einer Roboter-Automatisierung sowie eines Automaten (Sondermaschine) (Lotter 2012e, S.192; Matthias & Ding 2013).

Die eingezeichneten Pfeile illustrieren die Vorteile eines hybriden MRK-Systems hinsichtlich der Rationalisierung manueller Arbeit (variable Kosten senken) bei geringen Stückzahlen

und der Flexibilisierung der Automatisierung (fixe Kosten senken) bei mittleren Stückzahlen (vgl. Abbildung 1.6).

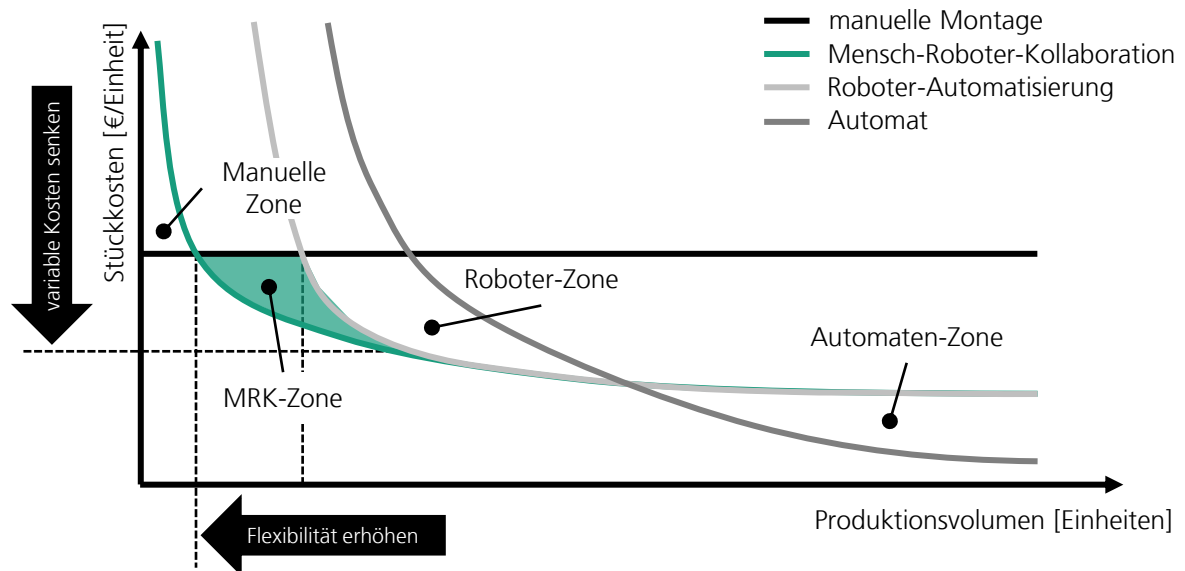


Abbildung 3.2: Qualitativer Vergleich der Montagestückkosten für unterschiedliche Automatisierungsgrade über das Produktionsvolumen inkl. Darstellung des individuellen Idealpunkts, eigene Darstellung i.A.a. Lotter (2012e, S.192) und Matthias & Ding (2013)

Nach Lotter & Wiendahl (2009, S.140) und Dietz (2019, S.71) können die folgenden qualitativen Aussagen hinsichtlich der Kosten unterschiedlicher Montagesysteme getroffen werden:

- **Manuelle Montagesysteme** werden maßgeblich durch die variablen Kosten menschlicher Arbeit bestimmt, die anteilig zur produzierten Stückzahl anfallen.
- Im Fall **automatischer Montagesysteme** werden die Montagestückkosten überwiegend durch die Fixkosten aus Abschreibungen und kalkulatorischen Zinsen bestimmt.
- Die Stückkosten der **hybriden Montage** sind im Vergleich zur Automatisierung über einen breiten Bereich wettbewerbsfähig.
 - Im Fall hybrider Montagesysteme werden die Kosten weitestgehend durch die variablen Kosten der manuellen Arbeitsinhalte bestimmt. Fixkosten fallen anteilig der automatisierten Inhalte an.

- Die Implementierung hybrider Montagesysteme erfordert einen vergleichsweise geringen Investitionsaufwand. Kombiniert mit der Möglichkeit, das System schrittweise zu erweitern, verringert sich das Investitionsrisiko.
- Der geringere Spezialisierungsgrad der Automatisierungskomponenten in hybriden Systemen erhöht die Wahrscheinlichkeit der Wiederverwendung der Komponenten nach Ende des Produktionsszenarios.
- Die Wandlungsfähigkeit, in Bezug auf die Ausbringung hybrider Systeme, kann durch die Anpassung des Automatisierungsgrades und/oder das Hinzufügen oder Entfernen automatischer Prozessmodule erfolgen.

3.2.2 Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung

Die Irreversibilität von Investitionsentscheidungen während der technischen Entscheidungsfindung steht bei vielen Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit im Mittelpunkt (Chittenden & Derregia 2015). Die Finanzierung beschreibt die Beschaffung bzw. Bereitstellung der finanziellen Mittel, während die Investition die Überführung der Mittel in Sach- oder Finanzvermögen darstellt. Wenn es um den Vergleich alternativer Systemlösungen geht, spricht man von einer relativen Wirtschaftlichkeit (Westkämper & Decker 2006, S.102f).

Die Investitionsbereitschaft der am Entscheidungsprozess beteiligten Personen nimmt aufgrund der mangelnden Vorhersehbarkeit einer potentiell höheren Anfangsinvestition im Fall automatischer Montagesysteme ab (Großmann et al. 2013, S.226), weshalb bei unsicheren Prognosen verstärkt in manuelle Montagesysteme mit inhärent hoher Anpassungsfähigkeit und geringeren Fixkosten investiert wird (Witte et al. 2013, S.319).

In den meisten Fällen geht die Wirtschaftlichkeitsrechnung von Montagesystemen davon aus, dass die Ressourcen nicht wieder- oder weiterverwendet werden können und Betriebsmittel einem Produkt für eine definierte Systemlebenszeit zugeordnet werden. Die Entscheidung für eine Investition in Produktionsressourcen erfolgt aus diesem Grund immer *ex ante* (Westkämper & Decker 2006, S.105) und unter Unsicherheit (Heger 2007, S.39f). Die Entscheidung für ein Montagesystem inkl. zugehörigem Automatisierungsgrad sowie die Festlegung der eingesetzten Ressourcen überschreitet darüber hinaus in vielen Fällen den Produktionszeitraum, der zum Zeitpunkt der Investitionsentscheidung absehbar ist.

Nach Großmann et al. (2013, S.226, 230) ergibt sich damit eine hohe Investitionsunsicherheit für automatisierte Anlagen. Müller et al. (2013a, S.252) weisen in diesem Kontext darauf hin, dass Ressourcen der Automatisierung aufgrund ihres höheren Investitionsbetrages langfristig nutzbar sein sollten. Dies ist aber aufgrund der hohen Spezialisierung automatischer Ressourcen nur selten der Fall.

Der niedrigere Spezialisierungsgrad der automatisierten Ressourcen in hybriden Montagesystemen erhöht das Potential einer Wiederverwendung (Lotter & Wiendahl 2009, S.141). Bei Montagesystemen mit einem hohen Anteil wiederverwendeter Ressourcen impliziert dies geringere Fixkosten (Witte et al. 2013, S.323f). In diesem Zusammenhang empfiehlt sich eine lebenszyklusbezogene Berechnung der Wirtschaftlichkeitskennzahlen, die sich aus Neu-, Rekonfigurations- und Erweiterungsinvestitionen in Ressourcen zusammensetzen und eine Risikoabschätzung der Planung erlauben (Witte et al. 2013). Großmann et al. (2013, S.231) bestätigen diese Aussage anhand der TCO-Rechnung (Total Cost of Ownership) eines rekonfigurierbaren Montagesystems. Sie verweisen jedoch explizit auf die exakte Terminierung der Investition und Rekonfiguration, da diese sonst einen negativen Effekt auf die Wirtschaftlichkeit, durch u.U. höhere Personalkosten, haben könnten.

Die Berechnung eines wandlungsspezifischen Kapitalwerts bei Rekonfiguration (Heger 2007, S.110f) und die Berücksichtigung potentieller Transaktionskosten (Wiendahl et al. 2007; Stähr 2020) ermöglichen eine Betrachtung des Zeitwerts und Anpassungsaufwands einer Ressource, implizieren aber weiterhin Unsicherheiten hinsichtlich des Zeitpunkts der Wandlung und die bereits erwähnte Problematik der exakten Terminierung (Großmann et al. 2013, S.231).

Die statischen Investitionsrechnungen rechnen mit Durchschnittswerten bezogen auf eine Periode und berücksichtigen keine zeitlichen Unterschiede beim Anfall der Kosten, Erträge und des Kapitaleinsatzes (Horváth 2003, S.521). Sie betrachten nur einen Zeitabschnitt und sind daher einfach anzuwenden und weit verbreitet (Westkämper & Decker 2006, S.106; Heger 2007, S.41). Zu den Kennzahlen einer »statischen Investitionsentscheidung« gehören:

- Die **Kostenvergleichsrechnung** addiert alle Kosten, die während der Nutzungsdauer entstehen. Werden Systemalternativen mit identischer Mengenleistung verglichen, betrachtet man die Kosten der Periode (Losgröße), während man im Fall unterschiedlicher Produktionsleistungen die Kosten je Leistungseinheit (Stückkosten) vergleicht. Die

Kosten setzen sich aus den Kapital-, Betriebs- und Instandhaltungskosten zusammen. (Westkämper & Decker 2006, S.106f)

- Die **Gewinnvergleichsrechnung** vergleicht den jährlichen Gewinn mehrerer Lösungsalternativen je Periode oder Produkt. Die Kosten werden analog der Kostenvergleichsrechnung ermittelt, während sich die Erlöse aus den (geschätzten) Verkaufspreisen und den (geschätzten) Produktionsmengen ergeben. (Westkämper & Decker 2006, S.107f)
- Die **Rentabilitätsrechnung**, auch ROI (Return on Investment) genannt, hat zum Ziel die Rentabilität und somit die Verzinsung einer Investition zu bewerten. Sie setzt den durchschnittlichen Gewinn unter Berücksichtigung der kalkulatorischen Zinsen in Relation zum dafür durchschnittlich eingesetzten Kapital. (Westkämper & Decker 2006, S.109f)
- Die **statische Amortisationsrechnung** hat das Ziel die Zeitdauer zu ermitteln, bis wann das eingesetzte Kapital wiedergewonnen ist. Dabei wird das Verhältnis aus Kapitaleinsatz (Investition) und dem jährlichen Rückfluss (Gewinn + kalkulatorische Abschreibung + kalkulatorische Zinsen + Liquidationserlös) gerechnet (Westkämper & Decker 2006, S.112f). Die Amortisationsrechnung kann als Grad des Risikos einer Investition betrachtet werden, da sie die Dauer der Kapitalbindung berücksichtigt (Witte et al. 2013, S.323). Wirtschaftlich sinnvolle Investitionen sollten eine kürzere Amortisations- als Nutzungszeit aufweisen.

Die dynamischen Bewertungsverfahren berücksichtigen die zeitlichen Unterschiede im Anfall der Kosten und Erträge (Hartel & Lotter 2012, S.384) durch Verwendung von Zahlungsreihen und Diskontierung (Horváth 2003, S.521). Zu den Kennzahlen einer »dynamischen Investitionsentscheidung« gehören:

- Die **Kapitalwertmethode** (NPV, Net Present Value) setzt die laufenden Erlöse in Bezug zu den Investitionen und berücksichtigt damit den Zeitwert des eingesetzten Kapitals. Sie repräsentiert den abgezinnten Gegenstandswert der Überschüsse (Erträge, Einsparungen) nach der vorgesehenen Nutzungsdauer (Hartel & Lotter 2012, S.386) und somit "[...] die Summe aller auf einen Zeitpunkt ab- und aufgezinnten Ein- und

Auszahlungen, die durch die Realisation eines Investitionsobjekts verursacht werden.“ (Götze 2008, S.71). Ein Investitionsobjekt ist dann vorteilhaft, wenn sein Kapitalwert größer Null ist.

- Die **Annuitätenmethode** basiert auf der Kapitalwertmethode und errechnet einen Zielwert *“[...] gleich hoher Zahlungen, die in jeder Periode des Betrachtungszeitraums anfallen.“* (Götze 2008, S.93) Die Annuität berechnet sich durch Multiplikation des Kapitalwerts mit dem Annuitätenfaktor.
- Die **Interner-Zinssatz Methode** basiert auch auf der Kapitalwertmethode und berechnet *“[...] den Zinssatz, der als Kalkulationszinssatz verwendet, zu einem Kapitalwert von Null führt.“* (Götze 2008, S.96)
- Bei der **dynamischen Amortisationsrechnung** werden die Rückflüsse (Erträge) über die Nutzungsdauer der Ressourcen abgezinst. Beginnend mit der ersten Periode wird der kumulierte Barwert (Summe, der auf die Gegenwart abgezinsten Zahlungsströme mit dem Kalkulationszinssatz) der Nettozahlungen gebildet. Dieser entspricht dem Kapitalwert in Abhängigkeit der Nutzungszeit. (Götze 2008, S.108)
- Der **Lebenszykluskostenansatz** (LCC, Life Cycle Costing) betrachtet neben den anfallenden Investitionskosten, die Aspekte einer späteren Nutzung (Energiekosten, Reparatur, Wartung, Verwertung). Dabei werden alle Kosten aggregiert, die ein System während der Lebenszeit für den Betreiber verursacht (VDI 2884). Das Ziel ist die Optimierung der Gesamtkosten und -erlöse eines Systems und der damit verbundenen Aktivitäten und Prozesse (Fleschutz 2010, S.46).
Die **Gesamtbetriebskostenrechnung** (TCO, Total Cost of Ownership) wird in einem ähnlichen Zusammenhang verwendet, fokussiert aber noch stärker das Kostenmanagement aus Anwendersicht (Fleschutz 2010, S.45).

Allen statischen Berechnungsmethoden gemein ist die unzureichende Berücksichtigung einer potentiellen Rekonfiguration des Produktionssystems zum Betrieb. Bei den dynamischen Modellen liegt der Nachteil in der Prognose der laufenden Erlöse über die Produktions- und damit Betriebsdauer des Montagearbeitsplatzes.

Die statische Kostenvergleichsrechnung in Verbindung mit einem Leasingmodell an Betriebsmitteln, nach dem Ansatz von Fechter et al. (2019a), bietet einen betriebswirtschaftliche Ansatz zum Vergleich unterschiedlicher Ressourcenkonfigurationen in der Phase der Grobplanung des Montagearbeitsplatzes. Entscheidungen über die Rentabilität einer Systemlösung werden dabei aus der langfristigen Investitionsentscheidung und Kapitaleinsatzplanung herausgelöst und beeinflussen die zu treffende, kurzfristige Auswahl der Ressourcen eines Montagearbeitsplatzes nicht.

Die vormals fixen Kapitaldienst- und Instandhaltungskosten werden entsprechend der Maschinenstundensatzrechnung (vgl. Westkämper & Decker (2006, S.95f) und Hartel & Lotter (2012, S.381)) in variable Nutzungsentgelte umgewandelt, wodurch sich die Kosten unterschiedlicher Ressourcenalternativen auf Basis variabler Kostensätze miteinander vergleichen lassen. Die variablen Nutzungsentgelte je Ressource werden über die veranschlagte Produktionsdauer summiert und zu den fixen Wandlungs- und Implementierungskosten je Ressource addiert. Die Gesamtkosten werden abschließend auf die zu produzierenden Stückgüter heruntergebrochen.

Potentielle Risiken, aufgrund einer kürzeren Nutzungsdauer sowie einer potentiell nicht vorhandenen Weiterverwendung der Ressourcen nach Ende des Produktionszeitraums, werden aus der betriebswirtschaftlichen Betrachtung des Betreibers herausgelöst. Diese Risiken finden sich in der Kalkulation des Leasinggebers wieder.

Tabelle 3.2 bewertet die beschriebenen Verfahren. Die Kriterien orientieren sich an den Anforderungen einer Grobplanung hybrider Montagearbeitsplätze. Aufgrund der identischen Ausgangsbasis erfolgt eine gemeinsame Bewertung der Annuitäten-, Interner-Zinssatz- und Kapitalwertmethode.

- **Anwendungsdomäne Montage:** Das Verfahren soll auf Montagearbeitsplätze, insbesondere im Anwendungsfall der hybriden Montage, anwendbar sein.
- **Berücksichtigung einer Rekonfiguration:** Das Verfahren soll die Rekonfiguration eines Montagearbeitsplatzes betriebswirtschaftlich berücksichtigen.
- **Kostentransparenz:** Die Methode soll die Kostenverursachung berücksichtigen und die Kosten je Prozess und Ressource unterscheiden.

- **Unabhängigkeit von Prognosen:** Da jede Prognose mit Unsicherheiten behaftet ist, sollen die Ergebnisse idealerweise unabhängig von prognostizierten Werten oder getroffenen Annahmen sein.

Tabelle 3.2: Gegenüberstellung der Methoden der Investitionsrechnung

	Anwendungsdomäne Montage	Berücksichtigung der Rekonfiguration	Kostentransparenz	Unabhängigkeit von Prognosen
Statische Verfahren				
Kostenvergleichsrechnung	●	○	●	○
Gewinnvergleichsrechnung	●	○	◐	○
Rentabilitätsrechnung (ROI)	●	○	◐	○
statische Amortisationsrechnung	●	○	○	○
Dynamische Verfahren				
Kapitalwertmethode (NPV)	●	●	◐	○
Dynamische Amortisationsrechnung	●	●	◐	○
Lebenszykluskostenansatz (LCC)	●	●	●	○
Kostenvergleichsrechnung im Leasingmodell	●	●	●	◐

Legende: ●: voll erfüllt, ◐: teilweise erfüllt, ○: nicht erfüllt

3.3 Optimierungsproblem

Die Grobplanung eines hybriden Montagearbeitsplatzes unter Nutzung unterschiedlicher Ressourcen stellt ein kombinatorisches Optimierungsproblem auf einem Montagevorranggraphen dar. Der Vorranggraph leitet sich dabei primär aus der Produktstruktur ab (Feldmann 2014c, S.591). Es gilt, die Verrichtung aller Montageprozesse (Kanten) so zu optimieren, dass der finale Produktzustand (Knoten) mit optimalem Ressourceneinsatz erreicht werden kann. Entsprechend den Charakteristika eines Montageprozesses ergibt sich nach der Ressourcenallokation eine endliche Menge an Ressourcenalternativen je Kante. Jede

dieser Ressourcen besitzt individuelle Eigenschaften. Die Eignung einer Ressource für einen Prozess kann durch das Kantengewicht f quantifiziert werden. Im Fall der hybriden Montage ergeben sich dabei, sobald eine Automatisierungseignung gegeben ist, mindestens zwei alternative Ressourcen – Mensch und Roboter. Der beschriebene Montagevorranggraph mit individuellen Kantengewichten ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

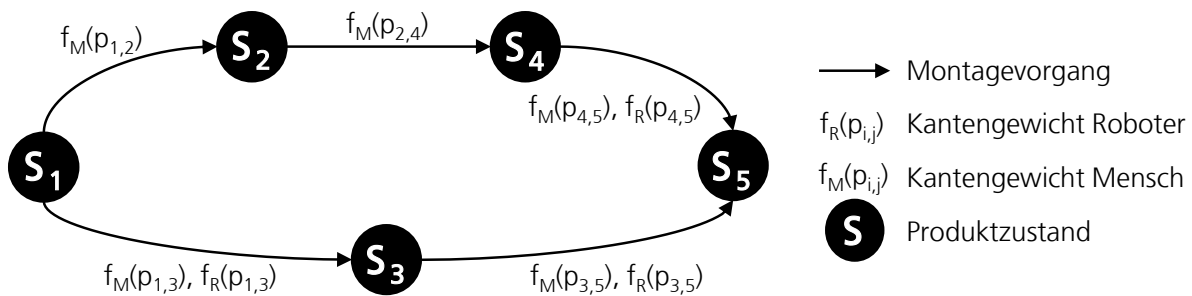


Abbildung 3.3: Generischer Montagevorrang mit Darstellung der individuellen Kantengewichte für Mensch und Roboter, eigene Darstellung i.A.a. Feldmann (2014c, S.591)

Es bestehen endlich viele Möglichkeiten den Montagevorranggraphen entsprechend der potentiellen Ressourcenkombinationen und unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen zu durchlaufen (Neumann & Morlock 1993). Vergleichbar mit dem »Problem des Handlungsreisenden« (Traveling Salesman Problem, TSP) gilt es, den optimalen Pfad zu identifizieren, der alle Produktzustände (Knoten) durchläuft und dabei die Aufwände (Summe über alle Kantengewichte) optimiert.

Beispiel in Analogie zum TSP:

Finde die Route einer Karte, die eine vorgegebene Reihenfolge zu besuchender Städte unter Berücksichtigung alternativer Verkehrsmittel minimiert.

Das Optimierungsproblem über den Montagevorranggraphen soll im weiteren Verlauf der Arbeit als »Flexible Job Shop Scheduling Problem« (FJSSP) bezeichnet werden, da im Fall der Optimierung hybrider Montagearbeitsplätze, die Allokation der Ressourcen und die Reihenfolgenbildung der Montageprozesse parallel ablaufen (Beumelburg 2005, S.39).

3.3.1 Grundlagen des Optimierungsproblems

Ein Optimierungsproblem P kann nach Salhi (2017, S.3) entsprechend Gleichung 3.1 beschrieben werden:

$$(P) : \begin{cases} \text{Minimize} & F(X) \\ \text{s.t.} & X \in S, S \subseteq E \end{cases} \quad (3.1)$$

P kann dabei schwierig zu lösen sein, wenn einer der folgenden Punkte zutrifft (Salhi 2017, S.3):

- (I) Der Lösungsraum E kann sowohl eine endliche Menge als auch eine sehr große Mengendarstellung sein, die das Problem zu
 - (I.I) einem kombinatorischen Optimierungsproblem,
 - (I.II) für $E = \mathbb{N}^n$ zu einem ganzzahligen Optimierungsproblem,
 - (I.III) für $E = \mathbb{R}^n$ zu einem kontinuierlichen Optimierungsproblem macht.
- (II) Die Entscheidungsvariable X kann kontinuierlich, ganzzahlig, binär oder eine Kombination dieser Typen sein.
- (III) Die Zielfunktion $F(\cdot)$ muss nicht unbedingt linear, kontinuierlich oder konvex sein. Sie kann ebenso aus mehreren Objekten bestehen, die miteinander in Konflikt stehen.
- (IV) Der Machbarkeitssatz S ist nicht notwendigerweise konvex und kann getrennte Teilmengen enthalten.
- (V) Die Realisierbarkeit der Parameterwerte innerhalb der Definition von F und S kann kritisch sein, sollten sie probabilistisch, geschätzt oder sogar nicht vollständig bekannt sein.

Je nach Ausprägung des Machbarkeitssatzes S wird das Problem P zu einem diskreten (kombinatorische Optimierung) oder kontinuierlichen Optimierungsproblem (globale Optimierung). Die Lösung des Problems folgt nach Salhi (2017, S.6) folgendem Vorgehen:

- Wenn möglich, sollte eine **exakte Lösung** bestimmt werden.

- Sollte dies nicht möglich sein, so kann ein **heuristisches Lösungsverfahren** angewendet werden.
- Sollte auch dies nicht funktionieren, so soll eine **exakte Lösung** auf ein **approximiertes Problem** gesucht werden.
- Sollten alle drei Verfahren nicht anwendbar sein, so kann ein **heuristisches Lösungsverfahren** auf das **approximierte Problem** angewendet werden.

Bei Anwendung einer Heuristik kann nicht sichergestellt werden, dass das erzielte Ergebnis das Optimum widerspiegelt. Je nach Qualität der zu erzielenden Lösung steigt der Rechenaufwand, weshalb mitunter Abstriche an der Lösungsqualität zu akzeptieren sind (Domschke et al. 1997, S.40f). Heuristische Ansätze werden aus diesem Grund immer dann verwendet, wenn das Problem nicht in deterministischer Polynomialzeit exakt gelöst werden kann oder das Risiko eines lokalen Minimums zu groß ist (Salhi 2017, S.8).

3.3.2 Komplexitätsklasse des Optimierungsproblems

In der theoretischen Informatik findet eine Klassifizierung algorithmischer Probleme entsprechend des zugrundeliegenden Rechenaufwands statt (Domschke et al. 2015, S.132f). Es gibt Probleme, die auch im ungünstigsten Fall mit polynomialem Aufwand lösbar sind. Diese gehören zur Komplexitätsklasse P.

Weiterhin existieren Probleme, für die bisher kein Algorithmus bekannt ist, der auch die am schwierigsten zu lösende Instanz des Problems mit polynomialem Aufwand löst. Diese Probleme gehören zur Klasse NP. Der Ausdruck NP steht für »nichtdeterministische Polynomialzeit« (Salhi 2017, S.14).

Die Bedeutung der Polynomialzeit liegt darin begründet, dass Probleme unterschieden werden können, die auf deterministischen Rechenmaschinen »praktisch lösbar« und »praktisch nicht lösbar« sind. Nichtdeterminismus beschreibt den Umstand, dass nicht nur genau eine Berechnung zu einer bestimmten Eingabe erfolgen kann, sondern mehrere Möglichkeiten für den Übergang in den nachfolgenden Zustand existieren⁶. Probleme, die nicht in

⁶Vergleiche hierzu Abbildung 3.3: Es existieren immer mehrere Lösungsalternativen über die Auswahl unterschiedlicher Ressourcen je Kante

deterministischer Polynomialzeit lösbar sind, weisen selbst bei relativ geringer Problemgröße nicht abschätzbare Rechenaufwände auf. Die Lösungen können daher nicht effizient überprüft werden.

Die Erweiterung des Begriffes zur NP-Schwere sagt aus, dass ein Algorithmus, der ein NP-schweres Problem löst, mithilfe einer Reduktion genutzt werden kann, um alle Probleme der Komplexitätsklasse NP zu lösen. Der Algorithmus ist somit mindestens so »schwer« wie alle Probleme in NP. Ein Problem ist reduzierbar, wenn jeder Algorithmus, der das zweite Problem löst, auch in der Lage ist, das erste Problem zu lösen.

Beispiel:

Das Quadrieren einer Zahl ist auf die Multiplikation zweier Zahlen reduzierbar. Jeder Algorithmus der zwei Zahlen miteinander multiplizieren kann, kann auch quadrieren, indem er die Zahl mit sich selbst multipliziert.

Probleme werden dann als NP-vollständig bezeichnet, wenn sie in NP liegen und zusätzlich NP-schwer sind. Diese Problemklasse lässt sich nach aktuellem Stand der Wissenschaft vermutlich nicht effizient lösen. Eine Bestätigung oder Widerlegung dieser Aussage ist als »P-NP-Problem« bekannt und stellt ein ungelöstes Problem der Mathematik, speziell der Komplexitätstheorie in der theoretischen Informatik, dar.

Obwohl die NP-Vollständigkeit nur für Entscheidungsprobleme definiert ist (binäre Aussagen), wird sie ebenso zur Klassifizierung von Such- und Optimierungsproblemen herangezogen. Man spricht in diesem Fall von »NP-Äquivalenz«.

Das kombinatorische Optimierungsproblem eines FJSSP repräsentiert ein NP-vollständiges Problem. Unter der Annahme, dass die Komplexitätsklassen P (effizient lösbare Probleme) und NP (schwierig, schwer lösbare Probleme) verschieden sind – negative P-NP-Vermutung – kann Folgendes geschlossen werden:

- Eine geratene Lösung kann in Polynomialzeit verifiziert werden – es liegt nichtdeterministisches Verhalten vor.
- Der Nachweis der NP-Schwere kann durch Reduktion eines bereits bewiesenen Problems erfolgen. Aus der Transitivität der Polynomialzeitreduktion folgt, dass alle anderen Probleme aus NP auch auf das betrachtete Problem reduzierbar sind.

Brucker (2004, S.40) und Ruiz (2019, S.4) erwähnen, dass die meisten Optimierungsprobleme der Reihenfolgen- und Sequenzbildung von NP-schwerer Natur sind und sich auf bereits bekannte NP-vollständige Probleme reduzieren lassen. In diesem Zusammenhang sei an die »21 NP-vollständigen Probleme« nach Karp (1972, S.94f) verwiesen. Die Herausforderungen der Partitions- und Reihenfolgenbildung des vorliegenden FJSSPs können dabei den NP-vollständigen »Knapsack-Problemen⁷« zugeordnet werden.

3.3.3 Heuristische Lösungsverfahren

Heuristische Lösungsverfahren versuchen auf unvollständigen Informationen und in begrenzter Zeit wahrscheinliche Aussagen zu treffen und praktikable Lösungen zu identifizieren. Sie bedienen sich oftmals Analogien der Natur (physikalisch, biologisch) sowie stochastischer Effekte (Chryssolouris & Subramaniam 2001; Beumelburg 2005; Chang et al. 2013; Liu et al. 2015). Heuristische Verfahren unterscheiden sich in ihren Charakteristika und können nach Abbildung 3.4 und i.A.a. Domschke et al. (2015, S.135f) und Salhi (2017, S.17) in drei Hauptklassen unterteilt werden.

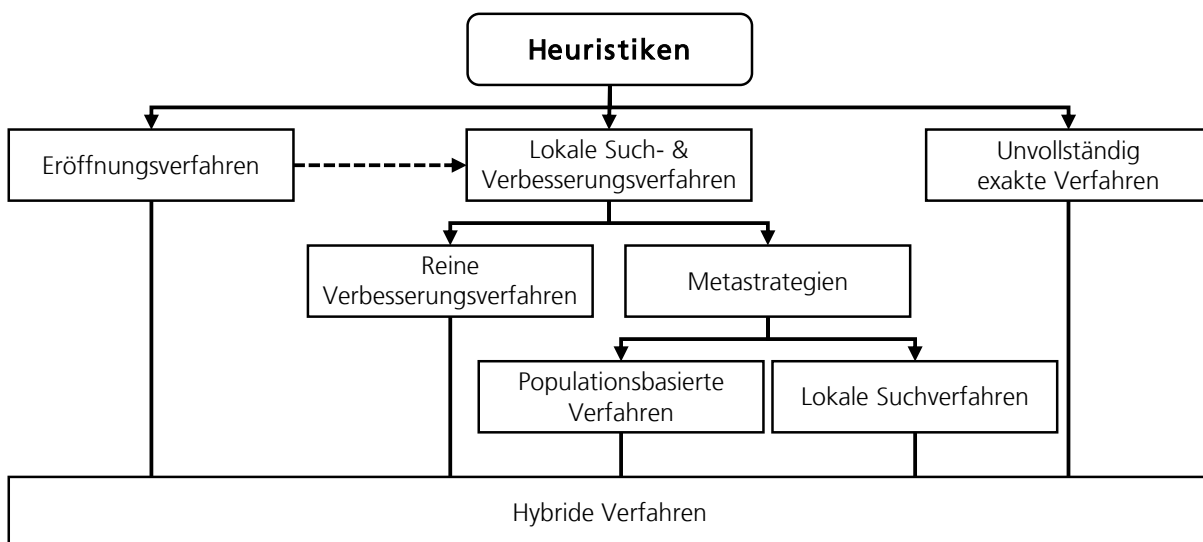


Abbildung 3.4: Klassifizierung von Heuristiken i.A.a. Domschke et al. (2015, S.135f) und Salhi (2017, S.17)

⁷Optimierungsproblem der Kombinatorik, bei der aus einer Menge an Elementen mit individuellem Gewicht und Nutzwert ausgewählt werden muss, mit dem Ziel das Maximalgewicht nicht zu überschreiten und den Nutzen zu maximieren.

Die Klasse der »lokalen Such- und Verbesserungsverfahren« beinhaltet reine Verbesserungsverfahren (*Improving Only*) und Metastrategien, die wiederum aus populationsbasierten (*Population Based*) und lokalen Suchverfahren bestehen. Diese akzeptieren zwischenzeitlich auch schlechtere Lösungen (*Not Necessarily Improving Only*).

Hinzu kommen »Eröffnungsverfahren«, die in einem (ersten) Verfahrensschritt auf eine größtmögliche Erhöhung oder Verbesserung des Zielfunktionswertes abzielen (*Greedy und Myopische Verfahren*) sowie »unvollständig exakte Verfahren« (*Branch & Bound*).

Die Klassen der Eröffnungs- und lokalen Suchverfahren lassen sich zusätzlich, neben der dargestellten Klassifizierung, in deterministische, stochastische sowie randomisierte Vorgehensweisen unterteilen. Im Fall einer deterministischen Herangehensweise sind die erwartbaren Lösungen bei unterschiedlichen Eingangsgrößen immer gleich, während im stochastischen Anwendungsfall unterschiedliche Lösungen zu erwarten sind (Domschke et al. 2015, S.137).

Die einzelnen Verfahren lassen sich auch miteinander kombinieren. Diese sogenannten »hybriden Heuristiken« (*Hybridisation*) bestehen in der Regel aus zwei Phasen, in denen eine Heuristik die andere Heuristik aufruft, um eine weiterführende Optimierung zu erreichen. So können bspw. die Ergebnisse des »Eröffnungsverfahrens« einen Startwert für daran anschließende »Such- und Verbesserungsverfahren« liefern. Dieses Vorgehen ist beispielhaft in Abbildung 3.4 mit dem gestrichelten Pfeil angedeutet.

In der Klasse der »reinen Verbesserungsverfahren« finden sich Verfahren der Stochastik (»*Greedy Algorithmen*«, »*Stochastic Local Search*«, ...), in denen über Zufallsexperimente, unter Annahme des Gesetzes großer Zahlen, eine numerische Annäherung an das Optimum untersucht wird. Entscheidend für den Erfolg und die Geschwindigkeit der Annäherung ist die Auswahl der Algorithmen und die Vermeidung redundanter Berechnungsschritte (Salhi 2017, S.15).

Bei den »Metastrategien« werden lokale Suchverfahren eingesetzt, die temporäre Verschlechterungen des Zielfunktionswertes akzeptieren, um mögliche lokale Optima wieder zu verlassen (Domschke et al. 2015, S.137). Zu diesen Verfahren zählen z. B. die Heuristiken des »*Simulated Annealings*«, der »*Tabu Search*« oder der »*Threshold Acceptance*« (Dueck 1993).

Populationsbasierte Heuristiken betrachten mehrere Lösungen parallel und sind inspiriert von biologischen oder physikalischen Verhaltensweisen der Natur. Durch den Aufbau einer Lösungspopulation, lassen sich Evolutionsstufen generieren und die einzelnen Individuen dieser Evolutionsstufen miteinander vergleichen.

Zu den »populationsbasierten Verfahren« zählen bspw. »Genetische Algorithmen« (»*Genetic Algorithms*«, Chryssolouris & Subramaniam (2001), Beumelburg (2005) und Chen et al. (2012)), Verfahren der Imitation der Futtersuche von Ameisen (»*Ant Colony Optimization*«, Dorigo et al. (1999) und Solimanpur et al. (2004)) oder Verfahren in Analogie dem Fortpflanzungsverhalten von Bakterien (»*Bacteria Foraging Algorithms*«, Xing & Gao (2014) und Liu et al. (2015)).

3.4 Folgerungen aus dem Stand der Technik

Obwohl die Verfügbarkeit und das Angebot spezifischer Automatisierungskomponenten für die hybride Montage stetig steigt, fehlen Methoden, die bei den Entscheidungen zur Planung rekonfigurierbarer MRK-Systeme unterstützen (Bauer et al. 2015; Lohse et al. 2005, S.302). Der Entwurf hybrider Montagearbeitsplätze ist eine herausfordernde Tätigkeit, die eine Vielzahl manueller Entscheidungen in unterschiedlichen Wissensfeldern der Montagesystemgestaltung beinhaltet (Ranz et al. 2018). Die Qualität der Entscheidungen ist vom impliziten Erfahrungsschatz, Kenntnisstand und Vorwissen des Planers abhängig und daher individuell verschieden. Weiterhin gilt zu beachten, dass die Auswirkungen einzelner Entscheidungen der Ressourcenauswahl oder Arbeitsteilung erst im Zusammenspiel aller Entscheidungen ihre vollen Auswirkungen zeigen.

Es gilt, dass insbesondere in der frühen Phase der Grobplanung maßgeblich die Gestalt und somit die technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften definiert werden. Aufgrund begrenzter Zeit im Planungsalltag findet in vielen Fällen keine umfassende Evaluation und Abwägung alternativer Systemlösungen statt.

In dieser Arbeit sollen unterschiedliche methodische Ansätze miteinander kombiniert und zu einer »automatisierten Methode der Grobplanung hybrider Montagearbeitsplätze« zusammengefasst werden. Die vorliegende Arbeit baut dabei auf den Arbeiten der Informationsmodellierung für eine fähigkeitsbasierte Ressourcenallokation von Lohse et al.

(2005) auf, betrachtet aber explizit den Anwendungsfall einer hybriden, kollaborierenden Montage. Methoden der dynamischen Optimierung der Ressourcenallokation zur Laufzeit der Applikation (Fasth et al. 2012; Ding et al. 2014; Nikolakis et al. 2018) werden explizit ausgeschlossen, da diese zum frühen Zeitpunkt der Grobplanung keinen Mehrwert bieten.

Die Vorarbeiten von Beumelburg (2005), Chen et al. (2014) und Weckenborg & Spengler (2019) in der statischen Optimierung der Arbeitsteilung einer Mensch-Roboter-Kollaboration sollen dahingehend erweitert werden, dass neben generischen Modellen der Ressourcen Mensch und Roboter, eine tiefere Betrachtung, Unterscheidung und Auswahl alternativer Automatisierungsressourcen im Montagesystementwurf erfolgen soll.

Die hierarchische Analyse der Montageschritte (HTA) in Verbindung mit einer Informationsmodellierung der Ressourcen erfolgte bereits bei Reichenbach (2010) für einen spezifischen Leichtbauroboter und Menschen in der Montage. Das Vorgehen soll im Rahmen der zu entwickelnden Methode auf mehrere Roboterfabrikate und Montageprozesse erweitert werden, um einen breiten Bereich der hybriden Systemgestaltung über mehrere Ressourcenalternativen abzudecken.

Die Formalisierung der Fähigkeiten und Eigenschaften unterschiedlicher Ressourcen soll eine objektive Bewertung der Ressourcenauswahl ermöglichen, um eine quantifizierbare Aussage über den Eignungsgrad einzelner Ressourcen im Systementwurf zu erhalten (Ranz et al. 2018).

In diesem Zusammenhang stellt die wirtschaftliche Bewertung der Investitionsentscheidung rekonfigurierbarer Systementwürfe eine besondere Herausforderung dar. Bekannte Verfahren der Investitionskostenrechnung basieren auf Prognosen der Produktionsstückzahlen und Variantenszenarien, die stets mit Unsicherheiten behaftet sind. Untersuchungen der TCO-Rechnung zeigen, dass dabei insbesondere die Zeitpunkte der Rekonfiguration und Investition entscheidend für den wirtschaftlichen Erfolg sind (Großmann et al. 2013).

Zum Zeitpunkt der Grobplanung eines Montagearbeitsplatzes können aber weder die Produktionsstückzahlen noch die Zeitpunkte der Investition und Rekonfiguration sicher vorhergesagt werden. Die vorliegende Arbeit fokussiert daher eine Kostenvergleichsrechnung im Leasingmodell, um das Risiko einer Investitionskostenentscheidung aus dem Betrachtungsfokus der Grobplanung herauszulösen (Fechter et al. 2019a). Dadurch wird eine

wirtschaftliche Vergleichbarkeit manueller und automatisierter Ressourcen in der Phase der Grobplanung ermöglicht.

Zur Formalisierung des Planungsvorgehens werden die Herangehensweisen des V-Modells nach VDI 2206 und der Entwurfsmethode des Axiomatic Designs (Suh 1990) miteinander kombiniert. Beide Modelle nutzen die Dekomposition der Problemstellung in Teilprobleme, eine individuelle Lösungsfindung auf funktionaler Ebene der Einzeldomänen und deren systemische Integration zur Gesamtlösung. Sie eignen sich daher gut für den systemgetriebenen Ansatz aus der Sicht einer kontinuierlichen Rekonfiguration (Ressource, Arbeitsteilung, Arbeitsreihenfolge) hybrider Montagearbeitsplätze.

Das V-Modell der VDI 2206 ist in seinem zeitlichen Ablauf klar definiert, weist aber Nachteile in der Quantifizierbarkeit der Entscheidungen auf. Diesen wird durch den Einsatz des Informationsaxioms der Methode des »Axiomatic Designs« und einer multikriteriellen Bewertungsfunktion in Anlehnung an das »Kano-Modell« (Sauerwein et al. 1996) begegnet.

Durch die Quantifizierbarkeit der Ressourcenentscheidung kann die Grobplanung des Montagearbeitsplatzes als multikriterielles Optimierungsproblem formuliert werden (Salhi 2017). Da es sich in diesem Kontext um ein flexibles Arbeitsvorbereitungsproblem (FJSSP) der Komplexitätsklasse NP handelt (Beumelburg 2005), kann keine Lösung in deterministischer Polynomialzeit gefunden werden. Diesem Umstand soll durch den Einsatz heuristischer Lösungsverfahren begegnet werden (Domschke et al. 2015; Salhi 2017).

Die zu entwickelnden Heuristiken sollen hinsichtlich Laufzeitverhalten und Ergebnisqualität untersucht und miteinander verglichen werden. Es gilt, eine Strategie der automatischen Optimierung hybrider Montagearbeitsplätze zu entwickeln und das beste heuristische Lösungsverfahren zu identifizieren und mit den Ergebnissen einer manuellen Planung zu vergleichen.

4 Rahmenbedingungen und Einschränkungen

Das Kapitel greift die abgeleiteten Folgerungen aus dem Stand der Technik auf und definiert Rahmenbedingungen und Einschränkungen der zu entwickelnden Methode. Explizit werden in Kapitel 4.2 noch einmal die Themenkomplexe der Berechnung der Taktzeit sowie der Kostenrechnung im Leasingmodell einer Ressourcenkonfiguration betrachtet. Das Kapitel schließt mit der Identifikation von Bewertungs- und Optimierungskriterien.

4.1 Entwurf hybrider Montagearbeitsplätze

Das nachfolgende Unterkapitel dient der Eingrenzung des Anwendungsbereichs. Es definiert Randbedingungen der Produkt-, Prozess und Ressourcenmodellierung sowie die daraus abgeleiteten Elementarbausteine der Systemmodellierung, die sogenannten PPR-Tripel.

4.1.1 Rand- und Nebenbedingungen der Optimierung

Wie in Abbildung 4.1 dargestellt, fokussiert die Methode die unterste Systemebene der Fabrik (Hernández Morales 2003) und explizit den Anwendungsfall des hybriden Montagearbeitsplatz mit einem Fokus auf die Mensch-Roboter-Kollaboration.

Alle Anforderungen beziehen sich auf die Gestaltung der Ressourcenallokation und zugehörigen Arbeitsteilung im Umfeld der Vor- und Endmontage der Stückgüterindustrie. Eine Berücksichtigung der Verkettung mehrerer Arbeitsstationen oder eine Aufteilung der Arbeitsinhalte auf mehrere Stationen findet nicht statt. Alle erforderlichen Arbeitsinhalte der Montage werden in einer Station – einem Montagearbeitsplatz – verrichtet. Entsprechend der Montagevarianten aus Kapitel 2.3 ergeben sich die folgenden Definitionen und Abgrenzungen:

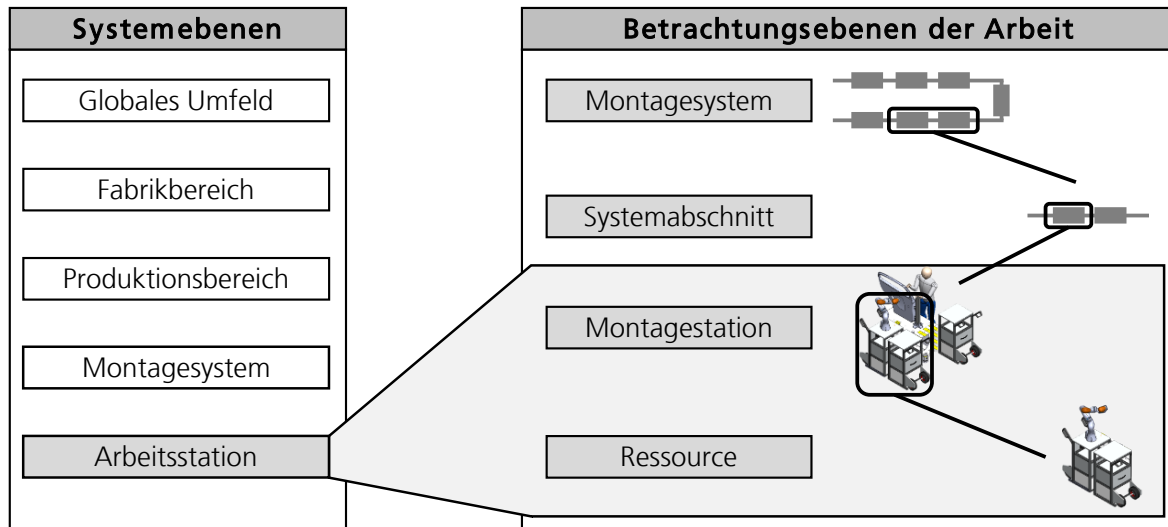


Abbildung 4.1: Betrachtungsebenen des Systementwurfs dieser Arbeit am Beispiel hybrider Montagearbeitsplätze, eigene Darstellung i.A.a. Hernández Morales (2003) und Wiendahl et al. (2007, S.785)

- (I) Die **Ressourcenkonfiguration** muss je nach Montagevariante folgende Nebenbedingungen erfüllen:
- (I.I) Ein **manueller Montagearbeitsplatz** enthält keine Automatisierung, bzw. keinen Roboter. Die physische Verrichtung der Montageprozesse und die Informationsverarbeitung erfolgt manuell durch den Menschen.
 - (I.II) Ein **hybrider Montagearbeitsplatz** enthält die Ressource Mensch und eine automatische Handhabungsressource. Zwischen beiden Ressourcen findet eine Arbeitsteilung statt.
 - (I.III) Ein **automatischer Montagearbeitsplatz** enthält maximal zwei automatische Handhabungsressourcen (Roboter) und keine Ressource Mensch. Alle Montageprozesse und die Informationsverarbeitung laufen automatisch ab.

Zur Einschränkung des Anwendungsfalls und zur Begrenzung der Umfänge dieser Arbeit sollen weiterhin folgende Annahmen getroffen werden:

- (II) Im Zuge der **Allokation von Ressourcen** können Einzelressourcen oder eine Kombination aus zwei Ressourcen identifiziert und einem Montageprozess zugewiesen werden. Die Kombinationen ergeben sich aufgrund funktionaler Anforderungen der

Montageaufgabe und setzen sich stets aus einer Handhabungsressource und einem Werkzeug zusammen.

- (III) Eine räumliche Anordnung der Ressourcen zur **Optimierung des Layouts** wird nicht durchgeführt.

Zusätzlich gelten folgende betriebswirtschaftlichen Randbedingungen:

- (IV) Aus Gründen der Vergleichbarkeit der Kosten manueller und automatischer Montagearbeitsplätze wird eine **Kostenvergleichsrechnung im Leasingmodell** angewendet.
- (V) **Material- und Lagerkosten** werden vernachlässigt, da diese im Zuge der Grobplanung von Montagearbeitsplätzen kein Unterscheidungsmerkmal darstellen.

Die zwei folgenden Randbedingungen sind von der Definition der Montageaufgabe abhängig und werden unmittelbar durch den Planer zu Beginn der Optimierung festgelegt. Sollte eine dieser Randbedingungen verletzt werden, so wird die generierte Lösung automatisch verworfen.

- (VI) Die **Montagekosten je Stück** dürfen die Zielkosten der Montage je Stück nicht überschreiten.
- (VII) Es wird die maximale **Taktzeit** der Montageaufgabe definiert, die sich aus der Losgröße des Auftrags und dem geplanten Fertigstellungszeitpunkt ergibt.

4.1.2 Modellierung der Produkt- und Prozessinformationen

Das AML-Datenaustauschformat aus Kapitel 2.5.3 wird zur semantischen Modellierung verwendet. Alle produkt- und prozessbezogenen Informationen liegen zu Beginn der Optimierung vor und werden im AML-Format dem Planungsprozess zur Verfügung gestellt. Diese Informationen beinhalten auch bereits die sequenziellen Abhängigkeiten der einzelnen Montageschritte (Montagevorrang). Es wird angenommen, dass alle Bauteile montierbar sind. Eine manuelle Verrichtung des Montageschritts ist damit immer möglich.

Die Bewertung der Automatisierungseignung orientiert sich am score-basierten Ansatz nach Spingler & Beumelburg (2002) auf Ebene der Montageschritte. Die technische Eignung eines Montageprozesses wird dabei bewertet und in einem Zahlenwert im Intervall $[0,1]$ codiert. Je größer dieser Wert ist, desto besser eignet sich ein Montageschritt zur Automatisierung.

Die Produktmodellierung orientiert sich in ihrer Struktur am Core Product Model (CPM) mit den Erweiterungen der Verknüpfungen zwischen den Bauteilen entsprechend dem Open Assembly Model (OAM) (Rachuri et al. 2005). Alle Datenobjekte besitzen ein Verhalten (*Behavior*, gleichzusetzen mit einer Rolle in AML) und verfügen über Assoziationen (Schnittstellen), um die Relationen zwischen den einzelnen Objekten eines Arbeitsplatzentwurfs abzubilden.

4.1.3 Modellierung der Ressourceninformationen

Eine Recherche zu kommerziell erhältlichen Ressourcen im Bereich der hybriden Montage wurde durchgeführt und mehr als 250 unterschiedliche Ressourcen verschiedener Hersteller katalogisiert. Die Eigenschaften der Ressourcen wurden semantisch beschrieben und in Form einer Ontologie⁸ gespeichert.

Ontologien sind eine Form der Wissensbasis, die Informationen als grundlegende Typen von Entitäten einer Anwendungsdomäne und deren strukturelle Beziehungen untereinander abbilden. Das modellierte Wissen der Ressourcen umfasst dabei sowohl die Syntax (Form), als auch die Semantik (Inhalt, Bedeutung) (Hitzler 2008). Wirkzusammenhänge zwischen mehreren Objekten sowie Objekten und Literalen⁹ werden mittels Prädikatenlogik semantisch verbunden. Ein schematischer Auszug der implementierten Ressourcenontologie kann Abbildung 4.2 entnommen werden. Die Prädikate zwischen zwei Entitäten repräsentieren den semantischen Zusammenhang.

Mittels graphenbasierter Abfragesprachen (bspw. SPARQL) können gezielt Einträge (*Objects*) der Ontologie identifiziert werden, die die gegebenen Anforderungen der Abfrage erfüllen.

⁸vorliegende Implementierung in der Web Ontology Language (OWL)

⁹Zeichenfolgen, die zur direkten Darstellung der Werte von Basistypen (z. B. Ganzzahlen, Gleitkommazahlen, Zeichenketten) definiert sind

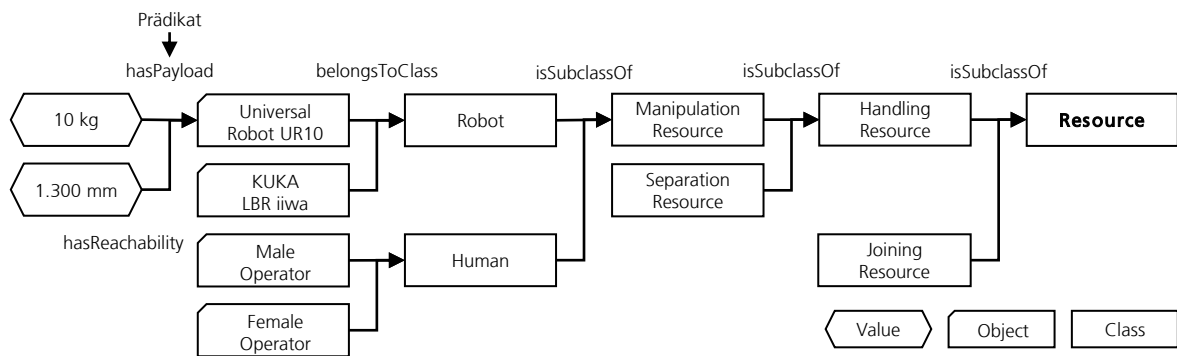


Abbildung 4.2: Auszug aus der Ressourcenontologie, eigene Darstellung der Ressourcenklassifizierung nach Tätigkeiten i.A.a. Müller (2013, S.705)

Das implementierte Ressourceninformationsmodell hat nicht den Anspruch, alle verfügbaren Ressourcen im Bereich der hybriden Montage abzubilden. Gerade in Themenfeldern mit einer hohen Marktdynamik, wie bspw. der MRK, erscheinen jedes Jahr unzählige Produktneuheiten, die manuell nur schwer erfasst, katalogisiert und gepflegt werden können. Hinzu kommt, dass die Auswahl und Verfügbarkeit einer Ressource je Unternehmen individuell ist. Einschränkungen aufgrund von Standardisierungsbestrebungen können pauschal nicht abgebildet oder wiedergegeben werden.

Die Ressource Mensch wird aus Gründen der Vereinfachung standardisiert. Eine Unterscheidung der physiologischen Faktoren aufgrund Alter, Geschlecht, individuellen physischen Einschränkungen oder kognitiven Fähigkeiten ist denkbar, findet im Rahmen dieser Arbeit aber keine Anwendung. Für die Planung wird aus diesem Grund ein generisches Menschenmodell verwendet, das sich an den Fähigkeiten eines Werkers im Alter von 25 Jahren orientiert. Die physiologischen Details der Körpermaße und Leistungsfähigkeit wurden der Literatur entnommen (DIN 33402-2; Wakula 2016; Berufsgenossenschaft Holz und Metall 2013).

4.1.4 PPR-Tripel und Montagearbeitsplatz

Um quantitative Aussagen über potentielle Ressourcen für einen Montageschritt zu erhalten, werden im Schritt der Ressourcenallokation (vgl. Kapitel 5.3) Einzelressourcen und Ressourcenpaare gesucht, die die Anforderungen der Domänen aus Prozess, Produkt und Randbedingungen erfüllen (Eversheim 1981, S.41). Durch die explizite Allokation einer Ressource zu einem Montageprozess mit korrespondierendem Produkt entsteht eine PPR-

Ressourcenlösung, die nachfolgend PPR-Tripel genannt werden soll. Das Tripel definiert die eindeutige Verknüpfung der drei Domänen des Systementwurfs unter Berücksichtigung der Rand- und Umweltbedingungen einer spezifischen Montageaufgabe.

Das PPR-Tripel enthält die Verweise zu allen Informationen im AML-Austauschformat, die zur Verrichtung der Montagetätigkeit unter den gegebenen Rand- und Umweltbedingungen erforderlich sind. Es repräsentiert einen Einzelbaustein der Arbeitsplatzlösung für einen Montageschritt (Müller 2013, S.713) mit individuellen Eigenschaften in Abhängigkeit des Montageumfangs, des zu montierenden Produkts, den Fähigkeitsanforderungen der Montageoperationen und der dafür ausgewählten Ressource. Im Fall der hybriden Montage definiert das PPR-Tripel über den Ressourcenverweis, ob ein Montageschritt manuell oder automatisiert ausgeführt wird. Es ist anzustreben, dass alle Merkmale und Eigenschaften eines PPR-Tripels und somit auch die Eigenschaften eines Montagearbeitsplatzes quantifizierbar sind.

Abbildung 4.3 illustriert ein PPR-Tripel. Mehrere PPR-Tripel können zu einem Montagearbeitsplatz zusammengefasst und bspw. über die Reihenfolge der Montageschritte aus dem Montagevorranggraphen zueinander in Relation gesetzt werden. Die Anzahl der PPR-Tripel eines Montagearbeitsplatzes ist proportional der Anzahl der zu verrichtenden Montageschritte.

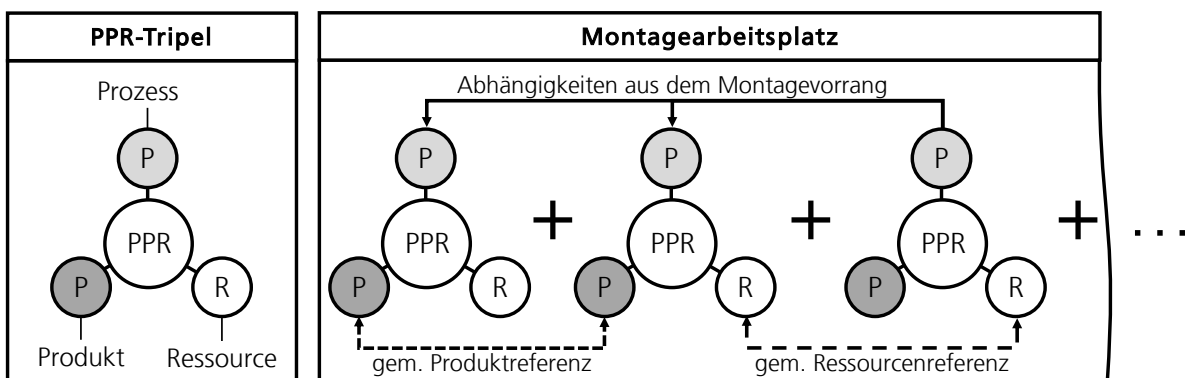


Abbildung 4.3: Darstellung eines PPR-Tripels und der Aggregation mehrerer PPR-Tripel zu einem Montagearbeitsplatz

4.2 Zielgrößen hybrider Montagearbeitsplätze

Das folgende Unterkapitel adressiert die Zielgrößen der Taktzeit im hybriden Systementwurf und der Kostenrechnung im Leasingmodell. Beide Kriterien sollen auf die Grobplanung hybrider Montagearbeitsplätze angewendet werden.

4.2.1 Bestimmung der Taktzeit der hybriden Montage

Der Mehrwert von MRK-Systemen kommt zum Tragen, wenn durch den Einsatz eines Roboters eine gesteigerte Ausbringung des Montagearbeitsplatzes im Vergleich zur rein manuellen Montage erreicht werden kann. Die Bestimmung einer optimierten Sequenz der Montageprozesse unter Berücksichtigung der Ressourcenauswahl und die daraus resultierende Taktzeit stellt aus diesen Gründen ein wichtiges Kriterium bei der Auslegung hybrider Montagearbeitsplätze dar.

Die Klassifizierung der Montageschritte anhand der Manipulationsressourcen erlaubt die Darstellung in Form eines Gantt-Diagramms, wie es in Abbildung 4.4 zu sehen ist. Es gilt die Abfolge der Montageschritte zu identifizieren, die die kürzeste Taktzeit für das Montageszenario liefert. Prozessschritte, die mehr als einen Vorgänger besitzen, beeinflussen maßgeblich die zeitliche Abfolge der Gesamtsequenz und damit die Taktzeit. Diese können bei ungünstigem Timing eine verringerte Ressourcennutzung und damit verbundene Wartezeiten im Prozessablauf verursachen.

Abbildung 4.4 vergleicht die zeitliche Abfolge der Montageschritte einer manuellen und hybriden Montage. In beiden Fällen wird angenommen, dass die Montageschritte in derselben Reihenfolge verrichtet werden und Mensch und Roboter identische Zeitbedarfe aufweisen. In diesem theoretischen Beispiel wird deutlich, dass die Taktzeit der Montage durch Parallelisierung der Arbeitsinhalte nahezu halbiert werden kann.

Das Zeitkriterium wird umso wichtiger, je stärker sich Mensch und Roboter in der individuellen Prozesszeit je Handhabungsaufgabe unterscheiden. Dies kann unterschiedliche Gründe haben, bspw. die Last der zu handhabenden Objekte, die zu überbrückende Distanz, die Anzahl an Bahnsegmenten oder die erforderlichen Positionstoleranzen.

Entsprechend den Eigenschaften des Montageprozesses und der Auswahl der Ressource ergeben sich unterschiedliche Arbeitsteilungen und somit variierende Taktzeiten. Es gilt,

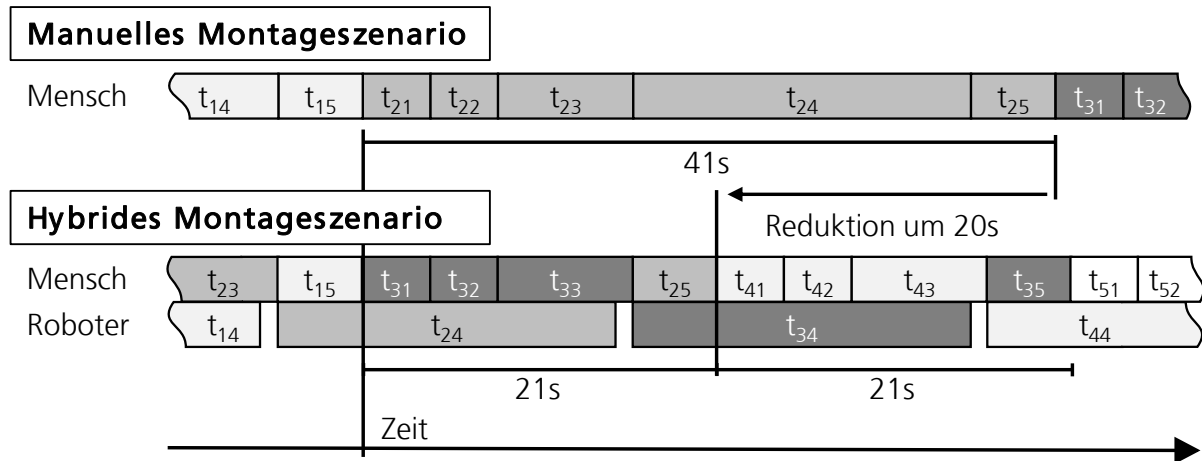


Abbildung 4.4: Vergleich der Reihenfolgenplanung zwischen einem sequenziellen manuellen und einem hybriden Montageszenario. t_{ij} beschreibt die Dauer eines Montageschritts j des Montageprozesses i .

trotz individuell unterschiedlicher Prozesszeiten je Montageschritt die Arbeitsinhalte auf Mensch und Roboter zu verteilen, so dass die Taktzeit über alle Prozessschritte minimiert wird.

Potentielle Leerlaufzeiten auf Seiten des Menschen, aufgrund mangelnder Arbeitsinhalte oder unzureichender Synchronisation in der Zusammenarbeit mit dem Roboter sind kostspielig (siehe Kapitel 5, Tabelle 5.1) und sollten generell vermieden werden. In einer ersten Näherung ist anzustreben, dass der manuelle Arbeitsinhalt des Menschen größer ausfällt als der automatische Arbeitsinhalt des Roboters. Hierdurch können selbst bei kleineren Störungen der Ressource Roboter, Wartezeiten des Menschen vermieden werden.

Zur Vermeidung unbeabsichtigter Wartezeiten aufgrund gestörter Prozessreihenfolgen und Synchronisation wird eine Stetigkeit der Arbeitsteilung angestrebt. Diese beinhaltet, dass ein mehrmaliges Übergeben des zu montierenden Produkts zwischen Mensch und Roboter vermieden werden sollte. Fehler in der Synchronisierung der Übergabezeitpunkte können den manuellen Montageprozess negativ beeinflussen oder Störungen im Bewegungsablauf des Roboters verursachen. Beides führt zu unbeabsichtigten Wartezeiten im Prozessablauf.

4.2.2 Stückkostenrechnung im Leasingmodell

In dieser Arbeit sollen die Montagestückkosten unterschiedlicher hybrider Montagearbeitsplätze – Wahlproblem der Investitionsentscheidung – anhand einer Kostenvergleichsrechnung bewertet werden (Westkämper & Decker 2006, S.106; Fleschutz 2010, S.36f).

Das Vorgehen der Kostenvergleichsrechnung im Leasingmodell wurde bereits bei Fechter et al. (2019a) eingeführt. Der Maschinenbetreiber ist in diesem Fall nicht mehr der Maschinenbesitzer, sondern beschafft sich seinen Ressourcenbedarf auf Basis einer Tages- oder Wochenplanung aus dem Pool verfügbarer Ressourcen eines Leasinggebers. Nach Beendigung des Produktionsauftrags werden die Miete der Ressourcen beendet und diese gehen an den Leasinggeber zurück. Die Kosten werden jeweils für einen Auftrag über alle Ressourcen aggregiert und über die Losgröße auf die einzelnen Produkte (Montagestückkosten) umgelegt. Kapitaldienstkosten im Sinne fixer Kosten für die Dauer der kalkulatorischen Abschreibung einer Ressource fallen nicht an.

Der Leasinggeber kann ein interner oder externer Dienstleister sein. Dieser ist daran interessiert, dass das investierte Kapital eine Rendite erwirtschaftet und sich die Ressourcen möglichst oft in einem operativen Montageeinsatz befinden. Es steht dem Leasinggeber frei, mit einem Risikoaufschlag eine Teilauslastung der Ressourcen in den Leasingpreis einzuberechnen – siehe die Annahmen des Kostenmodells der Leasingrechnung aus Kapitel 5.5.5 und die Zahlenwerte der Validierung in Tabelle D.8.

Der Leasinggeber ist für den Transport der Anlagen an den Einsatzort (Wandlungsobjektkosten), die Integration der Komponenten in den Montagearbeitsplatz sowie die Inbetriebnahme der Ressourcen und das Anlaufen der Produktion verantwortlich (direkte Wandlungskosten) – siehe Abbildung 4.5, vgl. Fleschutz (2010, S.163f) und Stähr (2020, S.12). Indirekte Wandlungskosten können bspw. durch den Stillstand der Ressourcen während der Rekonfiguration und Inbetriebnahme entstehen.

4.3 Bewertungs- und Optimierungskriterien

Beurteilungskriterien eines Montagesystems existieren in vielfältiger Form (Eversheim 1986, S.793; Eversheim 1989, S.296f; Konold & Reger 2009, S.136f; Witte et al. 2013, S.326). Klassischerweise werden die Kriterien Technologie, Organisation, Wirtschaftlichkeit und



Abbildung 4.5: Illustration der Kostenrechnung im Leasingmodell für Produktionsressourcen

Personal betrachtet – vgl. Abbildung 4.6.

Müller (2013, S.704) definiert Zielsetzungen der Systemgestaltung anhand der Kategorien organisatorische Ziele, Kostenziele, Leistungsziele, Qualitätsziele und personelle Ziele. Diese können wiederum auch als Kriterien einer Systemoptimierung definiert werden.

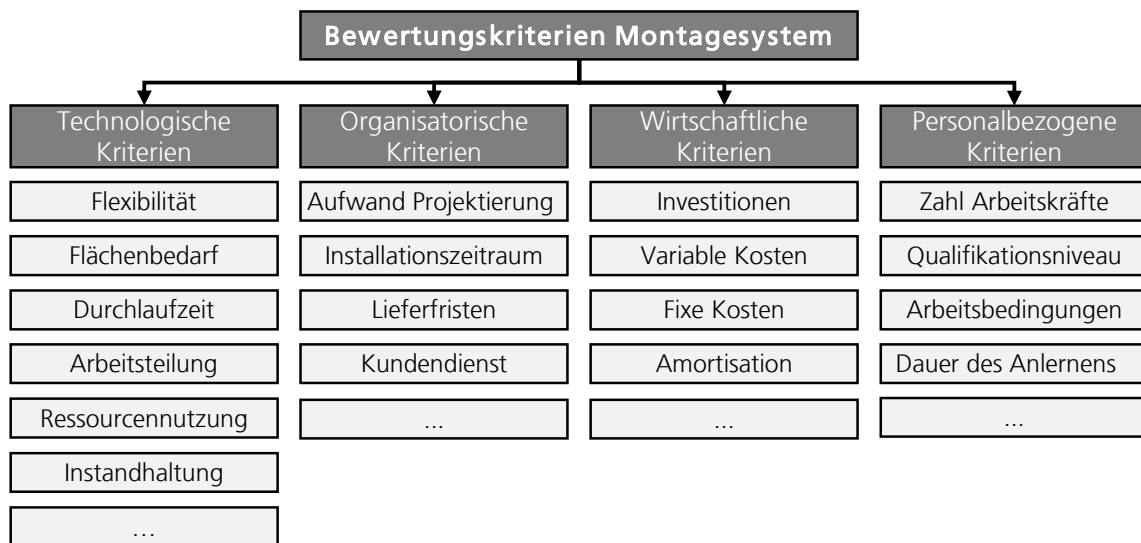


Abbildung 4.6: Bewertungskriterien für Montagesysteme (Eversheim 1989)

Die quantitative Bewertung einzelner PPR-Tripel sowie die übergreifende Bewertung der Menge an PPR-Tripeln eines Montagearbeitsplatzes stellen die Grundlage der Bewertung dar. Es ist ausdrücklich erwünscht, dass der Planer durch Gewichtung der mitunter konkurrierenden Kriterien- und Zielgrößen, das Optimierungsergebnis beeinflussen kann. Dadurch sollen unterschiedliche Systemausprägungen und Lösungsalternativen ermöglicht werden.

4.3.1 Identifikation und Definition der Optimierungskriterien

Die Optimierung des Systementwurfs eines Montagearbeitsplatzes beschäftigt sich mit zwei parallelen Bewertungs- und Optimierungssträngen. Einerseits die Identifikation von Ressourcen und die Optimierung der Allokation, bezogen auf die Anforderungen und Randbedingungen der Montageaufgabe. Hierbei stehen die technischen Fähigkeiten im Mittelpunkt. Andererseits die Optimierung des Montagearbeitsplatzes über das Zusammenspiel mehrerer Ressourcen in einer übergreifenden Systemlösung und die dabei auftretenden gegenseitigen Beeinflussungen. Die Kriterien orientieren sich in diesem Fall verstärkt an betriebswirtschaftlichen und produktionstechnischen Leistungskennwerten.

Eine Übersicht der betrachteten Bewertungskriterien kann Tabelle 4.1 entnommen werden. Die Einteilung der Kriterien erfolgt i.A.a. Abbildung 4.6 und Eversheim (1981, S.262). Tabelle 4.1 gibt einen Anhaltspunkt über die Eignung der Kriterien zur Bewertung individueller PPR-Tripel der Systemlösung eines Montagearbeitsplatzes. Die von Müller (2013, S.704) genannten Ziele der Leistungsfähigkeit und Kosten eines Montagesystems werden unter den wirtschaftlichen Kriterien zusammengefasst.

Mögliche Ziele der Prozessqualität und -sicherheit können im Zuge der Grobplanung eines Montagearbeitsplatzes nicht abgeschätzt werden und sind daher in Tabelle 4.1 nicht berücksichtigt. Sollten jedoch Zusatzinformationen hierzu aufgrund von Erfahrungswissen oder vergleichbaren Prozesse vorliegen, so können diese Parameter berücksichtigt werden. Dies gilt ebenso für organisatorische Kriterien.

Aufgrund der Vereinfachung der Modellierung der Ressource Mensch sind personalbezogene Kriterien nicht anwendbar. Es wird immer von einem generischen Modell des Menschen ausgegangen.

Die Zielkriterien der Prozesszeit sowie der Investitionskosten eignen sich nur bedingt zur Anwendung auf einzelne PPR-Tripel. Im Fall der Bewertung der Prozesszeit eines PPR-Tripels ist die Aussagekraft der Einzelzeit ohne Berücksichtigung der Reihenfolgenplanung nicht zielführend. Das Potential möglicher Parallelisierungen von Prozessen und deren Einfluss auf die übergreifende Taktzeit kann daher erst im übergreifenden Gesamtsystem bewertet werden. Vergleichbare Annahmen gelten für die Betrachtung der Investitionskosten je PPR-Tripel. Der Vollständigkeit halber sind diese Optionen aufgeführt, in Tabelle 4.1 aber nur als »teilweise geeignet« abgebildet.

Tabelle 4.1: Bewertungskriterien hybrider Montagearbeitsplätze und ihre Eignung hinsichtlich Einzelressourcen (PPR-Tripel) und Montagearbeitsplätze

	PPR-Tripel	Montagearbeitsplätze
Technologische Kriterien		
Technische Eignung	●	◐
Ressourcenstückliste	○	●
Prozesszeit	◐	○
Taktzeit	○	●
Montagewirkungsgrad	○	●
Ressourcennutzung (insb. Auslastung Mensch)	○	●
Stetigkeit der Verrichtung	○	●
Organisatorische Kriterien		
<i>keine Kriterien identifiziert</i>		
Wirtschaftliche Kriterien		
Montagekosten	○	●
Investitionskosten	◐	◐
Personalbezogene Kriterien		
<i>keine Kriterien identifiziert</i>		

Legende: ●: geeignet, ◐: teilweise geeignet, ○: nicht geeignet

4.3.2 Kriterien zur Bewertung von PPR-Tripeln

Im Mittelpunkt der Bewertung der PPR-Tripel steht die Erfüllung technischer Anforderungen, auch »technische Eignung« genannt. Es gilt, ungeeignete oder technisch schlechte Lösungen im Schritt der Ressourcenallokation zu identifizieren und auszusortieren.

Aus eigener Erfahrung kann festgehalten werden, dass eine manuelle Auswahl und Allokation von Ressourcen oftmals von persönlichen Erfahrungen und Vorlieben getrieben ist. Weiterhin zielt die Natur des Menschen stets auf Risikovermeidung ab (risikoaverses Entscheidungsverhalten), was üblicherweise eine Reproduktion bekannter Lösungen bedingt. Die technischen Rahmenbedingungen der Montageaufgabe werden daher potentiell unzureichend analysiert und Ressourcen zu großzügig ausgelegt. Hentsch et al. (2013, S.274) bestätigen diesen Punkt und betonen, dass bei der Auswahl der Ressourcen eine Überdimensionierung zu vermeiden ist, die sich in Zusatzkosten widerspiegelt.

Die »Prozesszeit« einer Ressource kann für jedes PPR-Tripel individuell abgeschätzt werden. Die Handhabungszeiten des Menschen orientieren sich dabei an den Normzeitwerten der MTM-Methode, während die Handhabungszeiten des Roboters aus den Tabellenwerten der RTM-Betrachtung ermittelt werden.

Unterschiede zwischen manueller und automatischer Handhabung ergeben sich, insbesondere für kurze Wegstrecken, da neben der absoluten Bewegungslänge die Anzahl der Bahnsegmente einer Robotertrajektorie sowie zusätzliche Stopp-Befehle in die Berechnung der RTM einfließen. Die Normzeitwerte der verbleibenden Montageprozesse (Zeitabschätzungen der Füge- oder Vereinzlungsressourcen) stammen aus Datenblättern der jeweiligen Ressource.

Als weiteres Kriterium wird die Berechnung der »Investitionskosten« eines PPR-Tripels betrachtet. Das Kriterium wird als ungeeignet angesehen, da es absolute Zahlenwerte miteinander vergleicht. Eine gegenseitige Beeinflussung der PPR-Tripel und potentielle Synergien im Montagearbeitsplatz werden dabei nicht berücksichtigt. Aussagen zu realen Bedarfen im fertigen Montagearbeitsplatz und dem Zusammenspiel aller Komponenten sind nur schwierig abzuleiten. Von einer Nutzung des Kriteriums in der Bewertung der PPR-Tripel wird daher abgesehen.

4.3.3 Kriterien zur Bewertung von Montagearbeitsplätzen

Die »technische Eignung« kann als Maß zur Bewertung der Gesamtmenge eingesetzter Ressourcen einer Arbeitsstation herangezogen werden. Hierbei gilt es, den mittleren Eignungsgrad über alle verwendeten Ressourcen zu bestimmen und mit den Ergebnissen alternativer Systemlösungen zu vergleichen.

Die Untersuchung der »Ressourcenstückliste« erfolgt vor dem Hintergrund einer vereinfachten Bewertung der Komplexität des Systementwurfs. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit einer steigenden Anzahl an zu integrierenden Ressourcen die Komplexität der Inbetriebnahme und der Aufwand des Betriebs steigen werden. Schlanke Systemlösungen mit wenigen Ressourcen, die alle Anforderungen der Produktionsaufgabe erfüllen, werden daher bevorzugt.

Die »Taktzeit« behandelt die Gesamtzeit nach Reihenfolgenplanung vom Start des ersten bis zum Ende des letzten Montageschritts. Je nach Ressourcenkombination des hybriden Montagearbeitsplatzes können dabei mehr oder weniger Montageschritte parallelisiert werden. Aus Gründen der Produktivität ist eine kurze Taktzeit anzustreben.

Der »Montagewirkungsgrad« behandelt das Verhältnis von Primär- zu Sekundärvorgängen des Montageprozesses (Lotter 2012a, S.49f). Alle Prozesse, die der Vervollständigung des Produkts und somit der Wertschöpfung der Montage dienen, zählen zu den Primärvorgängen. Es gilt, den Anteil primärer Wertschöpfungsprozesse zu maximieren und den Zeitanteil sekundärer Prozesse zu reduzieren.

Das Kriterium der »Ressourcennutzung« vergleicht den aktiven Zeitanteil einer Ressource mit der Taktzeit des Montagearbeitsplatzes. Ein gutes Beispiel für die Nutzung dieses Kriteriums stellt die Auslastung der Ressource Mensch dar. Aufgrund hoher variabler Kosten des Menschen im hybriden Produktionssystem, gilt es, die Leerlaufzeiten der Ressource Mensch zu minimieren ohne ihn gleichzeitig zu überlasten.

Die »Stetigkeit der Verrichtung der Montageschritte« im Montageprozess ist ein Bewertungskriterium der Qualität der Interaktion zwischen Mensch und Roboter. Es gilt, möglichst selten zwischen einer Verrichtung auf Seiten Mensch und Roboter hin und her zu wechseln. Diese Wechsel könnten zu einer Unterbrechung des Arbeitsflusses führen, der mit einer niedrigeren Produktivität und einer höheren Fehlerwahrscheinlichkeit im Montageprozess einhergeht.

Die Berechnung der »Montagekosten« betrachtet die Aggregation der variablen Kosten aller Ressourcen für die Dauer der Montage einer definierten Losgröße unter Berücksichtigung potentieller Wandlungs- und Inbetriebnahmekosten im Falle einer Rekonfiguration. Die Kostensätze der Ressourcen basieren auf Maschinenstundensätzen im Leasingmodell. Im Gegensatz zur Betrachtung aggregierter »Investitionskosten an Einzelressourcen« erlaubt diese Kostenrechnung den direkten Vergleich alternativer Systementwürfe für die Dauer der Montage.

5 Methode der optimierten Planung

In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Schritte der Methode unter den getroffenen Annahmen und Einschränkungen aus Kapitel 4 näher beschrieben. Nach der Definition aus Kapitel 2.1 besteht eine Methode aus den Bestandteilen Vorgehensmodellierung, Datenmodellierung und zugehörige Werkzeuge. Abbildung 5.1 illustriert die verwendeten Bausteine, die in diesem Kapitel ausführlich beschrieben werden.

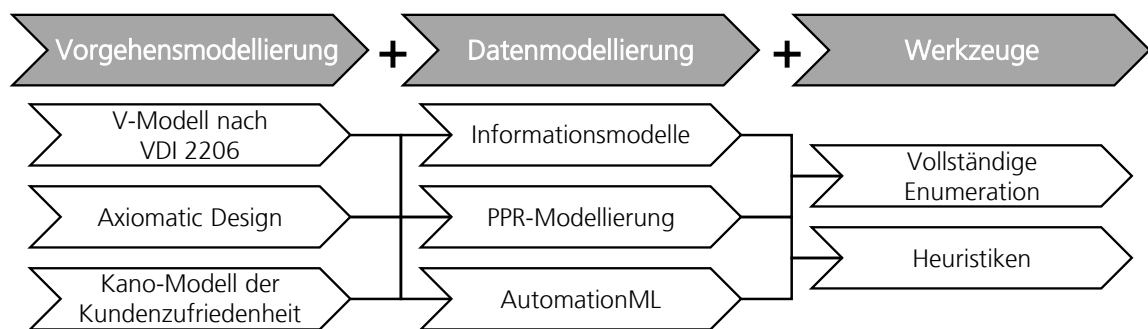


Abbildung 5.1: Visualisierung der Einzelbausteine der verwendeten Methode unter Berücksichtigung der Definition aus Kapitel 2.1

Die Methode orientiert sich an der Vorgehensmodellierung der VDI 2206 (S.26f) und der darin beschriebenen Zerlegung des Problems in individuelle Teillösungen mit sukzessiver Integration dieser Einzellösungen und deren Eigenschaftsabsicherung. Zur quantitativen Bewertung alternativer Systemlösungen und der Priorisierung konkurrierender Ziele bezieht sich die Methode auf die Berechnung des Informationsaxioms nach dem Axiomatic Design (Suh 2001, S.67f) und dem Kano-Modell der Kundenzufriedenheit (Sauerwein et al. 1996). Die Strukturierung der Datenmodellierung entspricht den Vorgaben der PPR-Modellierung der digitalen Fabrik. Die Beschreibung technisch möglicher Ressourcen für den Anwendungsfall hybrider Montagearbeitsplätze erfolgt durch Informationsmodelle in Form von Ontologien. Die Einbindung und Nutzung des AutomationML-Datenaustauschformats erlaubt eine Dateninteroperabilität über den Schritt der Grobplanung des Systementwurfs hinaus. Zur Optimierung der Lösungsalternativen kommen Heuristiken und Verfahren der vollständigen Enumeration zum Einsatz.

Das Vorgehen adressiert gleichermaßen die Greenfield-, wie auch die Brownfield-Planung von Montagearbeitsplätzen (VDI 5200 Blatt 4). Die zu entwickelnde Methode unterstützt den Planer bei der Auslegung und Optimierung im Schritt des Grobentwurfs eines hybriden Montagearbeitsplatzes. Durch Automatisierung der Auswahl- und Entscheidungsprozesse sollen in kurzer Zeit mehrere alternative Systemlösungen generiert und quantitativ miteinander verglichen werden.

5.1 Detaillierte Beschreibung des Planungsablaufs

Abbildung 5.2 illustriert das Vorgehen. In einer ersten Phase des Systementwurfs erfolgt der Import der Produkt- und Prozessinformationen sowie die Spezifikation der Rand- und Umweltbedingungen über das AutomationML-Datenformat. Anhand dieser Daten erfolgt die Identifikation technischer Ressourcen der gegebenen Montageaufgabe. Diesem Schritt schließt sich eine zweite Phase der Systemintegration an, bei der alternative Systemlösungen generiert werden und eine iterative, multikriterielle Optimierung der Eigenschaften des Systementwurfs stattfindet. Die so gewonnenen Ergebnisse können abschließend exportiert und nachfolgenden Planungsschritten wie bspw. der Feinplanung und Realisierung (vgl. Abbildung 2.9) übergeben werden.

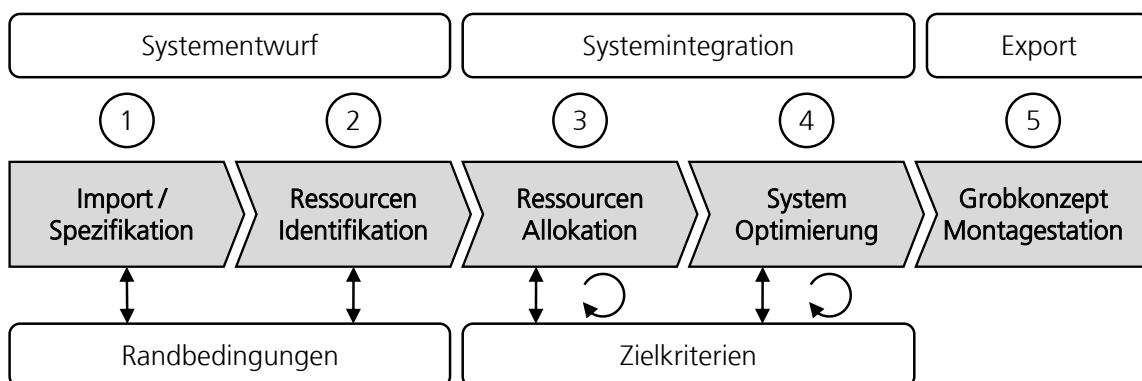


Abbildung 5.2: Vorgehen der automatischen Generierung hybrider Montagearbeitsplätze

In einem ersten Schritt erfolgt die Instanziierung der Optimierungsaufgabe durch Importieren der AML-Datei. Diese bildet bereits die hierarchische Struktur des Montagearbeitsplatzes in Form der PPR-Modellierung ab. Durch Eingabe und Spezifikation der Rand- und Umweltbedingungen der Montageaufgabe definiert der Planer die Ausgangssituation der

Optimierung. Die zu verrichtenden Montageschritte mitsamt Operationen sind in der AML-Datei bereits definiert und auf die betreffenden Einzelteile und die Baugruppe referenziert. Zwischen den einzelnen Montageschritten sind Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen definiert, die für die Sequenzierung der Prozessschritte herangezogen werden können.

In einem zweiten Schritt erfolgt die Identifikation der technisch möglichen Ressourcen. Hierbei werden für jeden Montageschritt die technischen Einzelressourcen und Ressourcenkombinationen ermittelt und hinsichtlich ihrer Eignung im Anwendungsfall bewertet. Die so gewonnenen PPR-Tripel dienen im weiteren Verlauf der Optimierung als Funktionsbausteine der Systemintegration eines Montagearbeitsplatzes.

Im Zuge der Systemintegration und Generierung alternativer Lösungen wird jedem Montageschritt der Montageaufgabe ein PPR-Tripel zugewiesen. Durch diesen Schritt, der sogenannten Ressourcenallokation, entstehen die unterschiedlichen Systemlösungen. Die Ziele des Planers spiegeln sich in den Ausschlusskriterien und der multikriteriellen Optimierungsfunktion wider, die zur quantitativen Bewertung der Eigenschaften der Systemlösung herangezogen wird.

In einem iterativen Prozess werden die PPR-Tripel nachfolgend rekombiniert, um das Ergebnis der Systemlösung zu optimieren und neue, alternative Lösungen zu ermitteln. Um eine Differenzierung der Beeinflussung einzelner Kriterien abbilden zu können, wird auf das Kano-Modell der Kundenzufriedenheit zurückgegriffen, das die Kriterien entsprechend den Vorgaben des Planers berücksichtigt.

Bei zufriedenstellendem Ergebnis kann der Systementwurf in einem fünften Schritt exportiert werden. Dabei wird die gewonnene Ressourcenkonfiguration mit den Montageschritten verknüpft, so dass eine eindeutige Beziehung zwischen den zu montierenden Produkten, den dafür benötigten Montageschritten und der optimierten Ressourcenauswahl angegeben werden kann. Sollte das Ergebnis ungenügend sein, kann eine neue Iteration mit geänderten Randbedingungen, Gewichtungen oder Beeinflussungsfaktoren der Optimierungsfunktion gestartet werden. Hierfür springt der Planer in den dritten Schritt zurück und startet eine neue Systemintegration.

Der Gesamtablauf der Optimierung orientiert sich am Vorgehen der VDI 2206. Durch das mehrfache Durchlaufen des V-Zyklus aus Systementwurf, Systemintegration und kontinuierlicher Eigenschaftsabsicherung ergibt sich ein iteratives Vorgehen aus Vorbereitung,

Grobplanung, Feinplanung und Realisierung, das in Abbildung 5.3 dargestellt ist (VDI 2206, S.44). Die im Fokus stehende Phase der Grobplanung ist in Abbildung 5.3 dunkel hervorgehoben.

Die ersten beiden Schritte nach Abbildung 5.2 beschreiben dabei die Planung des Produktionsprinzips (absteigender Ast des V-Modells) und definieren den domänenspezifischen Entwurf, während die Schritte drei und vier die Systemintegration und Planung der Technologieketten (aufsteigender Ast des V-Modells) definieren.

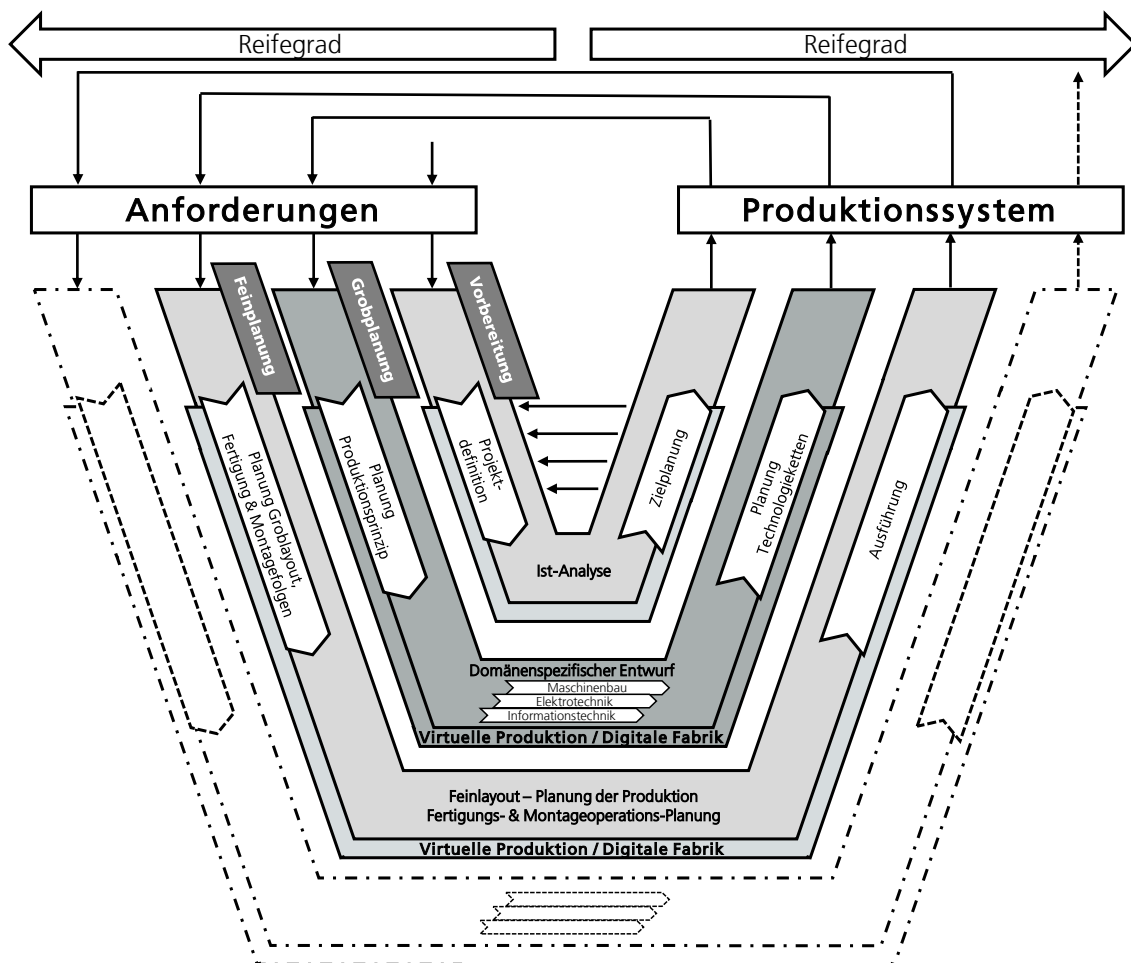


Abbildung 5.3: V-Modell der VDI 2206 für den Entwurf mechatronischer Produktionssysteme (VDI 2206, S.44)

Abbildung 5.4 illustriert die Einzelschritte der Grobplanung hybrider Montagearbeitsplätze und detailliert das Vorgehen aus Abbildung 5.2. Die Schritte orientieren sich dabei am Planungsvorgehen der Grobplanung nach Lotter (1992), das in Abbildung 2.9 dargestellt ist. Deutlich wird der iterative Charakter der Methode und die Möglichkeiten der manuellen

Beeinflussung durch den Planer, sei es durch die Definition der Randbedingungen und Optimierungskriterien, wie auch die Möglichkeit einzelne Ressourcen im Nachgang manuell zu ändern.

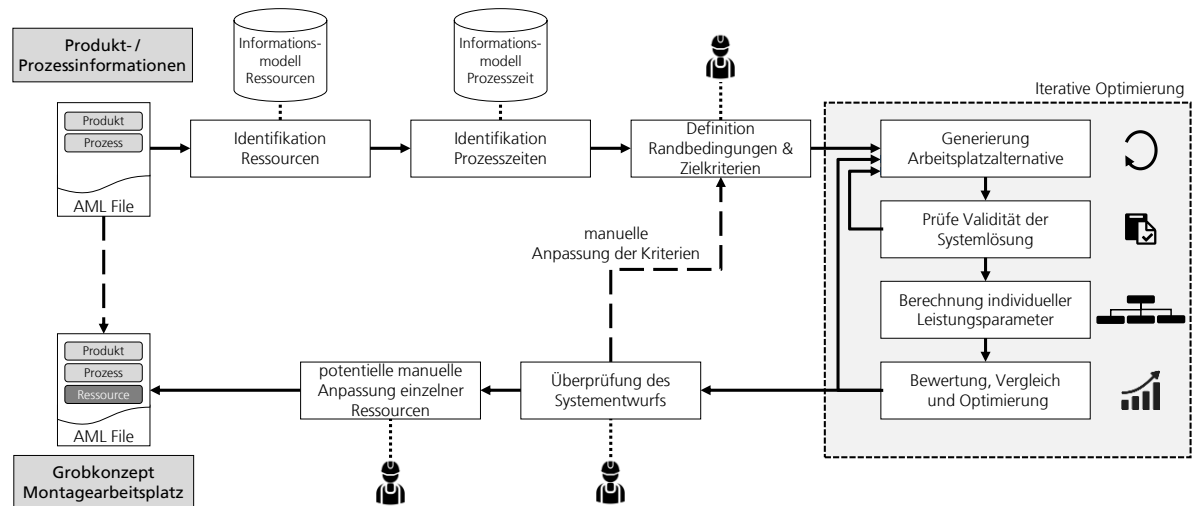


Abbildung 5.4: Übersichtsbild der Methode der automatisierten Grobplanung hybrider Montagearbeitsplätze

5.2 Modellierung und Datenaustausch

Die technischen Ressourcen der hybriden Montage sowie Normzeitwerte der Handhabungsschritte von Mensch (MTM) und Roboter (RTM) werden als Informationsmodell in Form einer Ontologie gespeichert. Dies hat den Vorteil, dass die Struktur der Wissensrepräsentation zu einem späteren Zeitpunkt bedarfsgerecht erweitert oder angepasst werden kann. Zur Modellierung der Ontologien wird die Web Ontology Language (OWL) verwendet. Der Aufbau der Ressourcenontologie orientiert sich an der hierarchischen Ressourcenstruktur i.A.a. Müller (2013, S.705) und ist in Abbildung 5.5 exemplarisch abgebildet.

Sollte ein einzelnes Ressourcenobjekt nicht in der Lage sein, die Anforderungen aus Produkt und Prozess unter den gegebenen Rand- und Umweltbedingungen vollständig zu erfüllen, so sind auch Kombinationen an Ressourcen möglich. Diese setzen sich aus maximal zwei Ressourcen zusammen und beinhalten immer eine Manipulationsressource vom Typ Mensch oder Roboter. Solche Kombination sind in Abbildung 5.5 grafisch dargestellt und können bspw. zwischen einer Manipulationsressource und einer Fügerrsource

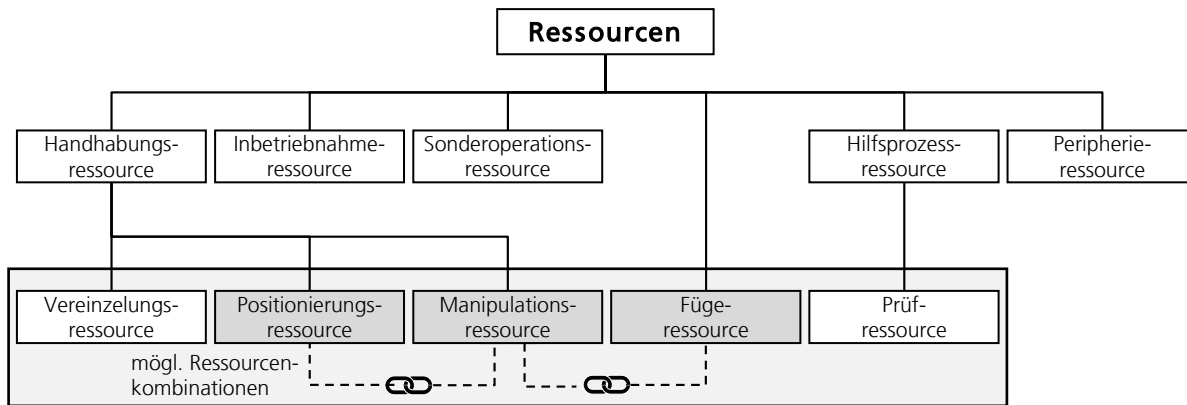


Abbildung 5.5: Hierarchie der am Montagevorgang beteiligten Ressourcen inkl. Andeutung möglicher Ressourcenkombinationen, eigene Darstellung i.A.a. Müller (2013, S.705)

(bspw. Schraub-, Nietwerkzeug), wie auch einer Handhabungs-/ Positionierressource (bspw. mechanischer Greifer, Spanner) realisiert werden.

5.3 Ressourcenallokation auf Prozessschritte

Im Rahmen der Ressourcenallokation hybrider Montagearbeitsplätze gilt es, valide Lösungen an Ressourcen(-kombinationen) zu identifizieren, um das Produkt mit geringem Betriebsmitelaufwand und optimierter Arbeitsteilung zu montieren und in Betrieb zu nehmen (Müller 2013, S.713).

Zur Verringerung der Komplexität und unter der Annahme, dass eine weitere Unterteilung der Prozessschritte keinen Mehrwert für die Planung hybrider Montagearbeitsplätze in der Phase der Grobplanung bieten würde, findet die Ressourcenallokation auf Ebene der »Montageschritte¹⁰« statt. Die Hierarchie der Montageprozesse kann Abbildung 5.6 entnommen werden. Diese orientiert sich in der Struktur an der Klassifizierung der Ressourcen nach Abbildung 5.5. Namentlich zu nennen sind die Montageschritte des Handhabens, Fügens, Inbetriebnehmens, sowie der Hilfsprozesse und Sonderoperationen, wie sie auch bei Müller (2013, S.705) erwähnt werden.

Die Gesamtheit der Anforderungen an eine Ressource ergeben sich aus den Attributen der Produktbeschreibung, den Parametern der Prozessdefinition sowie den globalen Rand- und Umweltbedingungen der Montageaufgabe. Jeder Montageschritt lässt sich nach

¹⁰Zur Einordnung der unterschiedlichen Prozessebenen sei auf Abbildung 2.12 und die Unterteilung eines Montageauftrags in Montageschritte verwiesen.

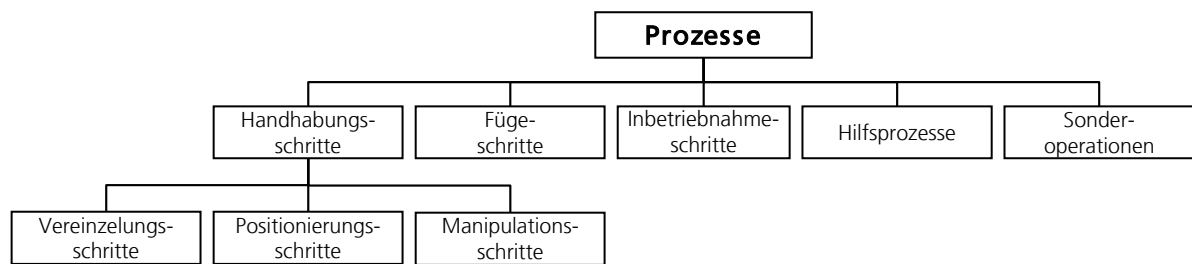


Abbildung 5.6: Hierarchie der am Montagevorgang beteiligten Montageschritte i.A.a. Müller (2013, S.705)

Abbildung 2.12 durch Aggregation einzelner Montageoperationen beschreiben. Im Schritt der Ressourcenallokation gilt es daher, Ressourcen oder Ressourcenkombinationen zu identifizieren, die der Summe aller funktionalen Anforderungen der Montageoperationen eines Montageschritts entsprechen.

Das prinzipielle Vorgehen ist in Abbildung 5.7 dargestellt und resultiert in einem PPR-Tripel eines Montageprozesses (vgl. Kapitel 4.1.4). Beispielhaft bedeutet dies, dass die Ressource Mensch einem Fügeschritt des Montageumfangs einer Baugruppe zugeordnet wird. Dieser Fügeschritt kann ohne zusätzliches Werkzeug (bspw. einstecken, einschieben) oder in Verbindung mit einem Werkzeug (bspw. schrauben, nieten) durchgeführt werden, wonach sich eine Einzelressource »Mensch« oder eine Ressourcenkombination »Mensch & Werkzeug« für diesen Montageschritt ergibt.

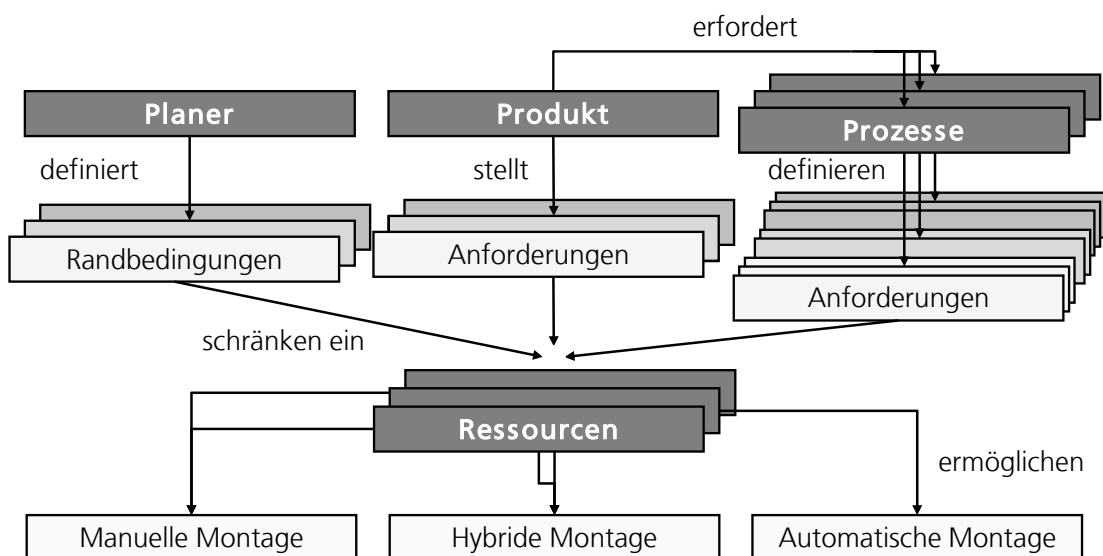


Abbildung 5.7: Vorgehen der Ressourcenallokation zur Generierung eines PPR-Tripels aus Produkt- und Prozessinformationen sowie den Randbedingungen der Montageaufgabe

Die Ressourcen in den Montageschritten des Handhabens (Vereinzeln, Handhaben, Positionieren) und Fügens definieren die Ausprägung des hybriden Montagearbeitsplatzes. Die Manipulationsressourcen geben an, ob ein Montageschritt manuell oder automatisch verrichtet wird. Sie stellen somit das zentrale Element der Definition der Arbeitsteilung dar. Die meisten Montageschritte können ohne die Definition einer Manipulationsressource nicht oder nur eingeschränkt ausgeführt werden. Ausnahmen hiervon existieren und betreffen bspw. den Montageschritt der Vereinzelung oder Manipulation symmetrischer Kleinteile. Diese können im Falle der Fügehilfsmittel (bspw. Schrauben) auch unmittelbar über Vibration vereinzelt und Druckluft gefördert werden (Weck et al. 1999, S.10-18).

5.4 Spezifizierung des Optimierungsproblems

Das nachfolgende Unterkapitel behandelt die Klassifizierung des Optimierungsproblems und greift die Grundlagen aus Kapitel 3.3 für das flexible Arbeitsvorbereitungsproblem auf.

5.4.1 Einordnung und Klassifizierung

Das Ziel ist die Optimierung der Systemeigenschaften eines hybriden Montagearbeitsplatzes durch Ressourcenauswahl bzgl. einer Menge mitunter konkurrierender Optimierungskriterien aus Abschnitt 4.3. Beumelburg (2005, S.73) bezeichnet die Generierung hybrider Arbeitsstationen als flexibles Arbeitsvorbereitungsproblem (Flexible-Job-Shop-Scheduling-Problem, FJSSP), in dem sich die Reihenfolge der Montageschritte aus der Zuordnung der Ressourcen ergibt. Hinzu kommt eine Abhängigkeit der Reihenfolge der Montageschritte, die durch die Produktstruktur und den Montagevorranggraphen definiert ist. Je nach Ressourcenauswahl sind unterschiedliche Reihenfolgen, potentielle Parallelisierungen und somit auch unterschiedliche Taktzeiten denkbar.

Im Sinne des FJSSP kann die Aufgabenstellung als diskretes Dispositionsproblem paralleler Ressourcen mit unterschiedlichen Fähigkeiten für eine diskrete Menge an Montageaufgaben betrachtet werden (Ruiz 2019, S.6). Die technisch möglichen Ressourcen sollen auf die auszuführenden Prozessschritte einer Montageaufgabe verteilt und hinsichtlich der Zielkriterien aus Kapitel 4.3 optimiert werden. Nach Lenstra et al. (1977, S.347f) kann das Optimierungsproblem in der Kurzform nach Gleichung 5.1 notiert werden.

$$n/m/l, \lambda/\kappa \quad (5.1)$$

Die Anzahl der Montageschritte n und der möglichen Ressourcen m stellen ganze Zahlen dar. l beschreibt den zugrundeliegenden Dispositionstyp, der im Falle unabhängiger paralleler Maschinen nach Lenstra et al. den Wert R annimmt. λ beschreibt zusätzliche Parameter, die bei der Optimierung berücksichtigt werden müssen, und gibt im vorliegenden Fall die Nebenbedingung der Reihenfolge der Montageprozesse wieder. κ charakterisiert das Optimierungskriterium, im vorliegenden Fall die Zielfunktion. Da es sich um eine multikriterielle Optimierung handelt, folgt der Ansatz einer gewichteten Summe über die Kriterien $k_i \in K$. Das Optimierungsproblem ergibt sich somit nach Gleichung 5.1 zu:

$$n/m/R, prec / \sum_{i=1}^K w_i k_i \quad (5.2)$$

Das Optimierungsproblem ist aufgrund der hohen Zahl an Freiheitsgraden und des exponentiellen Wachstums des Lösungsraums aufgrund der Ressourcenmenge und Prozessschritte nicht, oder zumindest nicht zufriedenstellend, in deterministischer Polynomialzeit lösbar. Weiterhin besitzt das Problem durch die vorhergehende Ressourcenauswahl und nachfolgende Sequenzbildung (vgl. Abbildung 5.2) einen diskreten Charakter, wodurch eine topologische Struktur des Lösungsraums fehlt. Ableitungskonzepte können daher nicht genutzt werden (Gröll 2018, S.907). Aus diesen Annahmen folgt, dass das vorliegende Optimierungsproblem der Klasse der NP-schweren Optimierungsprobleme zugeordnet werden kann.

Für das FJSSP unter den Randbedingungen einer hybriden Montage können folgende Eigenschaften definiert werden:

- Es handelt sich um ein **kombinatorisches Optimierungsproblem** auf einem endlichen, diskreten Lösungsraum. D.h. es gibt endlich viele Lösungsalternativen und die Entscheidungsvariablen besitzen diskrete Wertebereiche.
- Das Problem hat **dualen Charakter**. Den Montageschritten werden zuerst Ressourcen (Allokation) zugeordnet und nachfolgend Operationsreihenfolgen gebildet (Scheduling), die dann im Verbund bewertet und optimiert werden.

- Die Probleme der Identifikation und Allokation von Ressourcen zu Montageschritten und der nachfolgenden Sequenzierung sind einer Vielzahl an **Rand- und Umweltbedingungen** unterworfen. Diese sind technologischer und organisatorischer Natur und können bei Bedarf relaxiert werden.

5.4.2 Modellannahmen

Zur Vereinfachung wird in der Beschreibung der Modellannahmen generisch von »Ressource« gesprochen. Dies gilt für Einzelressourcen, wie auch Ressourcenkombinationen. Für das FJSSP können folgende Modellannahmen getroffen werden:

- (I) Ein Montageauftrag J beinhaltet eine Anzahl b auszuführender Montageprozesse P , die auf einem Montagearbeitsplatz ausgeführt werden. Die Verrichtung eines Montageauftrags auf mehreren Montagearbeitsplätzen inkl. Verkettung der Stationen findet aus diesem Grund keine Berücksichtigung.
- (II) Innerhalb eines Montageprozesses P existiert eine Anzahl n unabhängiger Montageschritte t_i einer gegebenen diskreten Indexmenge I mit $i \in I$ und $I = \{1 \dots n\}$.
- (III) Jeder Montageschritt t_i besteht aus einer oder mehreren Operationen O_{ij} mit $j = 1 \dots n_i$, wobei n_i die Anzahl der Operationen je Montageschritt darstellt. Die Reihenfolge der Operationen eines Montageschritts ist für die Reihenfolgenbildung hybrider Montagearbeitsplätze im vorliegenden Optimierungsproblem irrelevant.
- (IV) Jedem Montageschritt t_i kann eine Teilmenge m_i alternativer Ressourcen k aus der Menge aller bekannten Ressourcen zugeordnet werden. Alle Ressourcen dieser Teilmenge erfüllen jeweils individuell die Summe aller Anforderungen der zugrundeliegenden Montageoperationen.
- (V) Die Gesamtmenge möglicher Ressourcen M eines Montageprozesses P kann als Vereinigung der Einzelmengen $M = \bigcup_{i=1}^I m_i$ über alle Montageschritte t_i betrachtet werden.

- (VI) Die Eigenschaften e_i^k einer spezifischen Ressource k können quantifiziert werden. Zum Beispiel wird die Prozessdauer eines Prozesses auf der k -ten Ressource als p_i^k bezeichnet.
- (VII) Umrüstzeiten und -aufwände werden in der Reihenfolgenbildung nicht berücksichtigt.
- (VIII) Einmal begonnene Montageschritte t_i können nicht unterbrochen werden (non-preemption condition).
- (IX) Eine Ressource k kann maximal einen Montageschritt t_i je Zeiteinheit verrichten (no-overlap condition).
- (X) Einer Ressource k kann mehr als ein Montageschritt t_i eines Montageprozesses P zugewiesen werden.

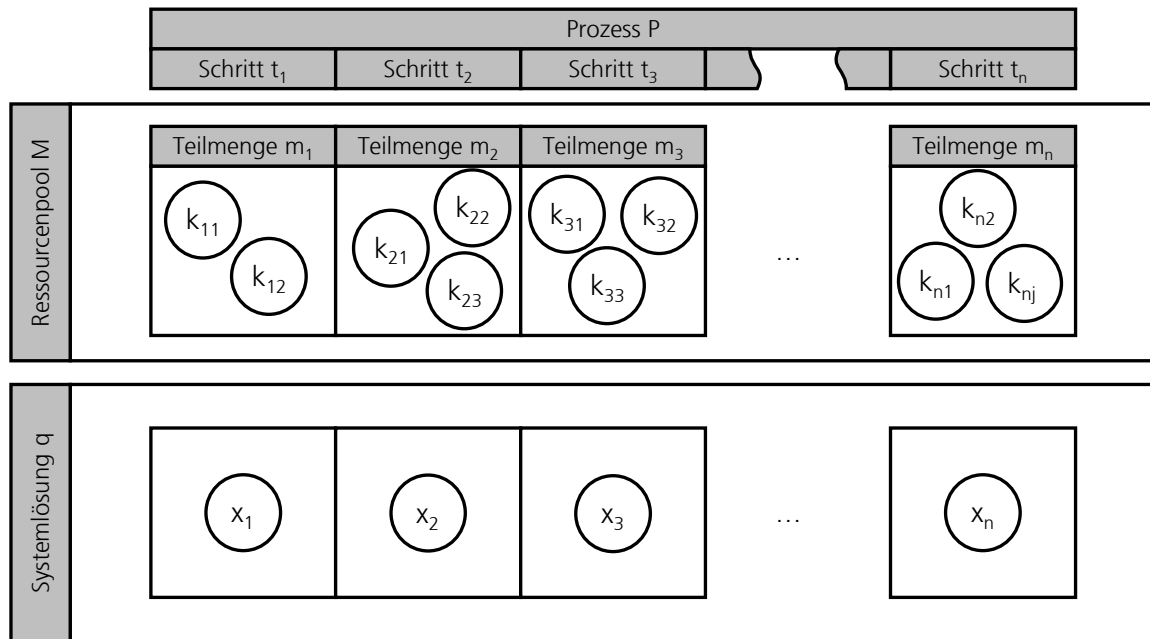
5.4.3 Mathematische Formulierung

Im Vergleich zum statischen Arbeitsvorbereitungsproblem (Job-Shop-Scheduling-Problem, JSSP) wird beim flexiblen Arbeitsvorbereitungsproblem (FJSSP) die Problemstruktur um die Berücksichtigung alternativer Ressourcen je Montageschritt erweitert. Abbildung 5.8 illustriert die Zusammenhänge der mathematischen Formulierung anhand der Ressourcenauswahlentscheidung je Montageschritt t_i aus einer Menge m_i potentieller Ressourcen. Es gilt, eine Ressource $k_{ij} \in m_i$ auszuwählen und hinsichtlich der Anforderungen aus Produkt, Prozess und Randbedingungen des Montageschritts t_i quantitativ zu bewerten.

Ist die Zuordnung einer Ressource auf einen Montageschritt erfolgt, wird von einem PPR-Tripel x gesprochen (vgl. Abbildung 4.3). Eine potentielle Systemlösung des Montagearbeitsplatzes wird als eine Menge q an n PPR-Tripeln x beschrieben. Die (Re-)Kombination und der Tausch einzelner PPR-Tripel führt zur Optimierung der Eigenschaften der Systemlösung und somit zu alternativen Lösungen des Optimierungsproblems.

Variablen

Gegeben ist eine endliche Menge an Montageschritten T eines Prozesses P . Jedem Element $t_i \in T$ ist eine endliche Teilmenge m_i möglicher Ressourcen k_{ij} zugeordnet. Die Vereinigung



Legende: q: Systemlösung, t: Montageschritt, n: Menge der Montageschritte,
m: Ressourcenteilmenge, k: Ressource, x: PPR-Tripel

Abbildung 5.8: Grafische Darstellung der Auswahlentscheidung zur Generierung unterschiedlicher Systemlösungen für die Optimierung des FJSSP

aller Teilmengen m_i repräsentiert die Menge der technisch möglichen Ressourcen der Arbeitsstation $M = \cup\{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ – den sogenannten Ressourcenpool.

Ein PPR-Tripel x des Zuordnungsproblems ist aus dem Produktraum $T \times M$, wobei jedes Tripel $x_i \in (t_i, k_{ij})$ mit $k_{ij} \in m_i$ eine zulässige Allokation einer Ressource auf einen Montageschritt darstellt. Eine Systemlösung q besteht somit immer aus n PPR-Tripeln x .

$$q = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (5.3)$$

Die Gesamtheit der Lösungen E kann als die vollständige Kombination aller PPR-Tripel der Menge technisch möglicher Ressourcen M betrachtet werden, wobei o die endliche Anzahl unterschiedlicher Lösungen der Kombinatorik repräsentiert. Die Mächtigkeit der Lösungsmenge ($|E|$) wird dabei maßgeblich von der Menge potentieller Ressourcen $|M|$ definiert.

$$E = \{q_1, q_2, \dots, q_o\}, \quad o \in \mathbb{N} \quad (5.4)$$

Die Größe des kombinatorische Lösungsraums der Ressourcenallokation $|E^\mu|$ berechnet sich über die Mächtigkeit der Teilmengen m_i je Montageschritt t_i aus dem Produktraum $|T \times M|$ zu:

$$|E^\mu| = \prod_{i=1}^n |m_i| \quad (5.5)$$

μ repräsentiert den Index der Abbildung möglicher Ressourcen auf Montageschritte. Bei gegebener Allokation der Ressourcen, ohne Berücksichtigung der Präzedenz der Reihenfolge aus dem Montagevorranggraphen, berechnet sich die maximale Anzahl unterschiedlicher Montagesequenzen der Montageschritte $t_i \in T$ zu:

$$|E^\pi| = n! \quad (5.6)$$

π repräsentiert den Index der Permutationen über die Reihenfolge und $|E^\pi|$ beschreibt die Mächtigkeit der Menge unterschiedlicher Sequenzen der Montageschritte. Die Gesamtheit aller Lösungen E des FJSSP ergibt sich somit zu:

$$E = E^\mu \times E^\pi \quad (5.7)$$

Zur Eingrenzung der validen Systemlösungen als Teilmenge der Gesamtheit aller Lösungen E wird die Lösungsmenge Q eingeführt. Diese repräsentiert eine Teilmenge des Lösungsraums E . Alle Lösungen in Q erfüllen die Randbedingungen nach Kapitel 4.

v stellt in diesem Kontext die Menge aller validen Lösungen unter Berücksichtigung der Randbedingungen dar.

$$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_v\}, \quad v \leq o, \quad v \in \mathbb{N} \quad | \quad Q \subseteq E \quad (5.8)$$

Restriktionen der Reihenfolgenbildung

Ohne Beschränkungen der Allgemeinheit können die Montageschritte t_i mit ihren Startzeiten s_i und den Fertigstellungszeiten c_i beschrieben werden. Den Start- und Fertigstellungszeiten kann ein Definitionsbereich $D_i^{(s,c)}$ zwischen angedachtem Start und Ende H der Montage zugeordnet werden.

$$D_i^{(s,c)} = [0, H] \quad (5.9)$$

Für gewöhnlich wird H als ausreichend große Zahl oder unendlich angenommen ($H = \infty$). In einer ersten Abschätzung kann H als die Summe der maximalen Prozesszeiten p_i^{max} der einzelnen Montageschritte t_i definiert werden. Der Index gibt an, dass aus der Menge an Ressourcen m_i eines Montageschritts t_i , jeweils die Ressource ausgewählt wird, die die maximale Prozessdauer aufweist. Damit ergibt sich für die initiale Abschätzung des Planungshorizonts H die folgende Berechnungsvorschrift:

$$H = \sum_{i=1}^n p_i^{max} \quad (5.10)$$

Im Zuge der Reihenfolgenbildung lässt sich zwischen konjunktiven, den Vorrang betreffenden Restriktionen und kapazitiven oder disjunkten Restriktionen unterscheiden. Konjunktive Restriktionen geben die lineare Ablaufstruktur zwischen einzelnen Montageschritten t_i des Montageprozesses P wieder.

$$s_i + p_i \leq s_{i+1}, \quad 1 \leq i \leq n \quad (5.11)$$

Kapazitive Restriktionen schließen aus, dass zwei verschiedene Montageschritte t_i^k und t_h^k , die dieselbe Ressource k beanspruchen, gleichzeitig auf dieser verrichtet werden. t_h^k ist dabei der Vorgängerschritt von t_i^k auf Ressource k . Einmal begonnene Montageschritte können in diesem Fall nicht unterbrochen werden (non-preemption condition).

$$s_i^k + p_i^k \leq s_h^k, \quad 1 \leq i, \quad i < h, \quad h \leq n, \quad k \in m \quad (5.12)$$

Diese Restriktion lässt sich auch auf die Fertigstellungszeitpunkte anwenden. Für eine gültige Reihenfolgenbildung muss gelten:

$$c_i^k - p_i^k \geq c_{i-1}^k, \quad 1 \leq i \leq n \quad (5.13)$$

Weiterhin muss sichergestellt sein, dass zu jedem Zeitpunkt höchstens ein Montageschritt auf einer Ressource bearbeitet wird (no-overlap condition). Wieder wird angenommen,

dass Montageschritt t_i^k vor Montageschritt t_h^k auf Ressource k bearbeitet werden soll. Es gilt somit folgender Zusammenhang:

$$c_i^k \leq c_h^k - p_h^k, \quad 1 \leq i, \quad i < h, \quad h \leq n, \quad k \in m \quad (5.14)$$

Zielfunktion

Es gilt, die Optimierungsfunktion des Systementwurfs $F(q)$ für eine valide Systemlösung ($q \in Q$) unter den gegebenen Randbedingungen zu minimieren und eine optimierte Lösung q_{opt} zu identifizieren.

$$(P) : \begin{cases} \text{Minimize} & F(q) \\ \text{s.t.} & q \in Q, \quad Q \subseteq E \end{cases} \quad (5.15)$$

Nebenbedingung

Nach Kapitel 4 gilt, dass für die Generierung einer hybriden Systemlösung zwei Manipulationsressourcen ausgewählt werden müssen. Dies betrifft jeweils eine Ressource der Ressourcenklasse Mensch (K_H) und eine der Ressourcenklasse Roboter (K_R). Eine rein manuelle oder rein automatische Lösung der Handhabungsaufgabe wird als hybride Systemlösung nicht akzeptiert.

$$\{|K_H| \stackrel{!}{=} 1 \quad \wedge \quad |K_R| \stackrel{!}{=} 1\} \quad \forall \quad k \in q \quad (5.16)$$

Optimierungsaufgabe

Es gilt, die individuellen Eigenschaften einer Systemlösung in einem multikriteriellen Ansatz anhand der Optimierungsfunktion $F(q)$ zu minimieren. Die Eigenschaften einer Systemlösung setzen sich aus den individuellen Eigenschaften der ausgewählten PPR-Tripel und dem übergreifenden Zusammenspiel der PPR-Tripel des Montagearbeitsplatzes zusammen. Durch die selektive Auswahl und Rekombination der PPR-Tripel unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen kann die Optimierungsfunktion in einem multikriteriellen Bewertungsansatz optimiert werden.

Die PPR-Tripel x können dabei als elementare, eigenschaftsbildende Bausteine der Systemlösung q betrachtet werden:

$$x_{ij} = \{(t_i, k_{ij}) \mid k_{ij} \in m_i\}, \quad 1 \leq i \leq n, \quad 1 \leq j \leq |m_i| \quad (5.17)$$

Jedes PPR-Tripel besitzt aufgrund der Ressourcenauswahl im betrachteten Anwendungsfall individuelle Eigenschaften $e_i^{k_{ij}}$.

$$x_{ij} \rightarrow e_i^{k_{ij}} \quad (5.18)$$

Gleichung 5.19 beschreibt eine generische Systemlösung einer Arbeitsstation als Menge an PPR-Tripeln.

$$q = \{(t_1, k_1), (t_2, k_2), \dots, (t_n, k_n)\}, \quad q \in Q, \quad Q \subseteq E \quad (5.19)$$

Die zu optimierende Zielfunktion $F(q)$ setzt sich aus einer gewichteten Summe über die individuellen Optimierungskriterien c und deren Gewichte w zusammen. Nach Gleichung 5.20 repräsentiert C die Vereinigung aller quantifizierbaren Bewertungskriterien. Die Kriterien beziehen sich im Fall des Index c_q auf die Systemlösung und im Fall des Index c_x auf die Bewertung eines PPR-Tripels.

$$C = \{c_{x_1}, c_{x_2}, \dots, c_{q_1}, c_{q_2}, \dots\} \quad (5.20)$$

Gleichung 5.21 beschreibt das Optimierungsproblem. Eine Priorisierung oder ein Verzicht auf Kriterien erfolgt über die Vorgabe der Gewichtungen w durch den Planer.

$$\min(F(q)) = \min \left(\sum_{v=1}^{|C|} w_v \cdot c_v \right) \quad (5.21)$$

5.5 Quantifizierung der Optimierungskriterien

Zur Berücksichtigung der Bewertungskriterien in Gleichung 5.21 ist es erforderlich, diese in einer quantifizierbaren Form zu beschreiben. Das folgende Kapitel greift die identifizierten Kriterien (vgl. Kapitel 4.3.1) auf und definiert die individuellen Berechnungsvorschriften inkl. der Unterscheidung nach PPR-Tripel und Systemlösung.

5.5.1 Technische Eignung

Zur Bestimmung der technischen Eignung wird der Informationsgehalt I_D der Methode des Axiomatic Designs verwendet (vgl. Kapitel 2.4.2). Der Informationsgehalt erlaubt eine quantitative Aussage, wie gut eine Systemlösung mit ihren technischen Eigenschaften (*System Range*) den Anforderungen des Montagearbeitsplatzes (*Design Range*) entspricht. Systemlösungen, die die gestellten Anforderungen nur schlecht oder gar nicht erfüllen, weisen einen großen Informationsgehalt I_D auf. Nach Gleichung 5.22 wächst dieser im Fall einer technisch unzureichenden Systemlösung I_D gegen unendlich.

$$I_D \rightarrow \infty \quad (5.22)$$

Anmerkung

Es gilt: Je kleiner der Informationsgehalt ist, desto besser ist eine Ressource für die gegebenen Anforderungen geeignet.

Die Formel der Berechnung des Informationsgehalts (vgl. Gleichung 5.23) kann den Ausführungen von Suh (2001, S.39) entnommen werden. P beschreibt dabei die Wahrscheinlichkeit der Erfüllung einer funktionalen Anforderungen.

$$I_D = \log_2 \left(\frac{1}{P} \right) = -\log_2 (P) \quad (5.23)$$

Technische Eignung eines PPR-Tripels

Für einen technischen Entwurf mit mehreren Anforderungen einer Menge an Anforderungen R , ergibt sich die Berechnung des Informationsgehalts nach Formel 5.24 aus der Addition der Informationsgehalte je Anforderung Suh (2001, S.39).

$$I_D(x) = \sum_{i=1}^R I_{D,i} = \sum_{i=1}^R \log_2 \left(\frac{1}{P_i} \right) = - \sum_{i=1}^R \log_2 (P_i), \quad \text{mit } x = (t_i, k_{ij}) \quad (5.24)$$

Zur Berücksichtigung potentiell fehlerhafter Annahmen bei der Definition der Anforderungen, wird bei der Generierung der PPR-Tripel im Schritt der Ressourcenallokation ein Toleranzaufschlag hinzugefügt, der einen Unsicherheitsfaktor abbildet. Sollte eine Ressource die Anforderungen inkl. des vorgegebenen Toleranzaufschlags erfüllen, so kann unter der Annahme einer stetigen Gleichverteilung der Eigenschaften, der Überdeckungsgrad des von der Ressource bereitgestellten Leistungsvermögens (*System Range*) mit der Leistungsanforderung der Montageaufgabe (*Design Range*) ermittelt werden. Eine Darstellung der Zusammenhänge ist in Abbildung 5.9 i.A.a. Kulak & Kahraman (2005, S.417f) dargestellt.

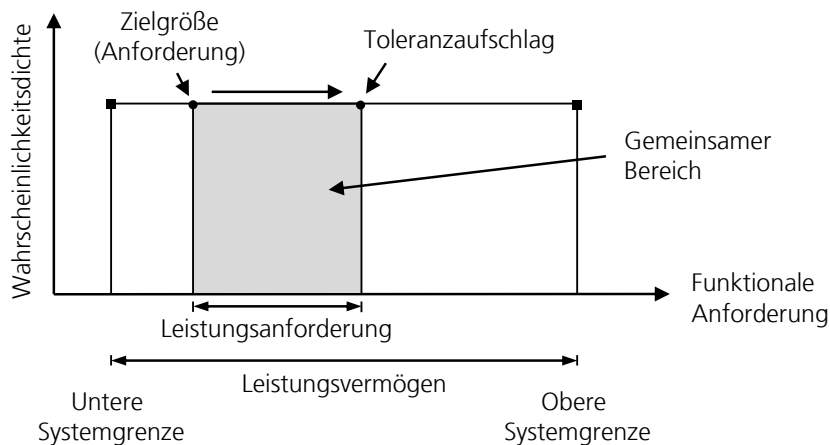


Abbildung 5.9: Grafische Darstellung der Bewertung der technischen Eignung anhand des Informationsaxioms, eigene Darstellung i.A.a. Kulak & Kahraman (2005, S.418)

Das Verhältnis des gemeinsamen Bereichs aus Leistungsanforderung und -vermögen (*Common Range*) zum Leistungsvermögen (*System Range*) kann als Wahrscheinlichkeit P der Leistungserfüllung betrachtet werden – vgl. Gleichung 5.25.

$$P = \left(\frac{CommonRange}{SystemRange} \right) \quad (5.25)$$

Eine hohe Überdeckung des Anforderungsbereichs mit dem Leistungsvermögen der Ressource führt nach Gleichung 5.24 zu einer Minimierung des Informationsgehalts. Im Idealfall nimmt dieser den Wert Null an. Dies geschieht genau dann, wenn Anforderungsbereich und Leistungsvermögen exakt zur Überdeckung kommen.

Zur Gewinnung einer dimensionslosen Kennzahl für die multikriterielle Optimierung ($I_{D,N}(x)$), wird der Informationsgehalt eines PPR-Tripels $I_D(x)$ in Relation zum maximalen Informationsgehalt eines PPR-Tripels der Menge aller möglichen Ressourcen des Montageschritts (m_i) gesetzt.

$$I_{D,N}(x_i) = \frac{I_D(x_i)}{I_D(x_{i,max})}, \quad x_i \wedge x_{i,max} \in m_i \quad (5.26)$$

Technische Eignung einer Systemlösung

Für die Bewertung der technischen Eignung eines Montagearbeitsplatzes, bestehend aus einzelnen PPR-Tripeln, kann als quantifizierbares Maß die Summe der Informationsgehalte über alle PPR-Tripel herangezogen werden.

$$I_D(q) = \sum_{i=1}^n I_D(x_i), \quad \text{mit } x = (t_i, k_{ij}) \quad (5.27)$$

Zur Ermittlung einer dimensionslosen Zahl wird dieser Wert in Relation zur Summe über die Maximalwerte aller Montageschritte gesetzt.

$$I_{D,N}(q) = \frac{\sum_{i=1}^n I_D(x_i)}{\sum_{i=1}^n I_D(x_{i,max})} \quad (5.28)$$

5.5.2 Ressourcenstückliste

Die Bewertung der Ressourcenstückliste basiert auf dem Verhältnis der Anzahl unterschiedlicher Ressourcen zur maximal möglichen Anzahl an Ressourcen einer hybriden Systemlösung entsprechend den gegebenen Randbedingungen aus Kapitel 4. Dabei ist definiert, dass

nie mehr als zwei Ressourcen einen Montageschritt gemeinsam verrichten. Aus diesem Grund erfolgt die Normierung des Kennwerts auf die doppelte Zahl an Montageschritten. Unter der Annahme von n Montageschritten und m unterschiedlichen Ressourcen des Montagearbeitsplatzes ergibt sich der Kennwert R_N der Gleichung 5.29 zu:

$$R_N(q) = \frac{m}{2 \cdot n} \quad (5.29)$$

Je weniger Ressourcen für die Erfüllung der Montageaufgabe benötigt werden, desto kleiner wird der Wert R_N . Das Kriterium kann somit verwendet werden, Systemlösungen mit einigen wenigen, unterschiedlichen Ressourcen zu erzwingen.

5.5.3 Prozess- und Taktzeit

Zur Bewertung der Prozesszeiten der PPR-Tripel und Montagearbeitsplätze wurden nach Tabelle 4.1 zwei Optimierungskriterien eingeführt. Das erste Kriterium bewertet die Prozesszeit einer Ressourcenlösung in Relation zu den Lösungsalternativen desselben Montageschritts und bezieht sich rein auf das zu untersuchende PPR-Tripel. Das zweite Kriterium der Taktzeit betrachtet das Zusammenspiel der Menge an PPR-Tripeln einer Systemlösung unter Berücksichtigung der Abhängigkeiten des Montagevorranggraphs und potentieller Parallelisierungen der Montageschritte.

Als Ausgangspunkt zur Abschätzung der Prozesszeiten dient die Beschreibung und Modellierung der Montageschritte nach den Methoden »Methods-Time Measurement« (MTM) und »Robot Time and Motion« (RTM). Zu jeder Grundoperation der Handhabung sind Normzeitwerte bekannt, die in Tabellenwerken nachgeschlagen werden können. Die Summe der Normzeitwerte über alle Montageoperationen je Montageschritt bildet die Prozesszeit.

Die MTM enthält Normzeitwerte für die Vereinzelung von Objekten aus einer Grundmenge bereitgestellter Bauteile. Weiterhin sind Fügevorgänge mit unterschiedlichen Toleranzklassen und manuellen Werkzeugen definiert.

Zur Erfassung der Normzeitwerte automatischer Prozesse abseits der Handhabung, wie bspw. Füge-, Vereinzelungs- oder Positioniervorgänge, existieren keine einheitlichen Tabellenwerke. Es wird daher üblicherweise von Erfahrungswerten ausgegangen oder mit

betriebsinternen Normzeitkatalogen gearbeitet. Diese werden individuell je Ressource ermittelt oder sind den Spezifikationen der Betriebsmittel zu entnehmen.

Eine direkte Übertragbarkeit der MTM-Beschreibung auf Industrieroboter ist nicht möglich, da sich die Bewegungsprofile und -eigenschaften der Handhabungsschritte von Mensch und Roboter unterscheiden. Die Methode der RTM versucht, analog der MTM, die Bewegungen des Roboters in vordefinierte Grundoperationen zu unterteilen und Normzeitwerte abzuleiten. Die Funktionsblöcke der MTM werden dafür um roboterspezifische Funktionen erweitert (bspw. Stop-by-Error, Stop-by-Force, ...) (Paul & Nof 1979). Vergleiche von MTM und RTM zeigen, dass sich gerade bei größeren Handhabungsdistanzen die Prozesszeiten automatischer und manueller Ressourcen angleichen (Choi & Ip 1999).

Anmerkung

Zur Bestimmung der RTM sind die genaue Beschreibung und Länge der Bewegung, wie auch die physikalischen Parameter des Robotertyps erforderlich (Paul & Nof 1979). Diese Informationen sind zu einem frühen Zeitpunkt der Grobplanung oftmals nicht verfügbar (Nof & Lechtman 1982) oder mittels Simulation nur aufwendig zu generieren (Schröter et al. 2016).

Weiterhin ist zu beachten, dass die Berechnungen und Untersuchungen zu RTM aus den frühen Jahren der Robotik stammen (Nof & Lechtman 1982). Die Werte sind daher nur eingeschränkt auf aktuelle Leichtbauroboter im Anwendungsfall der Mensch-Roboter-Kollaboration übertragbar. Dennoch liefert das Vorgehen einen ersten Anhaltspunkt über die benötigte Dauer der Roboterbewegung, die im Zuge der Grobplanung eingesetzt werden kann.

Weckenborg & Spengler (2019) begegnen dem Umstand der Unterschiede zwischen manueller und automatisierter Handhabung mit der Einführung eines Korrekturfaktors, der die Roboterzeit zum manuellen Zeitbedarf proportional verlängert oder verkürzt. Dies kann in einem ersten Schritt aber nur als eine grobe Näherung verstanden werden.

Schröter (2018, S.71f) untersucht den Ansatz einer empirischen Ermittlung von Normzeitwerten durch generische Simulation von Roboterbewegungen für unterschiedliche Robotermodelle und Lastfälle. Angelehnt an die MTM-Planung können so Normzeitwerte für durch Roboter ausgeführte Handhabungsprozesse definiert und in Tabellenwerken hinterlegt werden.

Prozesszeit eines PPR-Tripels

Die Prozesszeiten unterschiedlicher Ressourcen weisen mitunter erhebliche Differenzen für ein und denselben Montageschritt auf. Aus diesem Grund kann eine Bewertung basierend auf den Prozesszeiten unterschiedlicher Ressourcen erfolgen. Dabei werden die Zeiten p_i der Verrichtung einer Tätigkeit je Ressource und Montageschritt in Bezug zur maximalen Prozesszeit $p_{i,max}$ der langsamsten Ressource desselben Montageschritts gesetzt.

$$T_N(x_i) = \frac{p_i}{p_{i,max}}, \quad x_i \wedge x_{i,max} \in m_i \tag{5.30}$$

Taktzeit eines Montagearbeitsplatzes

Um die Effekte einer Parallelisierung von Tätigkeiten im hybriden Montagearbeitsplatz korrekt abzubilden, werden die Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen der einzelnen Montageschritte über mehrere aufeinander folgende Montageprozesse betrachtet. Eine typische Prozessfolge der Montageschritte Ordnen, Zuführen, Fügen und Prüfen (Hartel & Lotter 2012, S.370) kann Abbildung 5.10 entnommen werden.

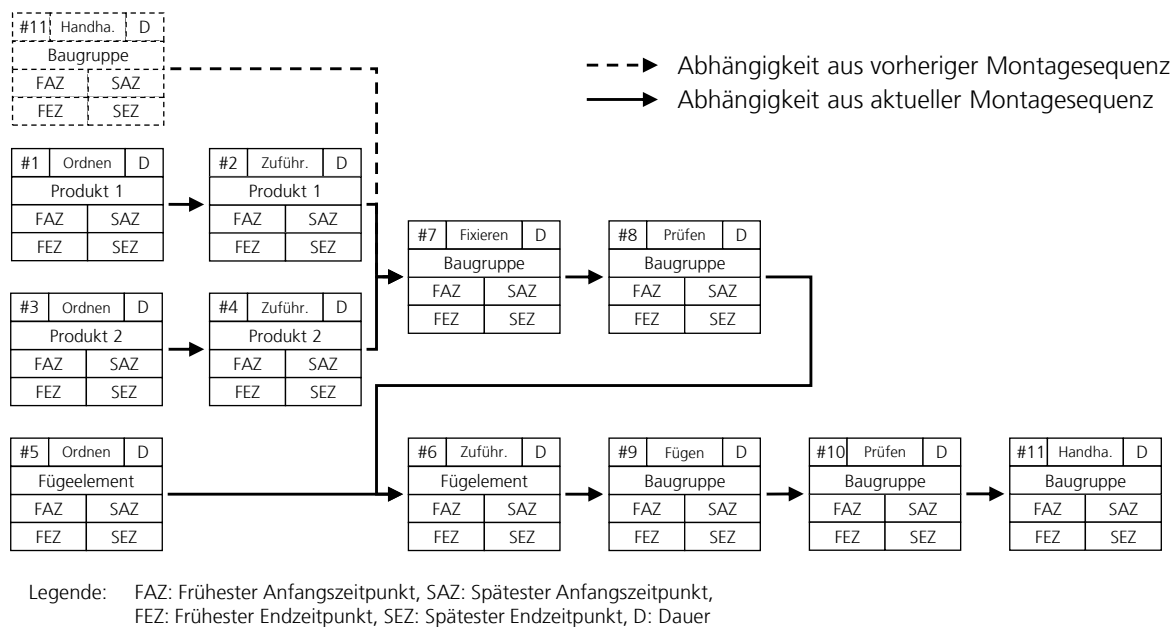


Abbildung 5.10: Darstellung eines Montagevorrangs zur Ermittlung der Taktzeit, in der Darstellung als Netzplan einer Baugruppe aus zwei Einzelteilen mit Fügeelement und Qualitätsprüfung

Durchgezogene Linien definieren eine direkte Abhängigkeit zweier Montageschritte innerhalb eines Montageprozesses, während eine gestrichelte Linie eine Abhängigkeit aus der vorangegangenen Montagesequenz beschreibt. Für die zeitliche Abfolge entscheidend sind Montageschritte, die mehr als einen Vorgänger besitzen.

Neben den Einschränkungen der Montagereihenfolge aufgrund Produkt- und Prozessstruktur ergeben sich Restriktionen aus der Allokation der Ressourcen. Es ist denkbar, dass zwei Montageschritte aus Gründen der Produktstruktur theoretisch parallel ausgeführt werden können. Aufgrund der Annahme, dass eine Ressource immer nur einen Montageschritt auf einmal durchführen kann (no-overlap condition), kann eine Zuweisung der Ressource auf mehrere Montageschritte zu längeren Taktzeiten der Systemlösung führen. Abbildung 5.11 beschreibt einen Ausschnitt des Montagevorranggraphen aus Abbildung 5.10 mit parallelen Ressourcen in Form eines »Swim-Lane-Diagramms«.

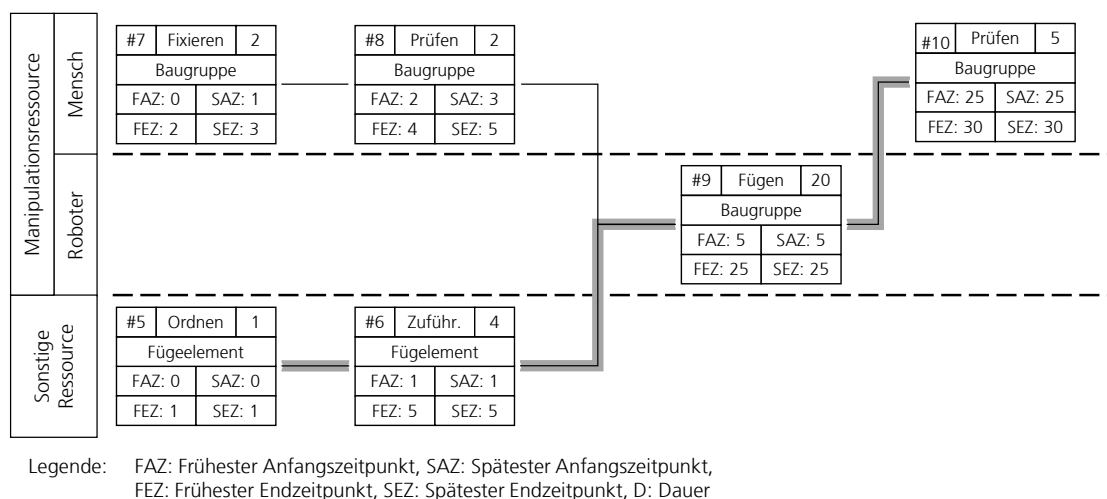


Abbildung 5.11: Reihenfolgenplanung des Montagablaufs an einem Teilumfang aus Abbildung 5.10 inkl. Darstellung des kritischen Pfades

Im Fall der hybriden Montage werden drei Bahnen (Swim-Lanes) unterschieden:

- Jeweils eine Swim-Lane für Montageschritte, die eine Manipulationsressource vom Typ Mensch und Roboter benötigen.
- Eine Swim-Lane für alle verbleibenden Montageschritte, die ohne Mensch und Roboter verrichtet werden können.

Der kritische Pfad, in Abbildung 5.11 durch die gefettete Linie dargestellt, beschreibt den Montagevorgang der keine Puffer- oder Wartezeiten aufweist und somit die kürzeste

Dauer des Montageprozesses definiert. Im vorliegenden Fall gilt es, die Dauer der Montage einer Losgröße zu minimieren, unter der Randbedingung, dass die Ressourcen in einem vorhergehenden Planungsschritt bereits zugewiesen wurden und die individuellen Prozesszeiten der PPR-Tripel somit feststehen.

Für die Lösung dieses Minimierungsproblems werden mathematische Verfahren der automatischen Reihenfolgenbildung (*Scheduling*) mittels »Constraint Programming (CP)¹¹« angewendet. Es gilt, die kürzeste Taktzeit einer Systemlösung $T(q)$ über die vorgegebenen Ressourcen und ihre zugehörigen Prozesszeiten zu bestimmen. Das Problem kann nach Gleichung 5.31 als Minimierungsproblem formuliert werden.

$$T(q) = \min\{T(x_1, x_2, \dots, x_n) \mid x_i \rightarrow p_i, \quad \forall x = (t_i, k_{ij}) \in q\} \quad (5.31)$$

Die Normierung der Taktzeit einer Arbeitsstation erfolgt über die Vorgabe der maximalen Montagezeit T_V durch den Planer:

$$T_N(q) = \frac{T(q)}{T_V} \quad (5.32)$$

5.5.4 Montagewirkungsgrad

Die Berechnung des Montagewirkungsgrades erfolgt über das Verhältnis wertschöpfender Prozesszeiten (Primärvorgang) zur Gesamtzeit aller Montagevorgänge eines Montagearbeitsplatzes (Konold & Reger 2009, S.141f; Lotter 2012a, S.49f). Dabei gilt es den Zeitanteil sekundärer Vorgänge, also den Anteil nicht wertschöpfender Montageschritte eines Montageprozesses, zu reduzieren.

Ein Überblick über die Klassifizierung der Primär- und Sekundärvorgänge wurde bereits in Abbildung 2.11 gegeben. Im vorliegenden Fall sind als Primärvorgänge die Schritte des Fügens (p_J), Spannens/Positionierens (p_P) sowie die Schritte des Greifens, Zusammenführens und Einlegens ($p_{H(+)}$) definiert. Sie alle besitzen einen Mehrwert für die Montage und tragen aus diesem Grund zur Wertschöpfung bei.

$$T_P(q) = \sum_{i=1}^n (p_J + p_P + p_{H(+)}) \quad (5.33)$$

¹¹Anwendung der Google OR-Tools Bibliothek, <https://developers.google.com/optimization>

Die Prozessschritte des Vereinzelns p_S , Prüfens p_C und der Manipulation von Objekten $p_{H(-)}$, werden als Sekundärvorgänge bezeichnet.

$$T_S(q) = \sum_{i=1}^n (p_S + p_C + p_{H(-)}) \quad (5.34)$$

Der Montagewirkungsgrad berechnet sich über das Verhältnis der Prozesszeiten zu:

$$W_N(q) = \frac{T_P(q)}{T_P(q) + T_S(q)} \quad (5.35)$$

5.5.5 Kostenrechnung

Die Berechnung der Montagekosten erfolgt nach dem Ansatz der Kostenvergleichsrechnung im Leasingmodell aus Kapitel 4.2.2. Da die Kostenrechnung von individuellen unternehmerischen Details abhängig ist, die im vorliegenden generischen Fall nicht verfügbar sind, werden in den nachfolgenden Unterkapiteln Abschätzungen und Annahmen getroffen. Für den frühen Schritt der Grobplanung stellt diese keine Einschränkung dar. Sollten genauere Zahlenwerte bekannt sein, so können diese in den Berechnungen verwendet werden. Bei den Kosten kann eine Unterscheidung zwischen den Investitionskosten einer Ressource (PPR-Tripel) und den Montagestückkosten eines Montagearbeitsplatzes erfolgen.

Investitionskosten eines PPR-Tripels

Die normierten Investitionskosten einer Ressourcenlösung berechnen sich aus dem Verhältnis der Anschaffungskosten $C(x_i)$ der Summe der Einzelressourcen eines PPR-Tripels im Verhältnis zu den maximalen Investitionskosten einer Ressourcenlösung im selben Montageschritt $C(x_{i,max})$.

$$C_N(x_i) = \frac{C(x_i)}{C(x_{i,max})}, \quad x_i \wedge x_{max,i} \in m_i \quad (5.36)$$

Montagekosten eines Montagearbeitsplatzes

Um den wirtschaftlichen Mehrwert der hybriden Montage gegenüber einer rein manuellen Verrichtung aufzuzeigen, werden die variablen und fixen Montagekosten sowie die

Wandlungskosten zur Inbetriebnahme des Systementwurfs im Betrachtungsrahmen einer zu fertigenden Losgröße summiert. Die Gesamtkosten je Losgröße berechnen sich nach Gleichung 5.37 aus der Summe der einmaligen Einricht-, Inbetriebnahme und Rüstkosten $C_{f,b}(k_i)$ je Ressource sowie den zeitabhängigen Betriebskosten $C_{v,b}(k_i)$ je Ressource über alle Ressourcen k_i der Ressourcenstückliste m eines Montagearbeitsplatzes.

$$C_b(q) = \sum_{i=1}^m (C_{f,b}(k_i) + C_{v,b}(k_i)) \quad (5.37)$$

- $C_b(q)$ Montagekosten eines Montagearbeitsplatzes je Losgröße (batch costs)
- $C_{f,b}(k_i)$ fixe Einricht-, Inbetriebnahme und Rüstkosten je Ressource
- $C_{v,b}(k_i)$ zeitabhängige Betriebskosten je Ressource

Die Normierung der Kosten erfolgt nach Gleichung 5.38 unter der Vorgabe der maximalen Kosten des Produktionsauftrags C_V durch den Planer.

$$C_N(q) = \frac{C_b(q)}{C_V} \quad (5.38)$$

Anmerkung

Material- und Lagerkosten werden vernachlässigt, da diese im Vergleich unterschiedlicher Systemlösungen zum Zeitpunkt der Grobplanung als gleich anzunehmen sind und kein Unterscheidungsmerkmal darstellen.

Die Gesamtkosten je Losgröße $C_b(q)$ können nach Gleichung 5.39 über die Losgröße b in die Montagestückkosten¹² umgerechnet werden.

$$c(q) = \frac{C_b(q)}{b} \quad (5.39)$$

Eine Normierung erfolgt nach Gleichung 5.40 über die Vorgabe der maximalen Montagestückkosten c_V durch den Planer.

$$c_N(q) = \frac{c(q)}{c_V} \quad (5.40)$$

¹²Montagekosten je Stück ohne Berücksichtigung der Materialkosten

Berechnung der zeitabhängigen Kosten $C_{v,b}$ je Ressource

Die Kostenrechnung ermöglicht einen direkten Vergleich der zeitabhängigen Kosten einer Ressource. Hierfür wird das Leasingkostenmodell aus Kapitel 4.2.2 für alle Ressourcen eines Montagearbeitsplatzes angewendet. Nach Hartel & Lotter (2012) können die Kapitaldienstkosten der Ressourcen auf Maschinenstundensätze heruntergebrochen werden und dienen als Basis für die Leasingkostensätze. Diese beinhalten ebenso einen Risikoaufschlag und eine zu erwartende Rendite des Leasinggebers.

Die zeitabhängigen Kosten einer Ressource ergeben sich im Fall der Kostenvergleichsrechnung aus den aggregierten Leasingsätzen der individuellen Ressourcen und den Kosten der Betriebsmedien, jeweils für die Dauer der Montage. Für die Betriebsmedien wird in erster Näherung nur der Stromverbrauch der Ressource betrachtet.

$$C_{v,b}(k) = \frac{t_c \cdot b}{3.600} \cdot (r_k + p_k \cdot r_e) \quad (5.41)$$

$C_{v,b}$	zeitabhängige Kosten einer Ressource für die Dauer der Montage	[€]
t_c	Taktzeit der Montage	[s]
b	Losgröße	[-]
r_k	zeitabhängiger Leasingsatz der Ressource	[€/h]
p_k	elektrische Leistungsaufnahme Ressource	[kW]
r_e	Kostensatz Strom	[€/kWh]

In Tabelle 5.1 soll eine beispielhafte Gegenüberstellung der zeitabhängigen Kosten einer manuellen und automatischen Ressourcenlösung erfolgen. Die Kosten der Ressource Mensch beziehen sich auf einen durchschnittlichen Bruttolohn in der Montage der Automobilindustrie¹³, heruntergebrochen auf die produktiven Arbeitstage im Jahr und die verfügbare Zeit einer Schicht.

Der Wiederbeschaffungswert der automatischen Ressourcen (Leichtbauroboter + Greifer) von 29.000 € stellt eine Annahme dar. Die zeitabhängigen Kosten der Automatisierungslösung berechnen sich nach Hartel & Lotter (2012, S.383f) entsprechend den finanziellen Aufwänden für Instandhaltung, Abschreibung und kalkulatorische Zinsen¹⁴.

Die Dauer einer Schicht ist mit acht Stunden definiert und die interne Abschreibungszeit

¹³Zum Vergleich: Stundenlohn in der deutschen Automobilindustrie 2016, 44 €/h, (Ahlswede 2019)

¹⁴Die kalkulatorischen Zinsen "[...] für das in Investitionsgütern angelegte Kapital werden unter der Voraussetzung einer linearen Abschreibung mit 50% des Wiederbeschaffungswerts berechnet", Hartel & Lotter (2012, S.382)

wird beispielhaft zu vier Jahren angenommen. Weitere Randbedingungen können detailliert im Anhang in Tabelle D.8 nachgelesen werden.

Tabelle 5.1: Beispielrechnung zum Vergleich der zeitabhängigen Kosten einer automatischen und manuellen Ressourcenlösung im Leasingmodell

Kapitaldienstkosten	Automatisierung		Mensch -
	mit	ohne	
Wiederbeschaffungswert (K_{WB})	29.000 €	-	-
Abschreibungsdauer	4 a	-	-
Aufwand für Abschreibung	7.250 €/a	-	-
Instandhaltungskosten (3% K_{WB})	870 €/a	-	-
Kalkulatorische Zinsen (10% auf 50% K_{WB})	1.450 €/a	-	-
Fixkosten pro Jahr	9.570 €	2.320 €	75.000 €
Produktionstage pro Jahr	250 d		250 d
Urlaubsanspruch	-		30 d
Verleihfrequenz der Maschine	33%		-
Produktionstage im Einsatz	82.5 d		220 d
Selbstkosten pro Tag	116,00 €	28,12 €	340,91 €
Renditeerwartung des Leasinggebers	10%		-
Kosten pro Tag	127,60 €	30,93 €	340,91 €
Kosten (1. Schicht)	15,95 €/h	3,87 €/h	42,61 €/h
Kosten (2. Schicht)	7,98 €/h	1,93 €/h	42,61 €/h

Im Falle des Kostenrechnungsmodells bei internem Leasinggeber kommt nach Ende des Abschreibungszeitraums der Ressourcen ein positiver Effekt zum Tragen. Der Kapitaldienstkostenanteil als dominanter Term der Kostenrechnung auf Seiten automatischer Ressourcen fällt weg (Witte et al. 2013, S.323). Dieser Unterschied ist in Tabelle 5.1 in den Spalten »mit« und »ohne« Kapitaldienstkosten dargelegt.

Tabelle 5.1 kann entnommen werden, dass bei einer Entkopplung der langfristigen Investitionsplanung hin zu einem bedarfsgerechten, temporären Einsatz von Ressourcen (Leasingmodell), selbst unter der Annahme einer geringen Verleihfrequenz, Kostenvorteile auf Seiten automatisierter Ressourcen deutlich werden.

Sollten durch Veränderung der Randbedingungen zusätzliche Schichten erforderlich werden, verringern sich die variablen Kostensätze einer Automatisierung weiter. Da für eine weitere Schicht keine neuen Ressourcen erforderlich sind, verteilen sich die Leasingkosten je Tag somit auf eine größere Produktivzeit, was den Kostensatz weiter reduziert.

Anmerkung

Der Kostenvergleich in Tabelle 5.1 betrachtet nicht die realen Produktivitätsunterschiede von Mensch und Roboter und soll lediglich dem Vergleich der variablen Kostensätze dienen. Die vereinfachte Betrachtung eines Roboters mit einem Greifer stellt in diesem Kontext noch keinen funktionsfähigen Montagearbeitsplatz dar.

Aus eigener Erfahrung kann festgehalten werden, dass die Produktivität eines Menschen über den Tag gesehen höher ist, als die eines Leichtbauroboters im kollaborierenden Betrieb, selbst wenn dieser die Pausen durcharbeiten sollte. Aufgrund der Beidhändigkeit des Menschen sollten daher in einem realitätsnahen Kostenvergleich die Kosten von zwei Robotern mit denen eines Menschen verglichen werden.

Die ermittelten zeitabhängigen Kostensätze im Leasingmodell decken sich mit Recherchen zum Kurzzeitleasing im Robotergewerbe. So veranschlagt die Firma *QuickSolutions* aus Kanada eine Monatsmiete von 6.000 C\$ für einen Leichtbauroboter der gleichen Traglastkategorie. Damit verbunden ist ein fiktiver Stundensatz im Einschichtbetrieb von 36 C\$, umgerechnet circa 24 €¹⁵. Die Firma *HireRobotics* aus den USA veranschlagt eine Tagesmiete von 240US\$ bezogen auf eine definierte Wochenarbeitszeit von 80 Stunden im Zweischichtbetrieb. Der umgerechnete Stundensatz ergibt sich damit zu 15 US\$, circa 13.65 €¹⁶.

Berechnung der einmaligen Kosten $C_{f,b}$ je Ressource

Durch die Transformation der Investitionskosten in variable Leasingkostensätze, verbleiben die fixen einmaligen Wandlungskosten (siehe Abbildung 3.1) je Montageszenario. Eine Berücksichtigung der indirekten Wandlungskosten, bspw. durch Stillstandszeiten aufgrund Rekonfiguration, findet nicht statt. Diese Kosten liegen im Risiko des Leasinggebers und werden über die Abschätzung einer Verleihfrequenz, also die relative Anzahl der Tage einer Vermietung pro Jahr, in die variablen Kosten für den Nutzer eingepreist.

Die für jedes Montageszenario einmalig anfallenden Montagekosten setzen sich aus den direkten Wandlungskosten der mechanischen Inbetriebnahme, der Programmierung und Parametrierung automatischer Ressourcen sowie den Schulungsaufwänden zur Qualifikation der Werker zusammen und werden einmalig je produziertem Produkt berechnet (vgl.

¹⁵Umrechnungskurs am 27.05.2020: 1 C\$ = 0.66 €

¹⁶Umrechnungskurs am 27.05.2020: 1 US\$ = 0.91 €

Gleichung 5.42). Zusätzlich kommen Aufwände für die Anlieferung der Komponenten hinzu, sofern diese von extern angeliefert werden sollten.

Wandlungsobjektkosten, die bspw. durch eine Anpassung der Peripherie an die Ressourcen oder mit Transaktionskosten beim Erwerb und Verkauf geknüpft sind, werden nicht betrachtet, da diese zum Zeitpunkt der Grobplanung nicht adäquat abgeschätzt werden können.

$$C_{f,b}(k) = t_k \cdot l_k \cdot r_p + i_k + s_k \quad (5.42)$$

$C_{f,b}$	einmalige Kosten je Ressource	[€]
t_k	Arbeitsinhalt je Ressource	[s]
l_k	zeitlicher Anlernfaktor je Ressource	[-]
r_p	zeitabhängiger Kostensatz für die Qualifizierungsphase	[€/s]
i_k	fixer Kostensatz der mechanischen Inbetriebnahme je Ressource	[€/Ressource]
s_k	Transportkosten je Ressource	[€/Ressource]

Tabelle 5.2 vergleicht die finanziellen Aufwände der Inbetriebnahme und des Anlernens einer Ressource am Beispiel einer Handhabungsaufgabe mit zehn Sekunden manuellem Arbeitsinhalt. Deutlich wird der höhere, einmalige Kostenaufwand einer automatisierten Montage, wie er bereits in den einleitenden Hypothesen beschrieben wurde. Die zeitlichen Aufwände der Qualifikation eines Fertigungsmitarbeiters bezieht sich auf eine mündlich überlieferte Faustformel aus der Automobilindustrie. Es wird dabei angenommen, dass der Mitarbeiter von einem Kollegen angelernt wird, weshalb doppelte Personalkosten für die Zeit des Trainings anfallen.

Faustformel

Für einen geübten Monteur kann die Annahme getroffen werden, dass eine Minute manueller Arbeitsinhalt innerhalb einer Stunde Training erlernt werden kann.

Auf Seiten der Inbetriebnahme von Robotern wird für jeden zu programmierenden Punkt im Programmablauf der Applikation eine Programmierzeit von einer Minuten veranschlagt (Dietz et al. 2013). Um die zeitlichen Aufwände der Programmierung zur sicheren Seite abzuschätzen, werden die Programmieraufwände je Roboterpunkt auf zwei Minuten verdoppelt. Eine grobe Näherung der Anzahl der Punkte einer Roboterbewegung kann aus der

Prozessmodellierung abgeleitet werden. So müssen für den Anwendungsfall aus Tabelle 5.2 mindestens fünf Bahnpunkte programmiert werden.

Tabelle 5.2: Vergleich einmaliger Fixkosten im Vergleich einer automatisierten und manuellen Montage bei externem Leasinggeber und 10 s Arbeitsinhalt

Ressourcen	automatisiert		manuell Mensch
	Roboter	Greifer	
Transportkosten zum Montageort	75 €	10 €	-
Kostensatz Inbetriebnahme / Schulung	100 €/h		42,61 €/h
Aufwand mech. / elektr. Aufbau	600 s	600 s	-
Aufwand Inbetriebnahme / Schulung	5 · 120 s	600 s	600 s
Variable Kosten während Anlernzeit	5,32 €		7,10 €
Einmalige Kosten je Montageszenario	156,98 €		14,20 €

Für alle automatisierten Ressourcen, die nicht als Manipulationsressource Mensch oder Roboter klassifiziert sind (bspw. Werkzeuge, ...), wird ein steuerungstechnischer Programmieraufwand der Inbetriebnahme von zehn Minuten je Sekunde Arbeitsinhalt angenommen. Zu den Fixkosten der Programmierung kommen die Transportkosten an die Betriebsstätte sowie die Kosten des mechanischen Aufbaus und der elektrischen Installation hinzu. Die Kosten des Transports sind abhängig von Größe und Gewicht der Ressource.

Anmerkung

Zusätzliche Arbeitsschritte der Inbetriebnahme, wie bspw. eine mögliche Fehlersuche (Debugging) oder die Qualifizierung der programmierten Prozesse nach Programmierung, finden in der aktuellen Abschätzung keine Berücksichtigung.

Es wird davon ausgegangen, dass erfahrenes Personal die Programmierung der Bewegungseinrichtungen und Automatisierungskomponenten vornimmt. Im Falle einer Detaillierung der Kostenrechnung müssten hier weitere Annahmen getroffen werden.

5.5.6 Stetigkeit der Verrichtung der Montageschritte

Die Stetigkeit gibt Auskunft über die Kontinuität der Handhabungsschritte und die Häufigkeit der Wechsel zwischen manueller und automatischer Verrichtung im hybriden Montageszenario (vgl. Abbildung 2.5). Häufige Wechsel sollten vermieden werden, um eine Kontinuität im Arbeitsablauf zu erreichen und möglichen Synchronisierungsverlusten zwischen Mensch und Roboter vorzubeugen.

In Bezug auf das »Swim-Lane-Diagramm« aus Abbildung 5.11 bedeutet dies, dass die Häufigkeit der Wechsel zwischen den Swim-Lanes von Mensch und Roboter minimiert werden sollte. Die Quantifizierung erfolgt anhand einer score-basierten Bewertungsfunktion, die die Richtung eines Ressourcenwechsels berücksichtigt.

Da neben der Verwendung identischer Manipulationsressourcen auch der Einsatz gleicher Füge- und Handhabungsressourcen vorteilhaft ist, werden vier Fälle unterschieden – siehe Fallunterscheidung in Gleichung 5.43.

Die Variablen r und h beschreiben generische Manipulationsressourcen der Typen Mensch (h) und Roboter (r). t beschreibt eine optional benötigte Ressource (Werkzeug, Greifer, ...) im Falle einer Kombination an Ressourcen. t' impliziert, dass sich die optionale Ressource im Vergleich zum Vorgängerschritt verändert. Die optionalen Ressourcen von Mensch und Roboter unterscheiden sich, weshalb jeweils der Index mit angegeben ist. Es gilt:

$$s_i : \begin{cases} -1 & h(+t_h) \rightarrow h(+t_h) \quad \vee \quad r + t_r \rightarrow r + t_r \\ 0 & r + t_r \rightarrow r + t'_r \quad \vee \quad h(+t_h) \rightarrow h(+t'_h) \\ 1 & r + t_r \rightarrow h(+t_h) \\ 2 & h(+t_h) \rightarrow r + t_r \end{cases} \quad (5.43)$$

Es ist davon auszugehen, dass eine Synchronisierung des Menschen an den Arbeitsablauf des Roboters, aufgrund der Flexibilität menschlicher Handlungen, einfacher gestaltet werden kann. Die Synchronisierung eines Montageschritts von Roboter zu Mensch ($r \rightarrow h$) wird aus diesem Grund besser bewertet als eine Synchronisierung Mensch zu Roboter ($h \rightarrow r$). Die einzelnen Score-Werte werden nach Gleichung 5.44 addiert.

$$S(q) = \sum_{i=1}^{n-1} s_i \quad (5.44)$$

Die Normierung der Summe aus Gleichung 5.44 erfolgt über die maximal mögliche Zahl an Wechseln zwischen den n Montageschritten eines Montageprozesses.

$$S_N(q) = \frac{S(q)}{2(n-1)} \quad (5.45)$$

5.5.7 Ressourcennutzung

Das Kriterium der Ressourcennutzung betrachtet den prozentualen Anteil des Leerlaufs einer Ressource im Montageszenario. Es wird dabei, entgegen dem Montagewirkungsgrad, nicht zwischen primären und sekundären Vorgängen unterschieden. Die Ressourcennutzung leitet sich somit aus der Differenz der aggregierten Prozesszeiten einer Ressource $\sum p_i^k$ und der Taktzeit des Montagearbeitsplatzes $T(q)$ ab. Das Ergebnis dieser Differenz wird nach Gleichung 5.46 in Relation zur Taktzeit des Montageprozesses gesetzt.

$$L_N(k) = \frac{T(q) - \sum_{i=1}^n p_i^k}{T(q)} \quad (5.46)$$

Anmerkung

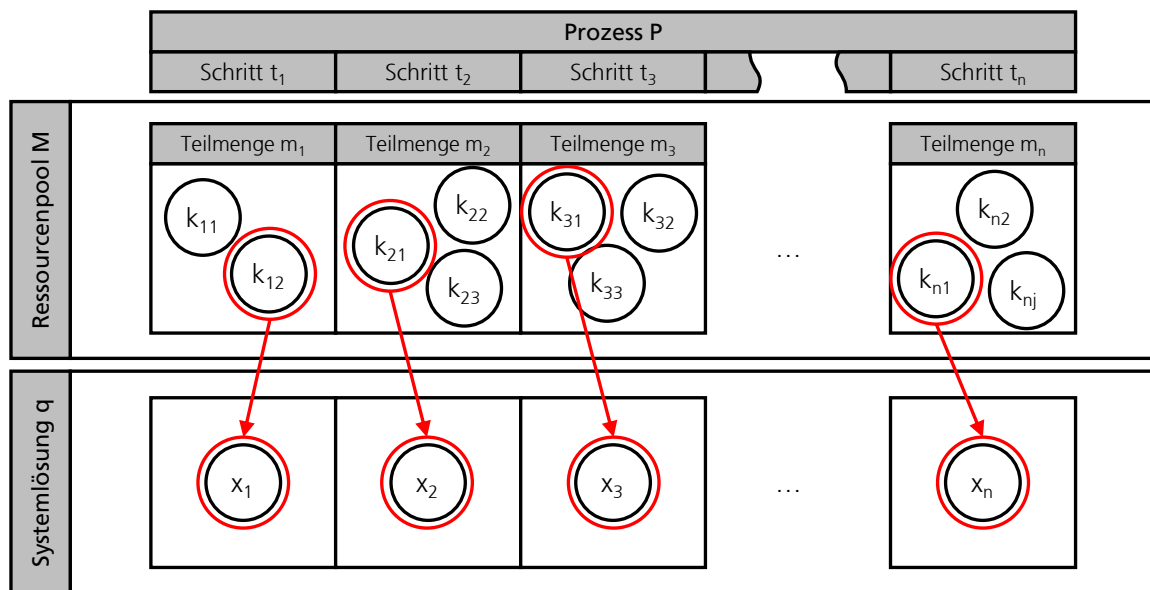
Aufgrund organisatorischer und wirtschaftlicher Kriterien (vgl. Tabelle 5.1) gilt es in hybriden Montagearbeitsplätzen, insb. die Ressource Mensch vollständig auszulasten.

5.6 Generierung alternativer Montagearbeitsplätze

Idealerweise können im Schritt der Ressourcenallokation mehrere Ressourcen je Montageschritt identifiziert werden. Der Mensch ist dabei als Ressource immer gesetzt, da eine manuelle Montage des Produkts entsprechend den Randbedingungen aus Kapitel 4.1.1 gegeben sein muss.

Über die Auswahl einer Ressource aus der Menge m_i aller Ressourcen eines Montageschritts können alternative Systemlösungen generiert werden¹⁷. Dabei gilt die Einschränkung, dass jedem Montageschritt immer nur ein PPR-Tripel zugewiesen werden kann. Die absolute Zahl unterschiedlicher Ressourcen einer Systemlösung ist somit abhängig von einer potentiellen Mehrfachnutzung einer Ressource über mehrere Montageprozesse und entsprechend den Randbedingungen aus Kapitel 4.1.1 maximal so hoch, wie die doppelte Zahl der Montageschritte. Abbildung 5.12 illustriert das Vorgehen der Auswahl einer Ressource und der Definition eines PPR-Tripels für jeden Montageschritt.

¹⁷Ein vergleichbares Vorgehen findet sich in der kreativen, heuristischen Methode der morphologischen Analyse.



Legende: q : Systemlösung, t : Montageschritt, n : Menge der Montageschritte, m : Ressourcenteilmenge, k : Ressource, x : PPR-Tripel

Abbildung 5.12: Generierung einer Systemlösung durch Selektion einer Ressource je Montageschritt

Das Vorgehen orientiert sich am V-Modell der VDI 2206 (vgl. Abbildung 5.3), bei dem durch Integration von Einzelsystemen in einem domänenspezifischen Entwurf Systemlösungen generiert werden. Das V-Modell kann dabei mehrmals durchlaufen werden, um alternative Lösungsmengen an PPR-Tripeln zu untersuchen.

Die Identifikation technischer Lösungen und die Erstellung individueller Mengen an PPR-Tripeln je Montageschritt beschreibt den Systementwurf, während die (Re-)Kombination und Verknüpfung ebendieser PPR-Tripel zu unterschiedlichen Systemlösungen die Systemintegration des V-Modells beschreibt. Nachfolgend findet eine Eigenschaftsabsicherung statt, bei der die Erfüllung der Randbedingungen überprüft und unzutreffende Lösungen herausgefiltert werden. Das methodische Vorgehen kann als ein kombinatorisches Optimierungsproblem betrachtet werden, bei dem eine endliche Anzahl unterschiedlicher Systemlösungen aus den identifizierten PPR-Tripeln gebildet werden kann (vgl. Gleichung 5.19).

Eine Systemlösung kann als Graph domänenübergreifender Funktionsbausteine (PPR-Tripel) des Systementwurfs interpretiert werden. Abbildung 5.13 gibt einen Überblick über mögliche Beziehungen und Verknüpfungen innerhalb einer Systemlösung. So stehen bspw. die einzelnen PPR-Tripel über die Prozessdomäne in Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen

(Montagevorrang) und besitzen teilweise Referenzen auf die gleichen Produkte oder Ressourcen.

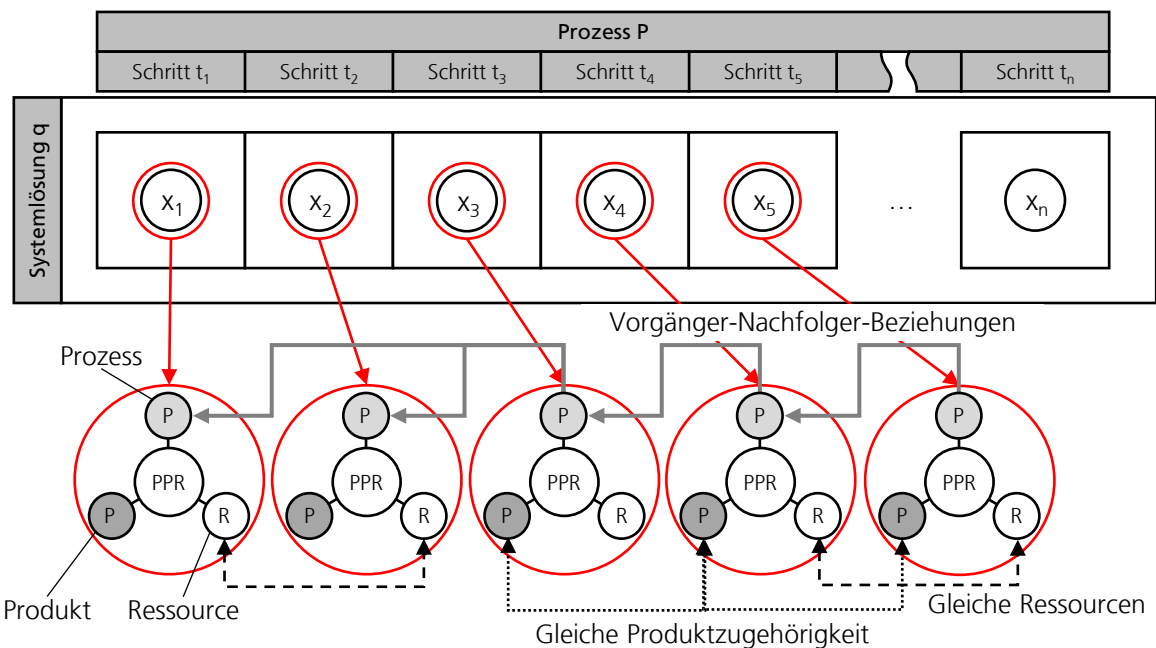


Abbildung 5.13: Graph der Systemlösung eines Montagearbeitsplatzes aus einzelnen PPR-Tripeln inkl. der Darstellung ausgewählter Relationen zwischen den unterschiedlichen Domänen

5.7 Ableitung einer dimensionslosen Fitnessfunktion

Um die unterschiedlichen Optimierungskriterien in einem skalaren Zielwert miteinander verrechnen zu können, muss ein dimensionsloser Bezug zwischen den einzelnen Kriterien hergestellt werden. Im einfachsten Fall erfolgt dies über eine gewichtete Summe der normierten Eigenschaftswerte je Optimierungskriterium. Die Normierung der einzelnen Optimierungskriterien erfolgt in Relation zu einem absoluten oder relativen Bezugswert. Dieser Schritt ist für jedes Optimierungskriterium in Kapitel 5.5 beschrieben.

Die individuelle Vorgabe der Gewichte erfolgt durch den Planer anhand der Zielsetzung der Optimierung. Die Summe der Gewichte aller Optimierungskriterien je PPR-Tripel, wie auch die Summe der Gewichte aller Optimierungskriterien einer Systemlösung ergeben nach Gleichung 5.47 jeweils 1. K_x und K_q repräsentieren dabei die endliche Menge an Optimierungskriterien je PPR-Tripel x und Systemlösung q .

$$\sum_{i=1}^{|K_x|} w_{x,i} \stackrel{!}{=} 1 \quad \wedge \quad \sum_{j=1}^{|K_q|} w_{q,j} \stackrel{!}{=} 1 \quad (5.47)$$

Nach Gleichung 5.48 beschreibt $F_x(q)$ den Fitnesswert einer Systemlösung als Ergebnis des Mittelwerts der Fitness der verwendeten PPR-Tripel. Die Variable n definiert dabei die Anzahl der Montageschritte und damit auch die Anzahl der eingesetzten PPR-Tripel. Der normierte Wert eines beliebigen Optimierungskriteriums in Bezug auf ein PPR-Tripel wird als $X_N(x_i)$ definiert und repräsentiert den Platzhalter eines Kriteriums aus Kapitel 4.3.1 mit der individuellen Berechnungsvorschrift nach Kapitel 5.5.

$$F_x(q) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^{|K_x|} (w_j \cdot X_{N,j}(x_i)) \right) \quad (5.48)$$

Eine vergleichbare Berechnungsvorschrift kann für die Verrechnung der Optimierungskriterien einer Systemlösung q angegeben werden. $F_q(q)$ beschreibt den Fitnesswert einer Systemlösung.

$$F_q(q) = \sum_{j=1}^{|K_q|} (w_j \cdot X_{N,j}(q)) \quad (5.49)$$

Die komplette Fitness einer Arbeitsstation $F(q)$ ergibt sich nach Gleichung 5.50 aus der Summe der Gleichungen 5.48 und 5.49. Entsprechend der Summe der Einzelgewichte aus Gleichung 5.47 wird das Ergebnis durch den Faktor zwei geteilt.

$$F(q) = \frac{F_x(q) + F_q(q)}{2} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^{|K_x|} (w_j \cdot X_{N,j}(x_i)) \right) + \sum_{j=1}^{|K_q|} (w_j \cdot X_{N,j}(q))}{\sum_{i=1}^{|K_x|} w_{x,i} + \sum_{j=1}^{|K_q|} w_{q,j}} \quad (5.50)$$

5.8 Iteratives Vorgehen der Optimierung

Für die iterative Optimierung ist es entscheidend, dass zwei Systemlösungen hinsichtlich ihren Eigenschaften und ihrer Leistungsfähigkeit miteinander verglichen werden können. Dies wird im späteren Verlauf insb. für die heuristischen Lösungsverfahren von Relevanz sein. Die Kriterien aus Kapitel 4.3.1 und die Fitnessfunktion aus Kapitel 5.7 dienen in diesem

Fall als Grundlage der rationalen Entscheidung, welche Systemlösung für den nächsten Iterationsschritt weiterverfolgt werden soll.

Nach Eisenführ et al. (2010, S.12f) ist die Auswahl einer optimalen Handlungsalternative unproblematisch, wenn eine der Alternativen eindeutig als die Bessere identifiziert werden kann. Dieser Fall tritt ein, wenn eine der Lösungen in keiner relevanten Eigenschaft schlechter, aber mindestens in einer Eigenschaft besser abschneidet als die betrachteten Alternativen. In allen anderen Fällen muss eine quantifizierbare Aussage getroffen werden, welche Systemalternative im Betrachtungsraum den größeren Nutzen verspricht.

Da die Normierung der Kriterien in Abschnitt 5.5 einerseits absolute und andererseits relative Bezugswerte aufweist, kann der individuelle Einfluss eines Bewertungskriteriums auf die Fitnessfunktion (Gleichung 5.50) anhand des durch den Planer vorgegebenen Gewichts nicht immer sichergestellt werden. Ein einzelner Funktionswert kann das Ergebnis unverhältnismäßig stark beeinflussen, wenn der Bezugswert der Normierung falsch gesetzt wird. Dies passiert insb. dann, wenn die Normierung anhand absoluten Vorgaben des Planers¹⁸ erfolgt und der Bezugswert der Normierung unverhältnismäßig groß gewählt wird. Da die Fitnessfunktion minimiert werden soll, impliziert diese unverhältnismäßige Normierung sehr kleine Funktionswerte und somit eine unerwünschte und übermäßig starke Beeinflussung der Fitnessfunktion aus Gleichung 5.50. Im Fall der heuristischen Suche kann dies zu ungenügenden Iterationsschritten und somit schlechteren Optimierungsergebnissen führen.

Zur Behebung dieses Umstandes wird ein Zwischenschritt eingeführt, der sich am »Kano-Modell der Kundenzufriedenheit« orientiert. Das Kano-Modell unterscheidet fünf Ebenen der Qualität von Merkmalen. Hierzu gehören Basis-, Leistungs-, Begeisterungs-, Unerheblichkeits- und Rückweisungsmerkmale (Sauerwein et al. 1996). Im Fall einer iterativen Optimierung von Montagearbeitsplätzen sind insb. die Leistungs-, Basis- und Begeisterungsmerkmale von Bedeutung.

- **Leistungsmerkmale** sind dem Nutzer bewusst, beseitigen Unzufriedenheit oder schaffen Zufriedenheit. Diese Ausprägung trifft auf Kriterien zu, die einen positiven, wie auch negativen Effekt auf die Optimierung haben sollen.

¹⁸Dies gilt für: Montagekosten, Taktzeit

- Demgegenüber stehen **Basismerkmale**, die es zu erfüllen gilt, da sich eine Verschlechterung negativ bemerkbar machen würde. Eine Verbesserung dieser Kriterien kreiert hingegen keinen Mehrwert für den Nutzer und hat damit keinen positiven Effekt.
- **Begeisterungsmerkmale** sind Merkmale, mit denen der Nutzer nicht rechnet, die das Produkt aber auszeichnen. Eine kleine Leistungssteigerung in diesen Kriterien kann zu überproportional gesteigertem Nutzen für den Endanwender führen, der sich positiv bemerkbar macht. Ein Fehlen wird wiederum nicht wahrgenommen und hat daher auch keinen negativen Effekt.
- **Unerhebliche Merkmale** sind ohne Belang für den Nutzer. Sie stiften keine Zufriedenheit und auch keine Unzufriedenheit.
- **Rückweisungsmerkmale** führen bei Vorhandensein zu Unzufriedenheit des Nutzers. Ein Fehlen des Merkmals wird vom Nutzer positiv wahrgenommen.

Die Differenz der Funktionswerte zweier Systemlösungen für ein beliebiges Optimierungskriterium X zum Iterationsschritt j kann nach Gleichung 5.51 berechnet werden. q_{opt} beschreibt in diesem Kontext die aktuell beste bekannte Systemlösung.

$$\Delta F_X(q) = X_N(q_j) - X_N(q_{opt}) \quad (5.51)$$

Der Kano-Funktionswert $\tilde{f}(q)$ lässt sich durch eine Fallunterscheidung anhand der Differenz der Funktionswerte zweier alternativer Systemlösungen (bspw. zwei konsekutive Iterationsschritte) nach Gleichung 5.51 für jedes Bewertungskriterium individuell berechnen. Die Fallunterscheidungen je Kano-Merkmalausprägung können den Gleichungen 5.52 bis 5.54 entnommen werden. Da im vorliegenden Fall ein Minimierungsproblem definiert wurde, wird eine Verbesserung des Funktionswertes zu -1 und eine Verschlechterung zu $+1$ definiert.

$$\text{Leistungsmerkmal: } \begin{cases} \Delta F_X(q) < 0 \rightarrow \tilde{f}(q) = -1 \\ \Delta F_X(q) = 0 \rightarrow \tilde{f}(q) = 0 \\ \Delta F_X(q) > 0 \rightarrow \tilde{f}(q) = +1 \end{cases} \quad (5.52)$$

$$\text{Basismerkmal: } \begin{cases} \Delta F_X(q) \leq 0 \rightarrow \tilde{f}(q) = 0 \\ \Delta F_X(q) > 0 \rightarrow \tilde{f}(q) = +1 \end{cases} \quad (5.53)$$

$$\text{Begeisterungsmerkmal: } \begin{cases} \Delta F_X(q) < 0 \rightarrow \tilde{f}(q) = -1 \\ \Delta F_X(q) \geq 0 \rightarrow \tilde{f}(q) = 0 \end{cases} \quad (5.54)$$

Anstatt nun den absoluten Wert der Funktionserfüllung eines Kriteriums für eine gegebene Lösungsalternative $F(q)$ nach Gleichung 5.50 zu berechnen, folgt die Optimierung dem Vorgehen einer iterativen Verbesserung des Funktionswertes $\Delta \tilde{F}(q)$. In Anlehnung an das Vorgehen aus Gleichung 5.49 kann eine gewichtete Summe über die Kano-Funktionswerte $\tilde{f}(q)$ der Menge aller Optimierungskriterien K_q des Montagearbeitsplatzes berechnet werden. Die Gleichung 5.55 bildet dabei immer einen Funktionswert $\Delta \tilde{F}(q)$ auf dem Intervall $[-1, 1]$ ab. Dieser Funktionswert dient als Entscheidungsgrundlage der iterativen Optimierung und definiert, ob eine Verbesserung in den relevanten Eigenschaften erzielt werden konnte, ohne die anderen Kriterien maßgeblich zu verschlechtern.

Der Einfluss eines Bewertungskriteriums auf das Optimierungsergebnis ist somit durch das Gewicht und die Ausprägung des Kano-Merkmals beeinflussbar und wird nicht durch potentiell falsche Bezugswerte der Normierung verzerrt.

$$\tilde{F}(q) = \sum_{j=1}^{|K_q|} (w_j \cdot \tilde{f}_j(q)) \quad (5.55)$$

Ausgehend von einer geratenen Startlösung q_0 werden in den heuristischen Lösungsverfahren alternative Systemlösungen generiert. Zur systematischen Verbesserung werden die iterierte Systemlösung q_j und die bisher beste Systemlösung q_{opt} gegenübergestellt und die Differenz der Fitnessfunktion $\Delta \tilde{F}(q)$ nach Gleichung 5.56 berechnet.

$$\Delta \tilde{F}(q) = \tilde{F}(q_j) - \tilde{F}(q_{opt}) \quad (5.56)$$

Entsprechend dem Ergebnis aus Gleichung 5.56 wird eine Fallunterscheidung getroffen (Gleichung 5.57), die über die Beibehaltung der aktuell besten Systemlösung oder die Reinitialisierung einer neuen besten Systemlösung entscheidet. Weitere Details zu den Imple-

mentierungen der heuristischen Lösungsverfahren und der verwendeten Vorgehensweisen finden sich in Kapitel 5.9.2.

$$\text{Fallunterscheidung: } \begin{cases} \Delta\tilde{F}(q) < 0 \rightarrow q_{opt} = q_j \\ \Delta\tilde{F}(q) \geq 0 \rightarrow q_{opt} = q_{opt} \end{cases} \quad (5.57)$$

5.9 Lösungsverfahren

Durch das in Kapitel 5.6 beschriebene Vorgehen können unterschiedliche Systemlösungen in Anlehnung an das Verfahren der Morphologie erzeugt werden. Die Fitnessfunktion aus Kapitel 5.7 erlaubt eine quantitative Bewertung der Eigenschaften, während das iterative Vorgehen aus Kapitel 5.8 einen Vergleich zweier Systemlösungen und damit eine schrittweise Optimierung ermöglicht.

Im Fall der Auswahl diskreter PPR-Tripel zur Verrichtung einer Montageaufgabe, kann der Lösungsraum als endlich, jedoch in Abhängigkeit der Menge unterschiedlicher PPR-Tripel je Montageschritt $|m_i|$ und der Anzahl der Montageschritte n als mitunter sehr groß betrachtet werden.

Unter der Annahme der Vollständigkeit der Informationsmodelle und der Validität der implementierten Regeln, gilt es die optimale Lösung q_{opt} in der Gesamtmenge aller validen Lösungen Q zu identifizieren. Das nachfolgende Kapitel beschreibt die hierzu betrachteten Lösungsverfahren des kombinatorischen Optimierungsproblems.

5.9.1 Entscheidungsbaumverfahren

Vollständige Enumeration

Durch Generierung und Bewertung aller möglichen Ressourcenkombinationen aus der Menge an PPR-Tripeln je Montageschritt kann ein vollständiger Lösungsbaum generiert und die beste Lösung identifiziert werden. Dieses Verfahren wird nach Domschke et al. (2015, S.134) vollständige Enumeration genannt. Das Vorgehen wird bspw. bei Pischke et al. (2018) oder Fechter et al. (2018) auf Anwendungsfälle der hybriden Montage mit kleinem Lösungsraums angewendet.

Das Finden einer optimalen Lösung q_{opt} kann bei Anwendung der vollständigen Enumeration garantiert werden, da alle Systemlösungen der Menge E und somit auch die Teilmenge der validen Lösungsalternativen $Q \subseteq E$ generiert, bewertet und miteinander verglichen werden.

Die Größe des Lösungsraums $|E|$ ergibt sich unter Annahme der Mächtigkeit der Menge potentieller Ressourcen je Prozessschritt $|m_i|$ und n Prozessschritten des Montageprozesses, unter der Annahme einer beliebigen Reihenfolge der Montageschritte, ohne Berücksichtigung einer limitierenden Präzedenz, nach Gleichung 5.7 zu:

$$|E| = \prod_{i=1}^n (|m_i|) \cdot n! \quad (5.58)$$

Durch die unterschiedliche Anzahl alternativer Ressourcen $|m_i|$ für jeden weiteren Montageschritt weist die Mächtigkeit der Menge $|E|$ exponentielles Verhalten auf (Gleichung 5.58). Das Optimierungsproblem verhält sich aus diesem Grund nichtdeterministisch, da sich eine optimale Lösung nicht mit vertretbarem Aufwand bestimmen lässt (Domschke et al. 2015, S.134).

Reale Anwendungsfälle der Montage besitzen im Hinblick auf ihre Produktstruktur einen Montagevorrang, der den Lösungsraum mitunter drastisch reduziert (Pischke et al. 2018). Da diese Abhängigkeit nicht pauschalisiert werden kann, wird im vorliegenden Fall vom schlechtesten Szenario einer beliebigen Verkettung der Prozessschritte einer Montageaufgabe ausgegangen, der sich im zweiten Term ($n!$) der Gleichung 5.58 widerspiegelt.

Anmerkung

Das Verfahren der vollständigen Enumeration soll im Zuge der Validierung der Methode (Kapitel 6) auf Anwendungsbeispiele mit einer beschränkten Anzahl an Montageschritten und einer Limitierung der Zahl möglicher Ressourcen angewendet werden ($|E| < 10^7$).

Die Begrenzung der Ressourcenmenge eines Montageschritts $|m_i|$ erfolgt anhand des Merkmals der technischen Eignung.

Das beschränkte Verfahren der vollständigen Enumeration betrachtet die Kombination der y technisch besten PPR-Tripel eines Montageschritts. Die Ressourcenkombinationen werden nach ihrer Generierung auf Plausibilität und Einhaltung der Randbedingungen überprüft, im Falle einer Konformität mit den Vorgaben quantitativ bewertet und entsprechend dem Ergebnis der Fitnessfunktion aus Gleichung 5.50 aufsteigend sortiert. Als Export steht eine

Bestenliste der generierten Systemlösungen an Montagearbeitsplätzen zur Verfügung, die einen Einblick in die zu untersuchende Gesamtheit an kombinatorischen Systemlösungen erlaubt.

Unvollständige Enumeration

Die Verfahren der unvollständigen oder begrenzten Enumeration (Branch-and-Bound, Branch-and-Cut) können die Lösungsfindung durch eine systematische Suche beschleunigen. Der aufzuspannende Lösungsbaum wird dabei unter Annahme von Relaxierungen des Problems¹⁹ gelöst und in Teilprobleme verzweigt (*Branching*).

Über das Verfahren der Abgrenzung (*Bounding*) können Schranken der Zielfunktion für Äste des Entscheidungsbaums identifiziert werden. Es wird versucht, den zu untersuchenden Lösungsraum klein zu halten, indem Zweige im aufgespannten Entscheidungsbaum als suboptimal identifiziert werden und damit aus der weiteren Untersuchung des Lösungsraums herausfallen (Domschke et al. 2015, S.140f).

Anmerkung

Es existieren drei relaxierbare Rand- und Nebenbedingungen (vgl. Kapitel 4.1.1), von denen sich insbesondere die »weichen« Randbedingungen der Montagekosten und der Taktzeit für eine Relaxierung des Problems eignen.

Von einer Relaxierung der »harten« Nebenbedingung, dass jeweils einmal die Ressource Mensch und Roboter in einem hybriden Montagearbeitsplatz vorhanden sein muss, wird abgesehen, da dies zu einer steigenden Anzahl ungültiger Systemlösungen und damit schlechteren Optimierungsgeschwindigkeiten führen würde.

Aufgrund des Fehlens eines ordnendes Element ist ein zielführendes *Branching* des Lösungsbaums, mit damit verbundener Abschätzung der Schranken nicht möglich. Durch die der Beschaffenheit der Optimierungskriterien können somit keine belastbaren Abschätzungen der Eigenschaftswerte anhand von Teilmengen der PPR-Lösungsmenge ermittelt werden.

Eine Abwandlung der Grundidee der unvollständigen Enumeration findet sich in den heuristischen Lösungsverfahren wieder. In Anlehnung an das Verfahren des *Branch-and-Cut*

¹⁹Temporäre Reduktion von Nebenbedingungen. Mögliche Randbedingungen können Kapitel 4.1.1 entnommen werden.

Einschränkung

Die Systemlösung einer Menge an PPR-Tripeln besitzt kein übergreifendes ordnendes Element. Eine Struktur des Entscheidungsbaums, bspw. entlang der Montagereihenfolge, kann zwar aus dem Produkt abgeleitet, aber erst nach Allokation der Ressourcen eindeutig definiert werden.

Eine vollständige Bewertung der Systemlösung ist damit erst nach Allokation aller Ressourcen eines Montageprozesses möglich. Bewertungen von Teilketten einer Systemlösung sind zwar technisch möglich, erlauben aber keine Aussage zur Fitness der Systemlösung, da sich Kriterien wie die Taktzeit, die Montagekosten oder die Stetigkeit erst aus der finalen Menge an PPR-Tripeln ergeben.

wird das heuristische Lösungsverfahren der *Tiefensuche* implementiert.

Dabei werden, entsprechend der aktuell getätigten Ressourcenauswahl, Zweige des Lösungsbaums abgeschnitten (*Cutting*), sollten diese die »harte« Nebenbedingung der Anzahl an Manipulationsressourcen verletzen (vgl. Gleichung 5.16). Dieses Vorgehen schränkt die Auswahlmöglichkeit weiterer Ressourcen und somit den Lösungsraum erheblich ein und führt zu einer beschleunigten Lösungsfindung.

Das beschriebene *Cutting* würde tendenziell auch mit der Nebenbedingung der maximalen Montagekosten funktionieren. Da die maximalen Montagekosten jedoch als »weiche« Nebenbedingung betrachtet werden können, wäre der Zugewinn an Optimierungsgeschwindigkeit voraussichtlich gering, da eine Vielzahl der so generierten Systemlösungen im Zuge der Plausibilitätsprüfung mit der »harten« Nebenbedingung der Ressourcenauswahl wieder gestrichen werden müssten. Es ist jedoch denkbar, die »harte« Nebenbedingung der Ressourcenauswahl mit einer »weichen« Nebenbedingung zu kombinieren, um die Wahrscheinlichkeit der Generierung ungültiger Systemlösungen zu reduzieren und damit die Geschwindigkeit der Optimierung zu erhöhen.

Die Nebenbedingung der maximalen Taktzeit ist im Kontext des *Cutting* nicht anwendbar, da durch das Fehlen eines ordnenden Elements, keine Aussage zur Taktzeit gemacht werden kann, bevor jedem Montageschritt ein PPR-Tripel zugeordnet wurde.

5.9.2 Heuristische Lösungsverfahren

Die grundlegende Funktionsweise heuristischer Lösungsverfahren wurde bereits in Kapitel 3.3.3 beschrieben. Die in dieser Arbeit implementierten heuristischen Methoden sollen in den nachfolgenden Unterkapiteln in ihrer Vorgehensweise der Optimierung erläutert werden. Alle Verfahren erfüllen die Bedingung, dass zu jedem Zeitpunkt, selbst bei Abbruch der heuristischen Suche, eine valide Lösung vorliegt (anytime condition).

Je nach Lösungsansatz unterscheiden sich die Vorgehensweisen bspw. im Schritt der Akzeptanz neuer oder der Generierung alternativer Systemlösungen. Insbesondere im Fall der lokalen Such- und Verbesserungsverfahren sind auch temporär schlechtere Lösungen ($\Delta\tilde{F}(q) \geq 0$) denkbar, um lokale Minima der Optimierung wieder zu verlassen.

Greedy-Algorithmus

Ein einfaches heuristisches Verfahren wird durch den *Greedy-Algorithmus* beschrieben. Das Vorgehen stellt ein Eröffnungsverfahren dar (Domschke et al. 2015, S.136) und gehört zur Klasse der strikt verbessernden Heuristiken (Salhi 2017, S.16). Neue Systemlösungen werden zufällig generiert und mit dem Ergebnis der bisher besten Lösung verglichen. Im Falle einer iterativen Verbesserung nach Gleichung 5.57 wird die neue Systemlösung akzeptiert und die Fitness nach Gleichung 5.50 berechnet.

Das Verfahren kann mit dem Vorgehen »Ziehen mit Zurücklegen« des Urnenmodells der Wahrscheinlichkeitstheorie verglichen werden. Für jeden Montageschritt wird eine »Lostrommel« mit möglichen Ressourcen $k_{ij} \in m_i$ initialisiert – vgl. Abbildung 5.12.

Für jede Teilmenge an Ressourcen wird eine stetige Gleichverteilung angenommen. Aufgrund der unterschiedlichen Mächtigkeiten der Ressourcenmengen $|m_i|$ ergeben sich unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten der Auswahl eines PPR-Tripels aus der Lostrommel. Durch das blinde Ziehen einer Ressource für jeden Montageschritt wird jeweils ein PPR-Tripel $(x_i \in (t_i, k))$ instanziiert, der als Baustein des Montagearbeitsplatzes verwendet wird. Nach jedem Durchlauf werden alle Ressourcen zurück in die Lostrommeln gelegt, so dass die nächste Iteration erneut auf alle Ressourcen zugreifen kann. Der Pseudocode 5.1 beschreibt das Vorgehen.

```

1 Initialisiere die maximale Iterationszahl:  $j_{max}$ 
2 Generiere eine zufällige Startlösung:  $q_0$ 
3 while  $j < j_{max}$  do
4   | Generiere eine neue zufällige Systemlösung:  $q_j$ 
5   | forall  $i \in I$  do
6   |   | Wähle eine zufällige Ressource:  $k_{j,i} \in m_i \rightarrow q_j$ 
7   |   end
8   | Prüfe die Lösung  $q_j$  auf Validität mit den Randbedingungen:  $q_j \in Q$ 
9   | if  $q_j \in Q$  then
10  |   | Bilde die Differenz der Systemlösungen:  $\Delta\tilde{F}(q) = \tilde{F}(q_j) - \tilde{F}(q_{opt})$ 
11  |   | if  $\Delta\tilde{F}(q) < 0$  then
12  |   |   | Initialisiere die neue beste Lösung:  $q_{opt} = q_j$ 
13  |   |   end
14  |   end
15  | Erhöhe den Iterationszähler:  $j = j + 1$ 
16 end

```

Pseudocode 5.1: Vorgehen des Greedy-Algorithmus

Das Verfahren kann im Ansatz mit einer Monte-Carlo-Simulation verglichen werden. Je größer die Anzahl der Iterationen und somit die untersuchte Teilmenge möglicher Montagearbeitsplätze gewählt wird, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die optimale Lösung in dieser Teilmenge enthalten ist (vgl. Gesetz der großen Zahlen). Die zu erwartende Abweichung der Ergebnisqualität zwischen optimaler Lösung q_{opt} und der zum Iterationszeitpunkt besten Systemlösung q_j des *Greedy-Algorithmus* sinkt aus genannten Gründen für eine große Zahl an Iterationen.

Simulated Annealing

Das Verfahren des *Simulated Annealings* kann den lokalen Such- und Verbesserungsverfahren zugeordnet werden und stellt eine probabilistische Variante des *Threshold-Accepting-Algorithmus* dar. Im Gegensatz zum *Greedy-Algorithmus* weist das Lösungsverfahren ein gerichtetes Verhalten auf, da in jedem Optimierungsschritt eine Nachbarschaftslösung gesucht wird. Eine Nachbarschaftslösung ist als eine Systemlösung definiert, die sich in einem PPR-Tripel von der aktuell besten Lösung q_{opt} unterscheidet. Die Generierung erfolgt durch Mutation eines zufälligen PPR-Tripels unter Berücksichtigung der »harten« Nebenbedingung der Ressourcenauswahl (vgl. Gleichung 5.16).

Stellt die Nachbarschaftslösung eine Verbesserung nach Gleichung 5.57 dar, wird diese übernommen. Sollte keine Verbesserung erzielt werden ($\Delta\tilde{F}(q) \geq 0$), so besteht die Möglichkeit der Akzeptanz der Systemlösung trotz Verschlechterung der Fitnessfunktion. Auf diese Art können lokale Minima der heuristischen Lösungssuche vermieden und neue Nachbarschaftslösungen exploriert werden.

Die Wahrscheinlichkeit der Akzeptanz einer schlechteren Systemlösung ist dabei an eine stetig fallende Akzeptanzschwelle gekoppelt. Dies führt dazu, dass gerade zu Beginn der Optimierung vermehrt schlechtere Lösungen akzeptiert werden, um potentielle lokale Minima wieder zu verlassen. Das Vorgehen ist in Pseudocode 5.2 beschrieben.

```

1 Initialisiere die maximale Iterationszahl:  $j_{max}$ 
2 Wähle eine monoton gegen null fallende Folge positiver Temperaturwerte:  $T_t$ 
3 Generiere eine zufällige Startlösung:  $q_0$ 
4 while  $j < j_{max}$  do
5     Generiere eine ganze Zahl:  $i^* \in I$ 
6     Generiere eine neue Nachbarschaftslösung:  $q_j$ 
7     forall  $i \in I$  do
8         if  $i = i^*$  then
9             Wähle eine alternative Ressource:  $k_{j,i}^* \in m_i$ 
10            Ersetze die Ressource:  $k_{j,i}^* \rightarrow k_{j,i}$ 
11        end
12    end
13    Prüfe die Lösung  $q_j$  auf Validität mit den Randbedingungen:  $q_j \in Q$ 
14    if  $q_j \in Q$  then
15        Bilde die Differenz der Systemlösungen:  $\Delta\tilde{F}(q) = \tilde{F}(q_j) - \tilde{F}(q_{opt})$ 
16        if  $\Delta\tilde{F}(q) < 0$  then
17            Initialisiere die neue beste Lösung:  $q_{opt} = q_j$ 
18        else
19            Generiere eine Zufallszahl:  $r \in [0, 1]$ 
20            Berechne die aktuelle Akzeptanzschwelle:  $p = e^{-\frac{1}{T_t}}$ 
21            if  $r < p$  then
22                Akzeptiere die potentiell schlechtere Lösung:  $q_{opt} = q_j$ 
23            end
24        end
25    end
26    Senke die Temperaturschwelle:  $T_t = T_t(1 - \delta t)$ 
27    Erhöhe den Iterationszähler:  $j = j + 1$ 
28 end

```

Pseudocode 5.2: Vorgehen des Simulated Annealings

Tiefensuche

Die *Tiefensuche* basiert auf dem Prinzip der unvollständigen Enumeration (vgl. Kapitel 5.9.1). Die Suche orientiert sich auf Makroebene am Vorgehen des *Greedy-Algorithmus*, verwendet aber zusätzliche Schritte, um die Menge potentieller Ressourcen $|m_i|$ je Montageschritt zu limitieren und die zufällige Generierung ungültiger Lösungen zu vermeiden. Sollte bereits ein Modell der Manipulationsressourcen definiert sein, so wird dieses bei den nachfolgenden Auswahlentscheidungen der Ressourcenallokation berücksichtigt. Durch das Vorgehen wird die Auswahl an Ressourcen je Prozessschritt eingeschränkt und die Lösungssuche beschleunigt. Das formale Vorgehen der *Tiefensuche* ist in Pseudocode 5.3 beschrieben.

In der vorliegenden Implementierung verwendet die *Tiefensuche* keine stetige Gleichverteilung im Schritt der Ressourcenallokation. Die Wahrscheinlichkeit der Selektion einer Ressource orientiert sich vielmehr an einer Dreiecksfunktion. Die technisch beste Ressourcenlösung hat in diesem Fall die höchste Wahrscheinlichkeit gezogen zu werden – siehe Abbildung 5.14.

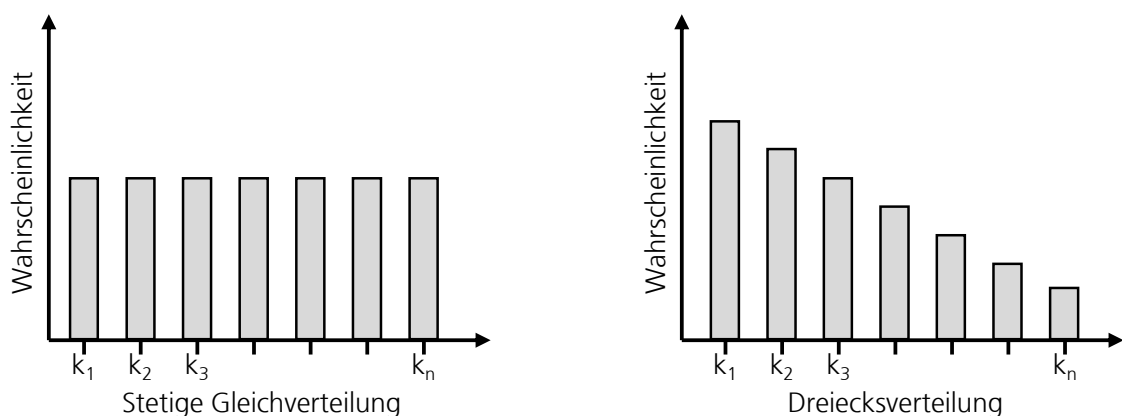


Abbildung 5.14: Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsverteilung bei der Selektion einer Ressource $k_{i,j}$ aus der Menge an Ressourcen m_i , Vergleich der Ansätze stetiger Gleichverteilung und ungleichförmiger Verteilung (Dreiecksfunktion)

Hybride Algorithmen

Hybride Algorithmen kombinieren die Lösungsansätze und Eigenschaften der heuristischen Eröffnungsverfahren, lokalen Suche- und Verbesserungsverfahren und unvollständig exakten Verfahren (Domschke et al. 2015, S.135f). Die in dieser Arbeit verwendeten Ansätze

```

1 Initialisiere die maximale Iterationszahl:  $j_{max}$ 
2 Generiere eine zufällige Startlösung:  $q_0$ 
3 while  $j < j_{max}$  do
4   | Generiere eine neue zufällige Systemlösung:  $q_j$ 
5   | forall  $i \in I$  do
6   |   | Reduziere die Ressourcenauswahl entsprechend Nebenbedingung:  $m_{i,red}$ 
7   |   | Wähle eine zufällige Ressource:  $k_{j,i} \in m_{i,red} \rightarrow q_j$ 
8   | end
9   | Prüfe die Lösung  $q_j$  auf Validität mit den Randbedingungen:  $q_j \in Q$ 
10  | if  $q_j \in Q$  then
11  |   | Bilde die Differenz der Systemlösungen:  $\Delta\tilde{F}(q) = \tilde{F}(q_j) - \tilde{F}(q_{opt})$ 
12  |   | if  $\Delta\tilde{F}(q) < 0$  then
13  |   |   | Initialisiere die neue beste Lösung:  $q_{opt} = q_j$ 
14  |   | end
15  | end
16  | Erhöhe den Iterationszähler:  $j = j + 1$ 
17 end

```

Pseudocode 5.3: Vorgehen der Tiefensuche

des *Single-* und *Multi-Swap-Algorithmus* kombinieren die Eigenschaften eines *Greedy-Eröffnungsverfahrens* mit der Rekombination von PPR-Tripeln je Montageschritt zweier individueller Systemlösungen. Das Vorgehen der Rekombination ist dabei dem populationsbasierten Verfahren der *Evolutionären Algorithmen* entnommen.

Durch Vergleich und Rekombination der PPR-Tripel je Montageschritt zweier unterschiedlicher Systemlösungen kann eine neue Lösung q^* generiert werden, die im Idealfall die Vorteile der beiden Lösungen kombiniert. Das Vorgehen des *Single-Swap-Algorithmus* ist im Pseudocode 5.4 beschrieben.

Die PPR-Tripel zweier Systemlösungen werden paarweise für jeden Montageschritt, in Bezug auf die Differenz der Fitnessfunktion $\Delta\tilde{F}(x_i)$ verglichen. Im Fall des *Single-Swap-Algorithmus* wird das PPR-Tripel mit der größten negativen Differenz (größtes Verbesserungspotential) der Fitnessfunktion $\Delta\tilde{F}(x_{i^*})$ an der so identifizierten Stelle i^* getauscht. Gleichung 5.59 beschreibt das Vorgehen.

$$\Delta\tilde{F}(x_{i^*}) = \min\{\Delta F_x(x_1), \Delta F_x(x_2), \dots, \Delta F_x(x_n)\} \quad (5.59)$$

Sollten mehrere PPR-Tripel die identische Differenz aufweisen, wird zufällig ein Montageschritt mit maximaler Differenz ausgewählt und der Tausch vollzogen. Die aus der aktuell besten Lösung q_{opt} durch Vertauschung an der Stelle i^* gewonnene neue Lösung


```

1 Initialisiere die maximale Iterationszahl:  $j_{max}$ 
2 Generiere eine zufällige Startlösung:  $q_{opt}$ 
3 while  $j < j_{max}$  do
4   | Generiere eine neue zufällige Systemlösung:  $q_j$ 
5   | forall  $i \in I$  do
6   |   | Wähle eine zufällige Ressource:  $k_{j,i} \in m_i \rightarrow q_j$ 
7   |   | end
8   |   | Prüfe die Lösung  $q_j$  auf Validität mit den Randbedingungen:  $q_j \in Q$ 
9   |   | if  $q \in Q$  then
10  |   |   | Bilde die Differenz der Systemlösungen:  $\Delta\tilde{F}(q) = \tilde{F}(q_j) - \tilde{F}(q_{opt})$ 
11  |   |   | if  $\Delta\tilde{F}(q) < 0$  then
12  |   |   |   | Initialisiere die neue beste Lösung:  $q_{opt} = q_j$ 
13  |   |   |   | else
14  |   |   |   |   | forall  $i \in I$  do
15  |   |   |   |   |   | Bilde die Differenz der PPR-Tripel:  $\Delta\tilde{F}(x_i) = \tilde{F}(x_{j,i}) - \tilde{F}(x_{opt,i})$ 
16  |   |   |   |   |   | end
17  |   |   |   |   |   | Wähle die Stelle  $i^* \in I$  mit der größten negativen Differenz:  $max\{\Delta\tilde{F}(x_i)\}$ 
18  |   |   |   |   |   | Bilde die neue Lösung  $q_{opt}^*$  durch Vertauschen:  $k_{j,i^*} \rightarrow k_{opt,i^*}$ 
19  |   |   |   |   |   | Prüfe die neue Lösung  $q_{opt}^*$  auf Validität mit den Randbedingungen:  $q_{opt}^* \in Q$ 
20  |   |   |   |   |   | if  $q_{opt}^* \in Q$  then
21  |   |   |   |   |   |   | Bilde die Differenz der Systemlösungen:  $\Delta\tilde{F}(q^*) = \tilde{F}(q_{opt}^*) - \tilde{F}(q_{opt})$ 
22  |   |   |   |   |   |   | if  $\Delta\tilde{F}(q^*) < 0$  then
23  |   |   |   |   |   |   |   | Initialisiere die neue beste Lösung:  $q_{opt} = q_{opt}^*$ 
24  |   |   |   |   |   |   |   | end
25  |   |   |   |   |   |   | end
26  |   |   |   |   |   | end
27  |   |   |   |   | end
28  |   |   |   |   | Erhöhe den Iterationszähler:  $j = j + 1$ 
29 end

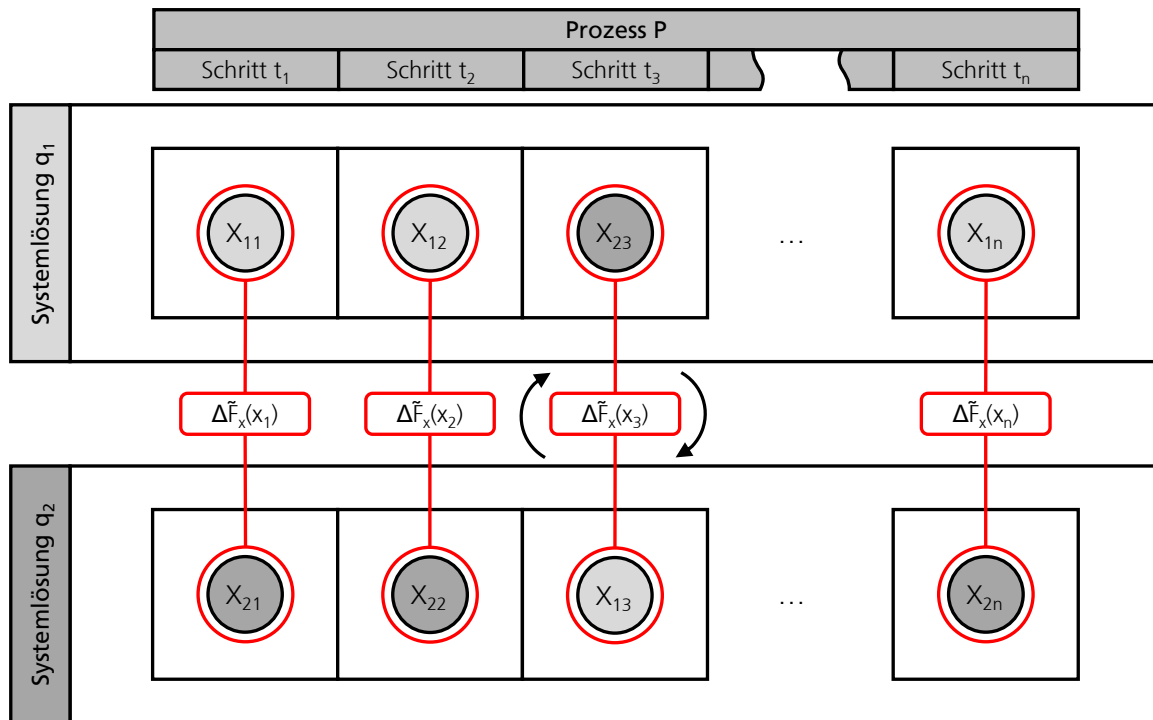
```

Pseudocode 5.4: Single-Swap-Algorithmus

q_{opt}^* wird im Nachgang auf Plausibilität und Einhaltung der Rand- und Nebenbedingungen geprüft. Sollten diese erfüllt sein, wird die Differenz $\Delta\tilde{F}(q^*)$ der Funktionswerte beider Systemlösungen gebildet. Im Fall einer negativen Differenz wird q_{opt}^* als neues Optimum beibehalten.

In Abbildung 5.15 ist das Vertauschen der PPR-Tripel der *Single-* und *Multi-Swap-Algorithm*en dargestellt. Die größte Differenz der Funktionswerte $\Delta\tilde{F}_x(x_i)$ ergibt sich in dieser Darstellung für das PPR-Tripel x_3 .

Aus diesem Grund werden die beiden PPR-Tripel x_{13} und x_{23} miteinander getauscht. Es entstehen zwei neue Systemlösungen q_1^* und q_2^* von denen q_1^* im Fall einer negativen Differenz nach Gleichung 5.56 weiter verfolgt wird.



Legende: q: Arbeitsplatz-Systemlösung, t: Montageschritt, n: Menge der Montageschritte, x: PPR-Tripel

Abbildung 5.15: Darstellung der Rekombination von PPR-Tripeln zur Generierung optimierter Systemlösungen am Beispiel des Single-Swap-Algorithmus

Das gleiche Vorgehen kann auch für alle Montageschritte mit negativer Differenz der Funktionswerte durchgeführt werden. Hierbei wird die Suche nach der maximalen Differenz (Zeile 17, Pseudocode 5.4) weggelassen. Dieses heuristische Vorgehen wird *Multi-Swap-Algorithmus* genannt.

Das Verfahren des *Optimized Single-Swap* kombiniert die Verfahren des *Single-Swap* und *Multi-Swap*. Sollte mit dem Tausch des PPR-Tripels eine neue Manipulationsressource (bspw. ein zweiter Roboter) in der Ressourcenliste der Systemlösung q_{opt}^* auftauchen, so führt dies unter Berücksichtigung der »harten« Nebenbedingung der Anzahl unterschiedlicher Manipulationsressourcen (Pseudocode 5.4, Zeile 19) zu einer ungültigen Lösung.

In der Vorgehensweise des *Optimized Single-Swap* werden daher in einem Zwischenschritt (Pseudocode 5.5, Zeile 20-24) alle PPR-Tripel mit der alten Manipulationsressource auf den neuen Ressourcentyp des getauschten PPR-Tripels umgestellt, so dass wieder eine valide Lösung vorliegt.

```

1 Initialisiere die maximale Iterationszahl:  $j_{max}$ 
2 Generiere eine zufällige Startlösung:  $q_{opt}$ 
3 while  $j < j_{max}$  do
4   | Generiere eine neue zufällige Systemlösung:  $q_j$ 
5   | forall  $i \in I$  do
6   |   | Wähle eine Ressource:  $k_{j,i} \in m_i \rightarrow q_j$ 
7   | end
8   | Prüfe die Lösung  $q_j$  auf Validität mit den Randbedingungen:  $q_j \in Q$ 
9   | if  $q_j \in Q$  then
10  |   | Bilde die Differenz der Systemlösungen:  $\Delta\tilde{F}(q) = \tilde{F}(q_j) - \tilde{F}(q_{opt})$ 
11  |   | if  $\Delta\tilde{F}(q) < 0$  then
12  |   |   | Initialisiere die neue beste Lösung:  $q_{opt} = q_j$ 
13  |   | else
14  |   |   | forall  $i \in I$  do
15  |   |   |   | Bilde die Differenz der PPR-Tripel:  $\Delta\tilde{F}(x_i) = \tilde{F}(x_{j,i}) - \tilde{F}(x_{opt,i})$ 
16  |   |   | end
17  |   |   | Wähle die Stelle  $i^* \in I$  mit der größten negativen Differenz:  $\max\{\Delta\tilde{F}(x_i)\}$ 
18  |   |   | Bilde die neue Lösung  $q_{opt}^*$  durch Vertauschen:  $k_{j,i^*} \rightarrow k_{opt,i^*}$ 
19  |   |   | Prüfe der Konsistenz der Manipulationsressource in  $q_{opt}^*$ :
20  |   |   | forall  $i \in I$  do
21  |   |   |   | if  $(k_{opt,i}^* \notin K_H) \vee (k_{opt,i}^* \notin K_R)$  then
22  |   |   |   |   | Wähle die passende Manipulationsressource:  $k_{j,i^*}$ 
23  |   |   |   |   | Tausche die Manipulationsressource:  $k_{j,i^*} \rightarrow k_{opt,i}^*$ 
24  |   |   |   | end
25  |   |   | end
26  |   |   | Prüfe die neue Lösung  $q_{opt}^*$  auf Validität mit den Randbedingungen:  $q_{opt}^* \in Q$ 
27  |   |   | if  $q_{opt}^* \in Q$  then
28  |   |   |   | Bilde die Differenz der Systemlösungen:  $\Delta\tilde{F}(q^*) = \tilde{F}(q_{opt}^*) - \tilde{F}(q_{opt})$ 
29  |   |   |   | if  $\Delta\tilde{F}(q^*) < 0$  then
30  |   |   |   |   | Initialisiere die neue beste Lösung:  $q_{opt} = q_{opt}^*$ 
31  |   |   |   | end
32  |   |   | end
33  |   | end
34  | end
35  | Erhöhe den Iterationszähler:  $j = j + 1$ 
36 end

```

Pseudocode 5.5: Optimized Single-Swap-Algorithmus

6 Validierung und kritische Bewertung der entwickelten Methode

Das Kapitel beschäftigt sich mit der Validierung der entwickelten Methode und Lösungsverfahren anhand realer Anwendungsbeispiele. Das Vorgehen der Validierung gliedert sich dafür in zwei Stufen. In einem ersten Schritt werden drei Anwendungsbeispiele in einem manuellen Prozess von erfahrenen Montageplanern konzipiert und die so erzielten Systemlösungen dahingehend untersucht, ob und inwieweit sie in dem beschriebenen methodischen Vorgehen aus Kapitel 5 reproduziert werden können. Auf diese Art können die Annahmen und Modelle, insb. der Informationsmodellierung, validiert werden.

In einem zweiten Schritt werden die Ergebnislisten einer kombinatorischen Lösungssuche (vollständige Enumeration) den Ergebnissen der heuristischen Lösungsverfahren gegenübergestellt. Die Kennwerte der Optimierung (bspw. Optimierungszeit, erreichte Fitness, ...) erlauben es, die Leistungsfähigkeit der heuristischen Lösungsverfahren zu vergleichen und ein präferiertes Lösungsverfahren zu identifizieren.

6.1 Anwendungsbeispiele

Die Zusammenstellung der Anwendungsbeispiele orientiert sich an typischen Baugruppen der Vor- und Endmontage der Stückgüterindustrie, wie sie in verschiedenen Industrie- und Forschungsprojekten am Fraunhofer IPA behandelt werden. Allen Anwendungsbeispielen gemein war der Wunsch, durch Einsatz der MRK-Technologie eine flexible, anpassungsfähige und skalierende Montage, unter Berücksichtigung der sich wandelnden wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu erzielen.

6.1.1 Baugruppe mit Schraubverbindung

Die Schraubbaugruppe stellt das Minimalbeispiel einer Baugruppe dar und ist explizit keinem realen Anwendungsfall entliehen. Vergleichbare Aufgabenstellungen, hinsichtlich Fügeverfahren und Teilezahl, waren mehrfach Inhalt von Kundenanfragen am Fraunhofer IPA in Bezug auf die Planung und Auslegung von MRK-Montagearbeitsplätzen. Das Beispiel beinhaltet die kraftschlüssige Verbindung zweier Einzelteile mittels drehmomentengesteuertem Schrauben. Eine Illustration der Baugruppe findet sich in Abbildung 6.1.

Das Anwendungsbeispiel wurde im Laufe der Entwicklung der Methode für mehrere wissenschaftlichen Veröffentlichungen verwendet, um die Fähigkeiten der automatischen Systemoptimierung über die verschiedenen Ausbaustufen der Methodik aufzuzeigen (Fechter et al. 2018; Fechter & Neb 2019; Fechter et al. 2019a; Fechter et al. 2019b).

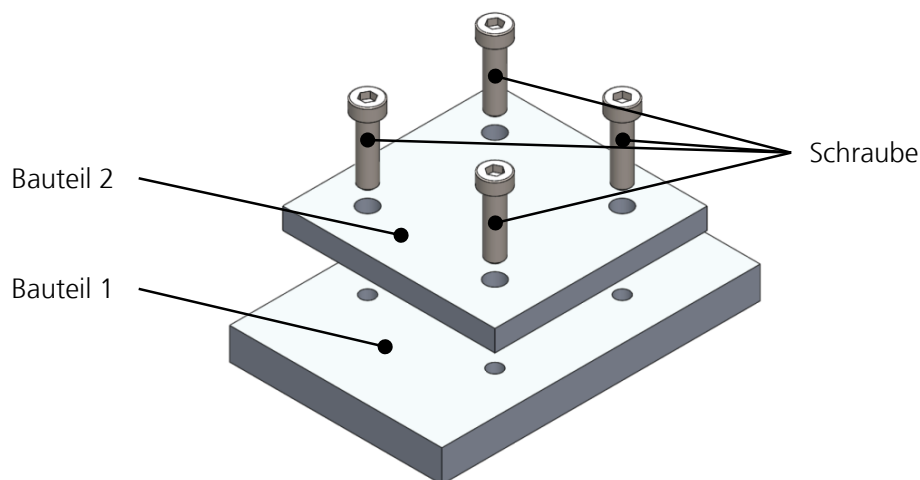


Abbildung 6.1: Anwendungsbeispiel »Schraubbaugruppe«

Die relevanten Eigenschaften aller Einzelteile und der Baugruppe, sind in Tabelle D.2 beschrieben und unterliegen fiktiven Annahmen. Es geht in diesem Anwendungsfall vornehmlich darum, die Parallelisierung der Montageschritte durch MRK aufzuzeigen, da mit dem vierfachen Schraubvorgang ein Prozess mit langer Dauer und hoher Automatisierungseignung vorliegt. Die Handhabungsschritte (Vereinzelung, Positionierung) wiederum weisen eine geringere Automatisierungseignung auf, so dass diese prädestiniert für eine manuelle Verrichtung sind.

6.1.2 Aufnahme Dachgepäckträger

Im Forschungsprojekt »Lean Intelligent Assembly Automation« LIAA (2013) wurde die Aufnahme eines PKW-Dachgepäckträgers hinsichtlich der Eignung und des Mehrwerts für die hybride Montage untersucht. Die Baugruppe besteht aus zwei umgeformten Blechteilen, die mittels Nieten gefügt werden – siehe Abbildung 6.2.

Die Planung der Arbeitsteilung der MRK und die Implementierung eines hybriden Montagearbeitsplatzes in Bezug auf die Arbeitssicherheit waren Schwerpunkt der Arbeiten am Fraunhofer IPA . Es wurden insgesamt drei alternative Montagearbeitsplätze implementiert und hinsichtlich prozess- und sicherheitstechnischer Kriterien optimiert. Die Ergebnisse eines Systementwurfs unter Berücksichtigung der funktionalen Sicherheit im Anwendungsfall des Nietens finden sich bei Awad & Fechter (2016) und Awad et al. (2017).

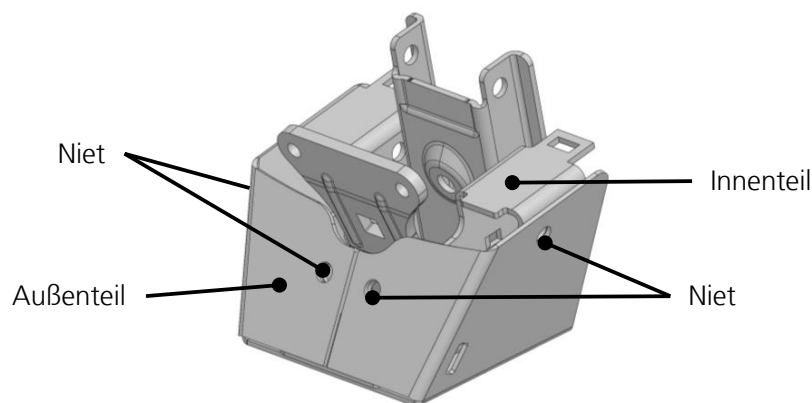


Abbildung 6.2: Anwendungsbeispiel »Aufnahme Dachgepäckträger«

Das Anwendungsbeispiel eignet sich gut für die Validierung der entwickelten Methode, da bereits viele Überlegungen zur Arbeitsteilung im hybriden Systementwurf erfolgt sind und dokumentiert vorliegen. Es kann auf eine Reihe unterschiedlicher Systementwürfe zurückgegriffen werden und es liegen exakte Daten der Optimierungsziele und Randbedingungen eines produzierenden Unternehmens vor, die in den Tabellen D.3 und D.4 beschrieben sind. Dies betrifft bspw. die detaillierte Bereitstellung der Einzelteile inkl. Definition der Gebinde, die Vorgabe der maximalen Taktzeit, wie auch Betrachtungen hinsichtlich einer Stetigkeit der Montageschritte.

6.1.3 Vormontage Schwenklager

Der dritte Anwendungsfall befasst sich mit einer »Dritte-Hand-Applikation«, wie sie typisch für die Mensch-Roboter-Kollaboration ist. Dabei wird insb. in den Montageschritten des Positionierens schwerer, unhandlicher Bauteile auf die Unterstützung eines Roboters im kollaborativen Betrieb (vgl. Abbildung 2.7) zurückgegriffen.

Abbildung 6.3 illustriert die Baugruppe und Montageschritte. Informationen zu den Eigenschaften der Einzelteile können Tabelle D.6 entnommen werden. Die komplette Montageaufgabe besteht aus der Montage des Abschirmblechs, der Bremsscheibe und des Bremssattels an das Schwenklager einer Einzerradaufhängung.

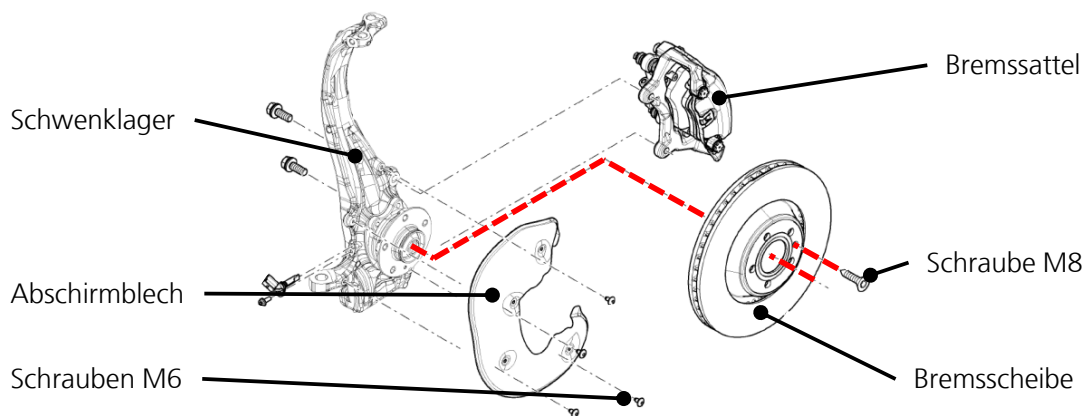


Abbildung 6.3: Anwendungsbeispiel »Vormontage Schwenklager«

Das Anwendungsbeispiel war Bestandteil einer MRK-Untersuchung im Kundenprojekt und ist daher gut dokumentiert. Es galt, einen hybriden Montagearbeitsplatz zu entwerfen, der die Varianz der Montageaufgabe (3 Schwenklager, 10 Bremsscheiben, 3 Bremssättel) beherrscht und den Werker in seinen Tätigkeiten ergonomisch entlastet. Insbesondere die Manipulation der Bremsscheibe mit einem Einzelgewicht von bis zu 15 kg stellt eine hohe Belastung für sich wiederholende manuelle Tätigkeiten dar (Berufsgenossenschaft Holz und Metall 2013, S.40f). Dies muss bei der Arbeitsteilung berücksichtigt werden.

Die Schraube M8 hat die Funktion der Sicherung der Bremsscheibe bis zum Anzug der Zentralschraube, der in einem nachgelagerten Montagearbeitsplatz erfolgt. Die Montageumfänge des Abschirmblechs und des Bremssattels sind Arbeitsinhalte anderer Montagetakte und somit für die zu adressierende Planung nicht relevant.

Für den Anwendungsfall ergeben sich hohe Anforderungen an die Taktzeit, da der Montagearbeitsplatz direkt (Just-in-Sequence, JIS) die Vormontagestrecke des Fahrwerks beliefert.

6.2 Vorgehensweise der Validierung

Eine absolute Validierung der Qualität der heuristischen und kombinatorischen Lösungsverfahren ist aufgrund der Komplexitätsklasse des Optimierungsproblems (NP-schwer, siehe Kapitel 5.4) und der hohen Wahrscheinlichkeit der Unvollständigkeit zugrundeliegender Daten- und Informationsmodelle nicht möglich. Diesen Umständen soll mit einem zweistufigen Verfahren der Validierung nach Abbildung 6.4 begegnet werden, das in den nachfolgenden Kapiteln detailliert beschrieben wird.

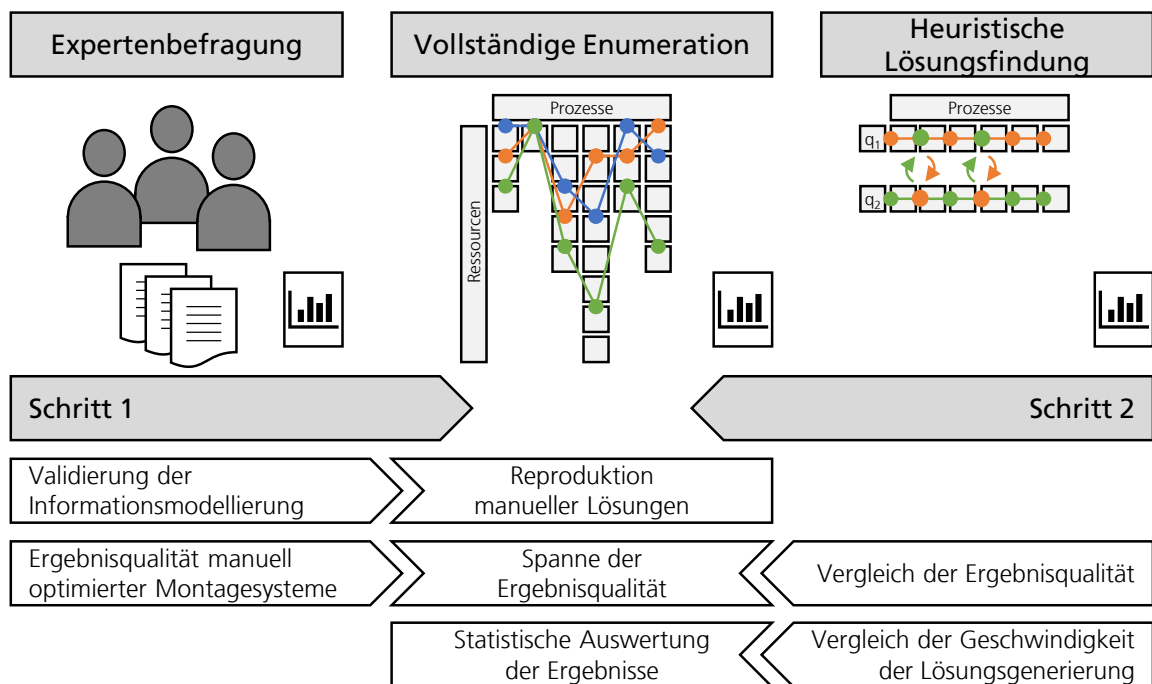


Abbildung 6.4: Zweistufiges Vorgehen der Validierung

Generell gilt, dass die Validierung mit identischen Optimierungsparametern und Randbedingungen erfolgt, so dass eine Vergleichbarkeit zwischen der manuellen Konzeption, der vollständigen Enumeration des Lösungsraums und den heuristischen Lösungsverfahren gegeben ist. Diese Werte können in den Tabellen D.1 - D.6 eingesehen werden.

Die vier Optimierungskriterien der Montagekosten, der Taktzeit, des Montagewirkungsgrades und der mittleren technischen Eignung der verwendeten Ressourcen (Informationsge-

halt) eines Montagearbeitsplatzes werden für die Validierung herangezogen und zu gleichen Teilen gewichtet. Für den direkten Vergleich unterschiedlicher PPR-Tripel im Anwendungsfall hybrider Heuristiken (vgl. Abbildung 5.15) wird auf den Informationsgehalt zurückgegriffen. Entsprechend Kapitel 5.8 sind alle Optimierungskriterien als »Leistungsmerkmal« definiert. Sie können somit einen positiven und negativen Effekt auf das Optimierungsergebnis in einem Iterationsschritt haben.

Die Definition der Kriterien und ihre Gewichtung kann in Tabelle D.7 nachgelesen werden. Für die manuelle Referenzgruppe und die automatische Optimierung gelten die gleichen Rand- und Nebenbedingungen.

6.2.1 Vergleich mit Expertenlösung

Eine Expertengruppe, bestehend aus erfahrenen Montageplanern, wurde mit zwei Anwendungsbeispielen (»Schraubbaugruppe«, »Aufnahme Dachgepäckträger«) konfrontiert und um einen manuellen Systementwurf gebeten.

Der Schwerpunkt der Expertenbefragung liegt auf der Auswahl der Ressourcen, deren Zuordnung zu Montageschritten und die daraus folgende Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter. Die so generierten Expertenlösungen können mit den Ergebnislisten der vollständigen Enumeration verglichen und hinsichtlich ihrer individuellen Lösungsqualität bewertet werden.

Für den Fall, dass bei der manuellen Expertenlösung neue, bisher unbekannte Ressourcentypen oder Zuordnungsregeln auftreten sollten, werden diese gesammelt und nachfolgend implementiert. Damit wird sichergestellt, dass die Informationsmodellierung in der Lage ist, die Lösungsbreite einer manuellen Systemlösung zu reproduzieren. Ebenso kann durch diese Prüfung sichergestellt werden, dass alle manuell generierten Lösungen auch in der Ergebnisliste der vollständigen Enumeration enthalten sind.

Zusätzlich wird die Wichtigkeit der identifizierten Optimierungskriterien erörtert und potentiell fehlende Kriterien abgefragt. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass alle relevanten Kriterien aus Expertensicht in der Methode Berücksichtigung finden.

6.2.2 Vergleich der automatisierten Lösungsverfahren

Die heuristischen Lösungsverfahren aus Kapitel 5.9.2 werden dahingehend untersucht, inwieweit sie helfen, den zeitintensiven Prozess der vollständigen Enumeration des Lösungsraums zu beschleunigen. Die Ergebnisse der heuristischen Optimierung werden dafür mit den Ergebnislisten der vollständigen Enumeration verglichen.

Da alle heuristischen Lösungsverfahren auf stochastische Effekte bei der Ressourcenauswahl im Schritt der Generierung alternativer Systemlösungen zurückgreifen, soll über statistische Auswertungen einer Stichprobe an Optimierungsvorgängen mit identischen Parametern, die mittlere Qualität und der mittlere Zeitbedarf der Optimierung berechnet und miteinander verglichen werden (Salhi 2017, S.11f). Ziel ist es, die Heuristik zu identifizieren, die das beste Verhältnis von Aufwand (Zeitbedarf) und Nutzen (Ergebnisqualität, vgl. Gleichung 6.1, 6.2) erzielt.

Zur Bewertung der Optimierungsergebnisse wird zwischen einer absoluten und einer relativen Ergebnisqualität G unterschieden. Beide Werte berechnen sich aus den Funktionswerten nach Gleichung 5.49. Die relative Ergebnisqualität $G_{rel}(q)$ einer Systemlösung bezieht sich allein auf das Optimum der vollständigen Enumeration $F_q(q_{opt})$ – siehe Gleichung 6.1.

$$G_{rel}(q) = \frac{F_q(q) - F_q(q_{opt})}{F_q(q_{opt})}, \quad G_{rel} \in [0, \infty] \quad (6.1)$$

Die absolute Ergebnisqualität $G_{abs}(q)$ betrachtet neben dem Optimum $F_q(q_{opt})$ auch das Pessimum $F_q(q_{pes})$ der Ergebnisliste der vollständigen Enumeration und normiert das Ergebnis auf diesen Wertebereich. Die Berechnungsvorschrift findet sich in Gleichung 6.2.

$$G_{abs}(q) = \frac{F_q(q) - F_q(q_{opt})}{F_q(q_{pes}) - F_q(q_{opt})}, \quad G_{abs} \in [0, 1] \quad (6.2)$$

Sollte ein heuristisches Lösungsverfahren die Ergebnisqualität einer manuell generierten Expertenlösung erreichen, so ist der Beweis erbracht, dass mit der entwickelten Methode manuell generierte Systemlösungen reproduziert werden können. Sollte darüber hinaus eine bessere Ergebnisqualität oder eine schnellere Optimierungszeit erzielt werden, so kann gezeigt werden, dass die Methode gegenüber der Referenzgruppe an Experten einen Mehrwert besitzt.

6.3 Ergebnisse der Validierung

Das Unterkapitel betrachtet die erzielten Ergebnisse der Validierung anhand des beschriebenen Vorgehens aus Kapitel 6.2 und Abbildung 6.4.

6.3.1 Ergebnisse der Expertenbefragung

Der Abschnitt behandelt die Ergebnisse der Befragung erfahrener Montageplaner im Hinblick auf die Eignung der identifizierten Optimierungskriterien und den Entwurf eines hybriden Montagearbeitsplatzes der Anwendungsbeispiele »Schraubbaugruppe« und »Aufnahme Dachgepäckträger«.

Evaluation der Optimierungskriterien

Die Experten wurden um ihre Meinung gebeten, hinsichtlich der relativen Wichtigkeit eines Optimierungskriteriums bezogen auf das Gesamtergebnis der Systemoptimierung. Die relative Häufigkeit der Nennungen entlang einer proportionalen Bewertungsskala von 1-5, kann den Tabellen C.2 und C.3 im Anhang entnommen werden.

Der Eintrag der letzten Spalte gibt die relative Wichtigkeit der einzelnen Kriterien nach Expertenmeinung an. Dieser Wert kann bspw. dazu verwendet werden, die Optimierungskriterien im Kano-Modell aus Kapitel 5.8 zu priorisieren und einem Leistungsmerkmal zuzuordnen.

Fast alle Kriterien aus Kapitel 4.3.1 erzielten aus Sicht der befragten Experten eine hohe Wichtigkeit. Das Optimierungskriterium »Technische Verfügbarkeit« der Ressourcen wurde im Rahmen der Befragung als fehlendes Optimierungskriterium auf Seiten der PPR-Tripel benannt. Die Erhebung einer belastbaren technischen Verfügbarkeit eines PPR-Tripels im Zuge der Grobplanung eines Montagearbeitsplatzes anhand von Produktdatenblättern erscheint schwierig bis unmöglich, wenn keine oder nur wenige Daten aus dem realen Betrieb in vergleichbaren Anwendungsszenarien vorliegen. Von einer Aufnahme und Implementierung des Kriteriums wird daher abgesehen.

Das Kriterium der »Akzeptanz des Roboters durch den Mitarbeiter« wurde als Kriterium zur Optimierung der Montagearbeitsplätze genannt – siehe auch die Ausführung von

Matthias & Ding (2013) und die »Ladenburger Thesen zur MRK« nach Buxbaum & Häusler (2020, S.312).

Die »Akzeptanz des Roboters durch den Mitarbeiter« und ein damit verbundenes Vertrauen und Miteinander in der Montage stellt ein essentielles Kriterium bei der Einführung und dem Betrieb von MRK-Montagearbeitsplätzen dar. Da dieses Optimierungskriterium personalbezogen ist und eine Unterscheidung der zu adressierenden Personen im Schritt der Grobplanung und somit auch im Rahmen dieser Arbeit nicht stattfinden kann, wird es nicht weiter berücksichtigt.

Es gilt, eine Optimierung des Kriteriums der »Akzeptanz des Roboters«, insb. in den nachfolgenden Planungsschritten der »Feinplanung« und »Realisierung« (vgl. Abbildung 2.9), zu berücksichtigen. In beiden Planungsphasen liegen bereits mehr Informationen hinsichtlich der Personaleinsatzplanung vor.

Evaluation der manuell generierten Montagearbeitsplätze

Die Informationen der Anwendungsbeispiele hinsichtlich der benötigten Produkt- und Prozessinformationen der Baugruppe sowie der gegebenen Rand- und Umweltbedingungen des Montageauftrags wurden in Form eines Online-Fragebogens aufbereitet und den Experten zur Verfügung gestellt.

Um die Ressourcenauswahl zu vereinfachen, wurde ein zweistufiger Auswahlprozess der Ressourcen je Montageschritt implementiert. Zunächst wird die Verrichtung des Montageschritts (manuell oder automatisch) durch den Planer festgelegt, danach erfolgt die Definition der entsprechenden Ressource, die der Experte für den Montageschritt präferiert.

Da ein einheitlicher Kenntnisstand hinsichtlich der Verfügbarkeit und den individuellen Eigenschaften der Ressourcen nicht vorausgesetzt werden kann, wird eine Vereinfachung des Ressourceninformationsmodells (siehe Abbildung 6.5) vorgenommen. Dieses Vorgehen hilft, unbewusste Präferenzen der Experten hinsichtlich einzelnen Ressourcenmodellen im Schritt der Grobplanung zu vermeiden.

Die Vereinfachung schränkt den Lösungsraum nicht ein, erleichtert aber den Vergleich der Expertenlösungen mit den Ergebnissen der vollständigen Enumeration. Die generischen Ressourcenklassen sind detaillierter als die Ressourcentypen aus Abbildung 5.5, repräsentieren

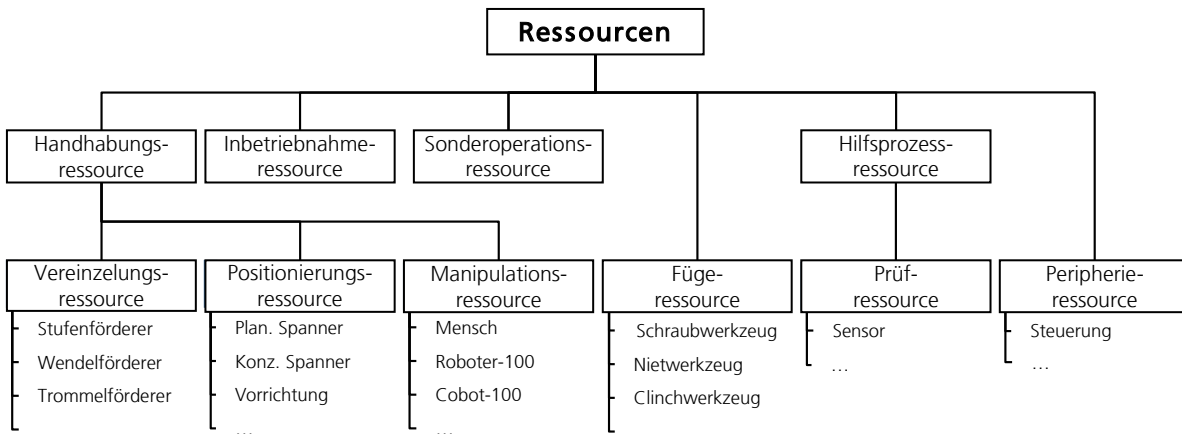


Abbildung 6.5: Darstellung der generischen Ressourcenklassen zur Vereinfachung der Ressourcenauswahl im Zuge der Validierung der Expertenlösungen

aber nicht den Grad der Spezialisierung einer expliziten Montageressource des vollständigen Ressourceninformationsmodells. So findet bspw. die Klassifizierung der Roboter anhand der Fähigkeit zur Kollaboration (Roboter, Cobot) und der Traglast (5 kg, 10 kg, ...) statt. Analog erfolgt das Vorgehen bei den anderen Ressourcentypen. Sollten während der Expertenbefragung gültige, bisher nicht implementierte Regeln der Ressourcenallokation auftreten oder unberücksichtigte Ressourcentypen und -klassen auftauchen, werden das Ressourceninformationsmodell und die Regeln der Ressourcenallokation angepasst, so dass die manuellen Lösungen in der Methode nachgebildet werden können.

Die Ergebnisse der Optimierung je Experte und Produkt und deren Bewertung können in Tabelle 6.1 und im Detail inkl. der identifizierten Ressourcen und Arbeitsteilung in Kapitel E.1 nachgelesen werden. Ein erster Vergleich zeigt, dass die gültigen, manuell generierten Montagearbeitsplätze durch die Informationsmodellierung abgedeckt waren, reproduziert und bewertet werden konnten.

Einschränkungen gibt es im Anwendungsbeispiel der »Aufnahme Dachgepäckträger« (vgl. Details Tabelle E.2). Von Expertenseite wurden mehrfach Ressourcen angenommen, die nach den Vorgaben der Produkt- und Prozessbeschreibung technisch ungeeignet waren und somit zu ungültigen Systemlösungen führten.

Diese Fehler sind nicht auf die Informationsmodellierung zurückzuführen, sondern auf die verkürzte Produktbeschreibung der Online-Fragebogens und daraus resultierenden falschen Annahmen der Rand- und Nebenbedingungen der Montage. Eine ausführlichere

Tabelle 6.1: Auszug der Ergebnisse der Expertenplanung für die Anwendungsbeispiele »Schraubbaugruppe« und »Aufnahme Dachgepäckträger« mit Angabe der Fitness $F_q(q)$ nach Gleichung 5.50 und absoluten Ergebnisqualität $F_{abs}(q)$ nach Gleichung 6.2

Experten ID	Anwendungsbeispiel					
	$F_q(q_{opt})$	Schraubbaugruppe			Aufnahme Dachgepäckträger	
		$F_q(q)$	$G_{abs}(q)$	$F_q(q_{opt})$	$F_q(q)$	$G_{abs}(q)$
2		0,367	6%		0,440	26%
3		0,381	11%		0,438	25%
4	0,349	0,396	16%	0,377	-	-
5		0,398	17%		0,436	24%
6		0,381	11%		0,445	28%

Beschreibung der Bauteileigenschaften und des Bereitstellungszustandes der Einzelteile am Montagearbeitsplatz hätte diese Fehlannahmen vermutlich verhindert und zu gültigen Systemlösungen geführt. Dies konnte in nachfolgenden Diskussionen zur Besprechung der Ergebnisse festgestellt werden.

Um dennoch eine ausreichende Datenbasis für die Validierung zu erhalten, wurden einzelne Ergebnisse der manuellen Planung im Nachgang bearbeitet. Die Veränderungen können in den Tabellen E.1 und E.2 nachgelesen werden.

Es kann festgehalten werden, dass die Informationsmodellierung eine Reproduktion der Expertenlösungen erlaubt und die implementierten Bewertungs- und Optimierungskriterien eine hohe Überdeckung mit den Kriterien der Experten aufweisen. Dennoch erreichen die Ergebnisse der Expertenplanung in keinem Fall das absolute Optimum der vollständigen Enumeration. Die manuellen Planungsergebnisse nach Tabelle 6.1 weisen im Fall der »Schraubbaugruppe« eine Spanne von 6-17% und im Fall der »Aufnahme Dachgepäckträger« eine Bandbreite von 24-28% absoluter Ergebnisqualität auf.

6.3.2 Ergebnisse der vollständigen Enumeration

Im Lösungsansatz des Entscheidungsbaumverfahrens als Überbegriff der vollständigen Enumeration (Domschke et al. 2015, S.134) werden alle Systemlösungen ($q \in E$) sukzessive gebildet. Sollten die Lösungen keine der gegebenen Randbedingung verletzen ($q \in Q$), werden sie anhand der Fitnessfunktion aus Gleichung 5.49 bewertet. Die jeweils 2.000 besten und schlechtesten Lösungen werden in einer Ergebnisliste zwischengespeichert und

exportiert. Die Sortierung der Ergebnisse erfolgt nach aufsteigendem Fitnesswert $F_q(q)$. Über den Export der besten und schlechtesten Systemlösungen kann die quantitative Spanne der Fitnesswerte des Lösungsspektrums nachvollzogen werden. Dies ist insbesondere für die Berechnung der absoluten Ergebnisqualität (vgl. Gleichung 6.2) erforderlich.

Die Ergebnislisten dienen als Grundlage der Validierung der Heuristiken (vgl. Kapitel 6.3.3), wie auch der quantitativen Einordnung der Ergebnisse der Expertenbefragung (vgl. Kapitel 6.3.1). Auszüge der Ergebnislisten der drei Anwendungsbeispiele sind im Anhang in Kapitel E.2 zu finden.

Im Fall der »Schraubbaugruppe« aus Kapitel 6.1.1 ergeben sich bei einer Mächtigkeit des Ressourcenpools $|M|$ von 750 identifizierten PPR-Tripeln über alle Montageschritte, $1,483 \cdot 10^{13}$ kombinatorische Lösungsalternativen ($|E^\mu|$)²⁰.

Der Rechenaufwand zur Bewertung eines Montagearbeitsplatzes wird maßgeblich durch die Berechnung der Taktzeit aus Kapitel 5.5.3 definiert. Für die Generierung und Bewertung einer Systemalternative, inkl. der Optimierung der Montagereihenfolge, wird auf einem Businessnotebook²¹ eine mittlere Rechenzeit von 60 Millisekunden benötigt.

Es wird ersichtlich, dass mit diesem Zeitaufwand je Lösungsiteration eine vollständige Enumeration des Lösungsraums nicht in vertretbarer Zeit abgebildet werden kann. Die vollständige Enumeration wird aus diesem Grund nur für eine Teilmenge der technisch besten Ressourcen $m_{i,red}$ je Montageschritt t_i durchgeführt.

Im Szenario der »Schraubbaugruppe« reduziert diese Einschränkung die Mächtigkeit des Ressourcenpools über alle Montageschritte $|M_{red}|$ auf 54 und die Größe des Lösungsraums $|E_{red}^\mu|$ auf $4,538 \cdot 10^6$ Lösungsalternativen. Die geschätzte Rechenzeit zur Quantifizierung aller Arbeitsstationen reduziert sich dadurch in einer ersten Näherung auf 76 Stunden.

Da für technisch ungültige Systemlösungen der Schritt der Taktzeitbestimmung entfallen kann, wird diese Rechenzeit in der Realität deutlich unterboten. Das vollständige Ergebnis lag im Anwendungsfall der »Schraubbaugruppe« bereits nach rund acht Minuten vor. Die Menge valider Systemlösungen (Q_{red}) umfasste in diesem Anwendungsbeispiel 15.760 Lösungsalternativen. Das entspricht 0,34% aller Lösungen in $|E_{red}^\mu|$.

²⁰ohne Berücksichtigung einer möglichen Vertauschung der Ablaufreihenfolge der Montageschritte E^π nach Gleichung 5.7

²¹Lenovo Business Notebook, T450s mit Intel CORE i5, 8GB RAM

Anmerkung

Es ist wichtig zu verstehen, dass die Anzahl der möglichen Ressourcen $|M|$ und somit die Größe des kombinatorischen Lösungsraums $|E^\mu|$ nicht zwangsläufig mit der Zahl valider Systemlösungen $|Q_{red}|$ korrelieren muss.

Limitierender Faktor der Anzahl valider Lösungen sind die Randbedingungen, die sich aus den individuellen Vorgaben des Planers ergeben. Für den Anwendungsfall der Validierung können diese im Anhang, Kapitel D, nachgeschlagen werden.

Tabelle 6.2 verdeutlicht die Größe der absoluten und reduzierten Lösungsräume der Anwendungsbeispiele aus Kapitel 6.1. In Spalte $|Q_{red}|$ findet sich die Gesamtzahl der validen Systemlösungen des reduzierten kombinatorischen Lösungsraums E_{red}^μ . Hierfür wurden jeweils die y besten Lösungen der Ressourcenmengen je Montageschritt (Ressourcen-Shortlist) ermittelt und miteinander kombiniert.

Tabelle 6.2: Vergleich der Lösungsmengen der Anwendungsbeispiele hinsichtlich kombinatorischem Lösungsraum $|E^\mu|$, reduziertem kombinatorischem Lösungsraum $|E_{red}^\mu|$, der Länge der Ressourcen-Shortlist y , der Anzahl valider Lösungen $|Q_{red}|$ und der tatsächlichen Rechenzeit der vollständigen Enumeration T_E

Beispiel	kpl. Lösungsraum		y	red. Lösungsraum		Ergebnis	
	$ M $	$ E^\mu $		$ M_{red} $	$ E_{red}^\mu $	$ Q_{red} $	T_E
Schraubbaugruppe	750	$1,483 \cdot 10^{13}$	5	54	$4,538 \cdot 10^6$	15.760	424 s
Dachgepäckträger	605	$1,073 \cdot 10^{12}$	6	58	$4,719 \cdot 10^6$	35.784	1.238 s
VM Schwenklager	230	$3,373 \cdot 10^7$	12	62	$2,595 \cdot 10^6$	12.960	1.191 s

6.3.3 Ergebnisse der heuristischen Optimierung

Die Validierung der heuristischen Lösungsverfahren erfolgt anhand der Bewertungskriterien Ergebnisqualität und Geschwindigkeit (Salhi 2017, S.11f). Vordergründig steht das Kriterium der Ergebnisqualität im Mittelpunkt, um eine gute Annäherung an die optimale Systemlösung der Menge valider Lösungen ($q_{opt} \in Q$) zu erzielen. Sollten mehrere Heuristiken vergleichbare Ergebnisqualitäten liefern, so ist die Heuristik zu wählen, die das Ergebnis in geringerer Zeit liefert. Die Validierung der Heuristiken erfolgt, wie auch die vollständige Enumeration, anhand des reduzierten Satzes an Ressourcen M_{red} – siehe Tabelle 6.2.

Anmerkung

Aufgrund der stochastischen Eigenschaften der Auswahl und (Re-)Kombination alternativer PPR-Tripel besitzt das Optimierungsproblem einen diskreten Charakter und der Lösungsraum keine topologische Struktur.

Die Fitnessfunktion nach Gleichung 5.49 ist somit nicht stetig und differenzierbar.

Die Ergebnisse der heuristischen Optimierung sind daher zufällig. Verlässliche Aussagen zur Ergebnisqualität und Optimierungsgeschwindigkeit können nur bei einer ausreichend großen Zahl an Iterationen (Stichprobe) je Heuristik und Anwendungsfall getroffen werden.

Die Größe einer Stichprobe s ergibt sich aus der Größe des Lösungsraums $|E|$ und ist nach Gleichung 6.3 entsprechend der Populationsgröße und damit in Abhängigkeit des Anwendungsbeispiels zu berechnen.

Die Berechnungen erfolgen unter der Annahme eines Konfidenzintervalls von 95% und einer zulässigen Fehlerspanne von 10%. Für eine Populationsgröße $|E| \gg 10^6$ kann die Gleichung vereinfacht werden, weshalb sich die Größe der Stichprobe in allen Anwendungsbeispielen auf den Wert 97 abschätzen lässt.

$$s = \frac{\frac{z^2 p(1-p)}{e^2}}{1 + \frac{z^2 p(1-p)}{e^2 |E|}} \approx \frac{z^2 p(1-p)}{e^2} = 97 \quad (6.3)$$

$ E $	Populationsgröße, zu untersuchender Lösungsraum aus Gleichung 5.58	
e	Fehlerspanne, Annahme 10%, daher:	$e = 0,1$
p	Prozentwert, Abwägung bei ungewisser Ausgangssituation:	$p = 0,5$
z	z-Wert, im Fall Konfidenzniveau 95%:	$z = 1,96$

Vergleich der Ergebnisqualitäten

Die absoluten und relativen Ergebnisqualitäten je heuristischem Lösungsverfahren können in Tabelle 6.3 nachgelesen werden. Die hybriden heuristischen Verfahren, die auf der Rekombination von PPR-Tripeln basieren, erzielen die besten absoluten Ergebnisqualitäten aller Verfahren. Der Mittelwert der absoluten Ergebnisqualität $\tilde{x}_{G_{abs}}$ liegt im Fall des *Multi-Swap-Algorithmus* zwischen 5,0% und 6,3%, im Fall des *Single-Swap-Algorithmus* und *Optimized Single-Swap-Algorithmus* zwischen 3,7% und 6,2%. Abweichend hiervon ist der Mittelwert der absoluten Lösungsqualität des *Greedy-Algorithmus* leicht schlechter und bewegt sich zwischen 7,0% und 8,4%.

Tabelle 6.3: Vergleich der heuristischen Lösungsverfahren für $p=500$ Iterationen für den Median \tilde{x}_G , den Mittelwert μ_G und die Standardabweichung $\sqrt{\sigma_G^2}$ der relativen G_{rel} und absoluten G_{abs} Ergebnisqualität, Stichprobengröße $s=97$

Anwendungs- beispiel	Heuristik	G_{rel}			G_{abs}		
		$\tilde{x}_{G_{rel}}$	$\mu_{G_{rel}}$	$\sqrt{\sigma_{G_{rel}}^2}$	$\tilde{x}_{G_{abs}}$	$\mu_{G_{abs}}$	$\sqrt{\sigma_{G_{abs}}^2}$
Schraubbeispiel	Greedy	6,6%	7,1%	2,4%	7,8%	8,4%	2,8%
	Sim. Annealing	5,4%	6,1%	4,4%	6,5%	7,2%	5,2%
	Single-Swap	5,4%	5,2%	2,1%	6,5%	6,2%	2,5%
	Multi-Swap	5,4%	5,3%	2,1%	6,5%	6,3%	2,5%
	Opt. Single-Swap	5,2%	4,9%	2,5%	6,1%	5,8%	3,0%
	Tiefensuche	6,9%	7,0%	1,9%	8,2%	8,3%	2,2%
Dachgepäckträger	Greedy	4,5%	4,9%	2,8%	7,0%	7,5%	4,3%
	Sim. Annealing	14,1%	11,2%	6,9%	21,8%	17,4%	10,7%
	Single-Swap	2,4%	2,4%	2,1%	3,7%	3,7%	3,2%
	Multi-Swap	2,9%	3,2%	1,5%	4,5%	5,0%	2,4%
	Opt. Single-Swap	1,3%	2,4%	2,0%	2,1%	3,7%	3,0%
	Tiefensuche	9,8%	9,7%	4,5%	15,2%	15,0%	7,0%
VM Schwenklager	Greedy	3,0%	3,4%	1,6%	6,1%	7,0%	3,4%
	Sim. Annealing	2,1%	3,6%	2,1%	4,3%	7,4%	4,3%
	Single-Swap	2,1%	3,0%	1,8%	4,3%	6,2%	3,6%
	Multi-Swap	2,1%	2,9%	1,7%	4,3%	6,1%	3,6%
	Opt. Single-Swap	2,1%	3,0%	1,9%	4,3%	6,2%	4,0%
	Tiefensuche	2,1%	2,5%	1,2%	4,3%	5,2%	2,4%

Im Fall der *Tiefensuche* und des *Simulated Annealings* werden insbesondere im Anwendungsfall der »Aufnahme Dachgepäckträger« deutlich schlechtere Ergebnisse erzielt. Die Werte liegen durchschnittlich bei 15,0%, respektive 17,4% absoluter Ergebnisqualität. Auffällig ist, dass die Mittelwerte der beiden Lösungsverfahren in den Anwendungsbeispielen »VM Schwenklager« und »Schraubbaugruppe« nicht so deutlich abweichen und Ergebnisqualitäten zwischen 5,2% und 8,3%, respektive 7,2% und 7,4% aufweisen.

Da die rekombinierenden Lösungsverfahren dieses Verhalten nicht zeigen und der Effekt nur im Fall der »Aufnahme Dachgepäckträgers« auftritt, liegt die Vermutung nahe, dass die Ursache in der Ausgestaltung des Anwendungsbeispiels begründet liegt. Im Fall des *Simulated Annealings* findet eine Nachbarschaftssuche, bzw. im Fall der *Tiefensuche* eine Ressourcenauswahl auf dynamisch eingegrenzten Ressourcen statt.

Da spezialisierte Ressourcen für den Anwendungsfall des Blindnietens in der Ressourcen-datenbank selten anzutreffen sind, ist es wahrscheinlich, dass während der Optimierung

fortwährend identische oder zumindest ähnliche Lösungen generiert werden. Dieses Verhalten führt zu unzureichenden Differenzwerten in den Iterationsschritten (vgl. Gleichung 5.56), wodurch ein Verlassen lokaler Minima und eine Optimierung erschwert wird.

Entsprechend der mittleren, absoluten Ergebnisqualität je Optimierungslauf kann ein Vergleich der Leistungsfähigkeit der Heuristiken erfolgen. Die Auswertung erfolgt im Gesamtkontext aller Anwendungsbeispiele. Abbildung 6.6 illustriert die Aggregation der Häufigkeiten eines Optimierungsergebnisses über alle Iterationsläufe anhand der absoluten Ergebnisqualität, zwischen einem optimalem Ergebnis ($G_{abs} = 0\%$) und einer maximal tolerierten Abweichung ($G_{abs} = 15\%$). Die Grafik ist so zu lesen, dass bspw. beim Verfahren des *Optimized Single-Swap-Algorithmus*, 56% aller Iterationsläufe ein Ergebnis mit einer Ergebnisqualität $< 5\%$ erzielten (gepunktete Linien).

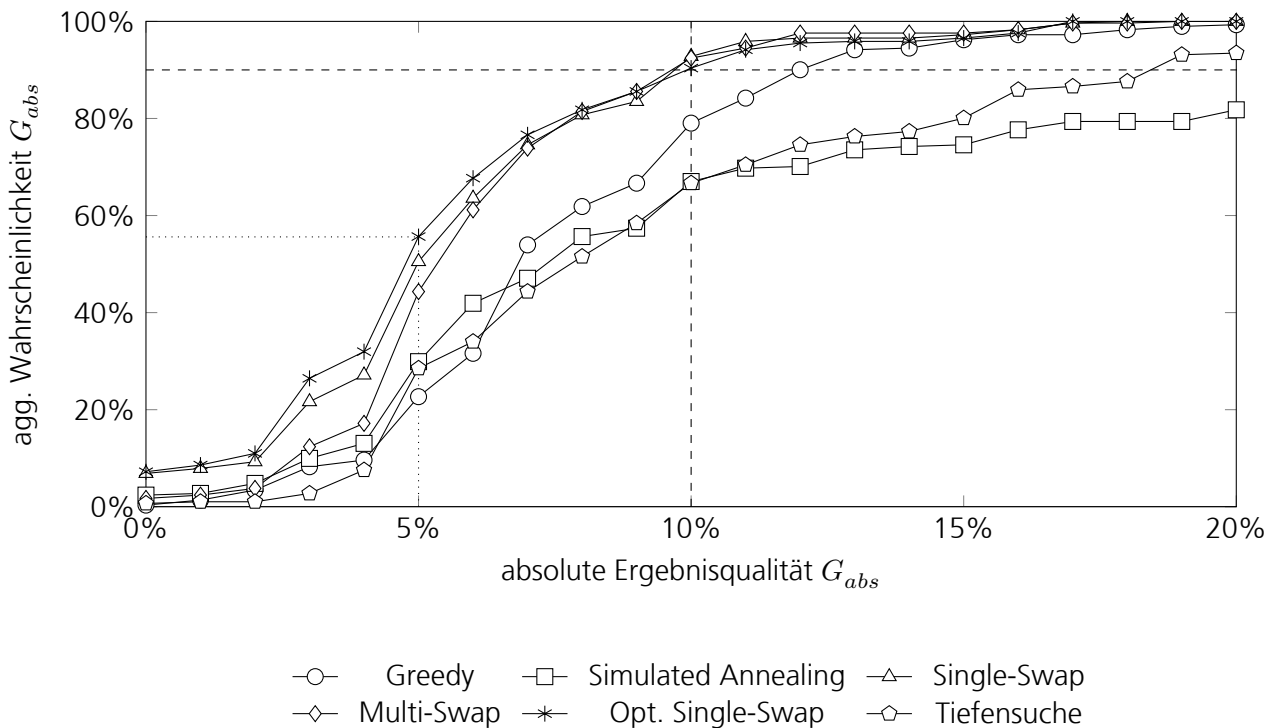


Abbildung 6.6: Vergleich der aggregierten Häufigkeiten der absoluten Ergebnisqualitäten aller Heuristiken über alle Anwendungsbeispiele, Datengrundlage 97 Iterationsläufe je Heuristik und Anwendungsbeispiel

Es wird deutlich, dass die rekombinierenden Verfahren (*Single-Swap*-, *Multi-Swap*- und *Optimized Single-Swap-Algorithmus*) in mehr als 90% der Iterationsläufe (horizontale, gestrichelte Linie) Montagearbeitsplätze mit einer absoluten Ergebnisqualität kleiner 10% (vertikale, gestrichelte Linie) generieren.

Die heuristischen Lösungsverfahren, die mit der höchsten Wahrscheinlichkeit kleine Ergebnisqualitäten liefern, sind der *Optimized Single-Swap*- und der *Single-Swap-Algorithmus* – erkennbar am steilen Verlauf der Kurven am linken Rand der Abbildung 6.6. Die Abweichung zum Verfahren des *Multi-Swap-Algorithmus* ist jedoch, gerade für höhere Ergebnisqualitäten, gering.

Im Fall des *Greedy-Algorithmus*, des *Simulated Annealings* und der *Tiefensuche* kann hingegen nur in 79%, respektive 67% der Optimierungsläufe eine absolute Ergebnisqualität kleiner 10% erzielt werden. Gerade die beiden letztgenannten Heuristiken weisen nach Abbildung 6.6 eine erkennbar flachere Kurve auf, die sich erst für größere absolute Ergebnisqualitäten dem 90% Ziel annähern. Aus diesem Grund sind die Heuristiken im Themenkomplex der Optimierung hybrider Montagearbeitsplätze schlechter geeignet als die rekombinierenden Verfahren.

Vergleich der Optimierungszeiten

Tabelle 6.4 stellt die Ergebnisse der mittleren absoluten Ergebnisqualität $\mu_{G_{abs}}$ und der mittleren Optimierungszeit μ_T gegenüber und vergleicht diese mit dem Zeitbedarf der vollständigen Enumeration aus Tabelle 6.2. In allen Fällen kann durch den Einsatz der Heuristiken eine Reduktion der Optimierungszeit im Vergleich zur vollständigen Enumeration erzielt werden.

Es kann festgehalten werden, dass die Lösungsverfahren des *Greedy-Algorithmus*, der *Tiefensuche* und des *Simulated Annealings* weniger Zeit benötigen als die hybriden Ansätze der Rekombination der PPR-Tripel (*Single-Swap*-, *Multi-Swap*-, *Optimized Single-Swap-Algorithmus*). Der Unterschied in der Optimierungszeit ist jedoch gering und beschränkt sich auf wenige Sekunden. In Relation zum zeitlichen Aufwand einer Grobplanung des Montagearbeitsplatzes kann der Einfluss vernachlässigt werden.

Die Zeitbedarfe der manuellen Optimierung durch die Expertengruppe wurden nicht erhoben. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der zeitliche Aufwand einer manuellen Ressourcenidentifikation und -allokation mehrere Minuten beträgt.

Die Ergebnisse der Tabelle 6.4 sind in den Abbildungen 6.7 – 6.9 als mittlere absolute Ergebnisqualität $\mu_{G_{abs}}$ über die mittlere Optimierungszeit $\mu_{T_{opt}}$ aufgetragen. Zur Orientie-

Tabelle 6.4: Vergleich der heuristischen Lösungsverfahren mit jeweils $p=500$ Iterationen für den Erwartungswert der absoluten Ergebnisqualität $\mu_{G_{abs}}$, den mittleren Zeitbedarf $\mu_{T_{opt}}$, die Standardabweichung des Zeitbedarfs der Optimierung $\sqrt{\sigma_{T_{opt}}^2}$ sowie den Zeitbedarf T_E der vollständigen Enumeration, Stichprobe $s=97$

Anwendungs- beispiel	Heuristik	$\mu_{G_{abs}}$	$\mu_{T_{opt}}$	$\sqrt{\sigma_{T_{opt}}^2}$	Zeit- faktor	Enumeration T_E
Schraubbaugruppe	Greedy	8,4%	4,72 s	2,18 s	90	424 s
	Sim. Annealing	7,2%	11,94 s	6,62 s	36	
	Single-Swap	6,2%	11,16 s	2,63 s	38	
	Multi-Swap	6,3%	11,29 s	3,26 s	38	
	Opt. Single-Swap	5,8%	11,52 s	3,86 s	37	
	Tiefensuche	8,3%	7,15 s	3,07 s	59	
Dachgepäckträger	Greedy	7,5%	5,03 s	2,10 s	246	1.238 s
	Sim. Annealing	17,4%	10,81 s	6,09 s	115	
	Single-Swap	3,7%	10,67 s	3,11 s	116	
	Multi-Swap	5,0%	12,44 s	4,23 s	100	
	Opt. Single-Swap	3,7%	10,64 s	3,52 s	116	
	Tiefensuche	15,0%	5,88 s	2,68 s	211	
VM Schwenklager	Greedy	7,0%	18,92 s	8,06 s	63	1.191 s
	Sim. Annealing	7,4%	24,32 s	18,61 s	49	
	Single-Swap	6,2%	46,44 s	6,18 s	26	
	Multi-Swap	6,1%	36,61 s	16,26 s	33	
	Opt. Single-Swap	6,2%	45,40 s	6,39 s	26	
	Tiefensuche	5,2%	16,01 s	6,78 s	74	

Die Lösungsbereiche sind durch eine graue Schraffur markiert. Die horizontale gestrichelte Linie zeigt den Zielkorridor einer absoluten Ergebnisqualität von 10% horizontal gestrichelt und die Bandbreite der Lösungsqualität einer manuellen Expertenlösung in den beiden Anwendungsbeispielen »Schraubbaugruppe« und »Aufnahme Dachgepäckträger« als graues Lösungsband eingezeichnet.

Fazit

Es wird deutlich, dass sich die Ergebnisse der drei rekombinierenden Lösungsverfahren (*Single-Swap*-, *Multi-Swap*-, *Optimized Single-Swap-Algorithmus*) in den Erwartungswerten der Optimierungszeit und absoluten Ergebnisqualität kaum voneinander unterscheiden. Über alle Anwendungsbeispiele liefern die drei hybriden Heuristiken die qualitativ besten Lösungen, benötigen jedoch ungefähr die doppelte Optimierungszeit im Vergleich zu

den Verfahren des *Greedy-Algorithmus* und der *Tiefensuche*. Alle heuristischen Verfahren erreichen die Ergebnisqualität einer manuellen Lösung und unterschreiten diese im Anwendungsfall der »Aufnahme Dachgepäckträger« sogar deutlich.

Es konnte ebenso gezeigt werden, dass alle heuristischen Lösungsverfahren bereits auf leistungsschwächeren Businessnotebooks funktionsfähig sind. Die Einschränkung der Anzahl der Ressourcen, die im Zuge der vollständigen Enumeration aufgrund des Speicherbedarfs erforderlich wurden, sind für die heuristischen Lösungsverfahren nicht von Belang.

Für eine detaillierte Auswertung der heuristischen Lösungsverfahren inkl. weiteren Darstellungen zur statistischen Verteilung der Ergebnisqualitäten und Optimierungszeiten sowie einer Darstellung der Streuung aller Ergebnisqualitäten über die jeweilige Optimierungszeit, sei auf den Anhang dieser Arbeit und die Abbildungen E.1 - E.9 verwiesen.

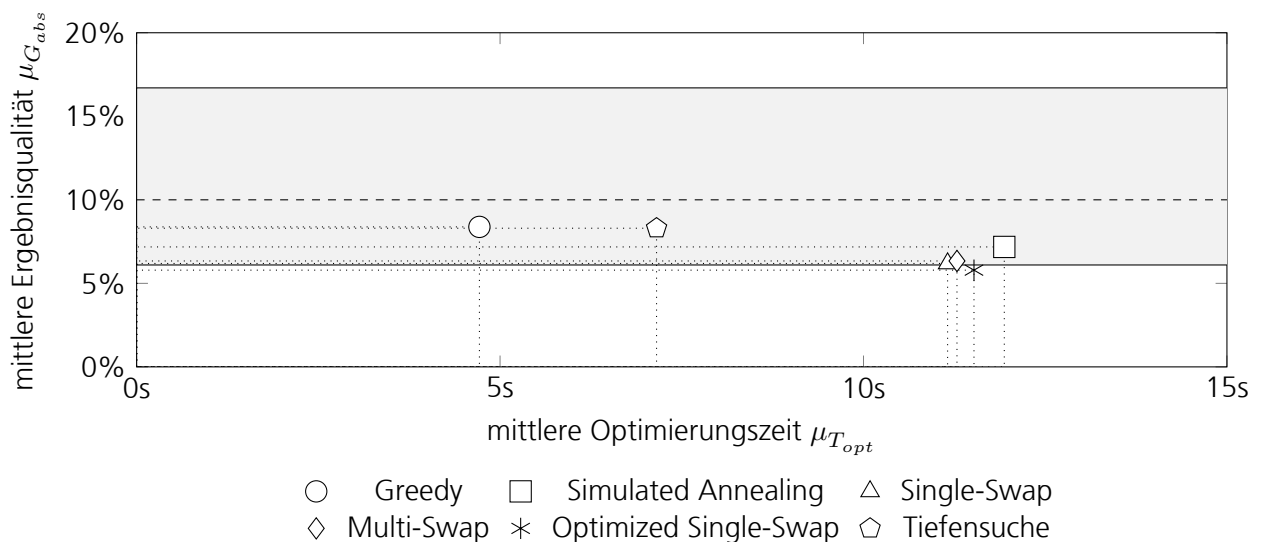


Abbildung 6.7: Vergleich der mittleren absoluten Ergebnisqualität $\mu_{G_{abs}}$ und der mittleren Optimierungszeit $\mu_{T_{opt}}$ für das »Schraubbeispiel« für alle Heuristiken mit Stichprobe $s=97$, max. Iterationszahl = 500. Das graue Band beschreibt die Lösungsbreite manueller Lösungen.

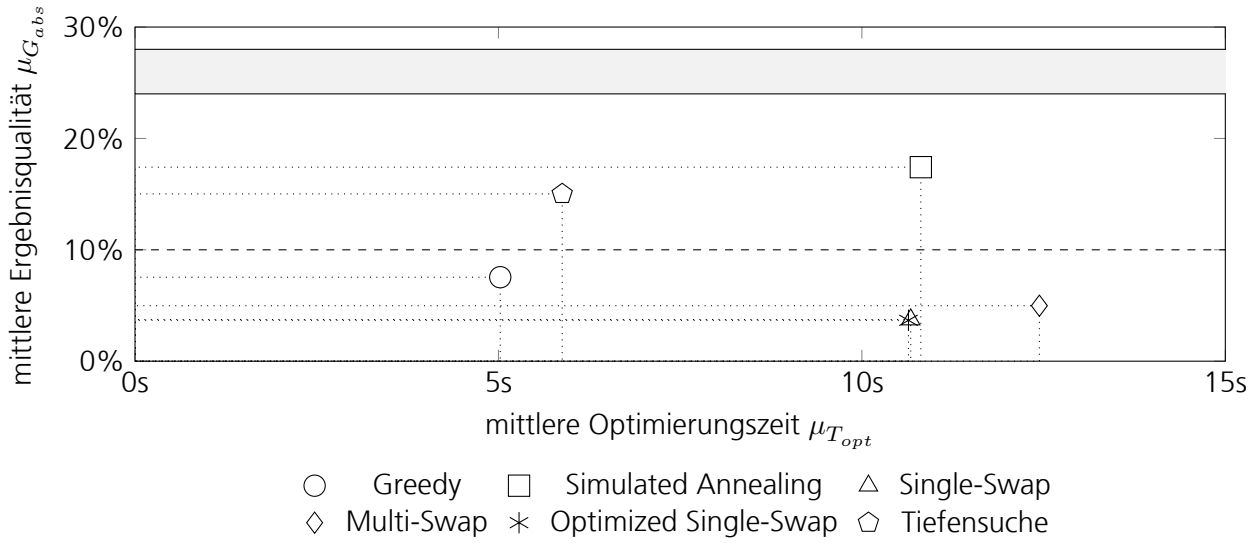


Abbildung 6.8: Vergleich der mittleren absoluten Ergebnisqualität $\mu_{G_{abs}}$ und der mittleren Optimierungszeit $\mu_{T_{opt}}$ für die »Aufnahme Dachgepäckträger« für alle Heuristiken mit Stichprobe $s=97$, max. Iterationszahl = 500. Das graue Band beschreibt die Lösungsbreite manueller Lösungen.

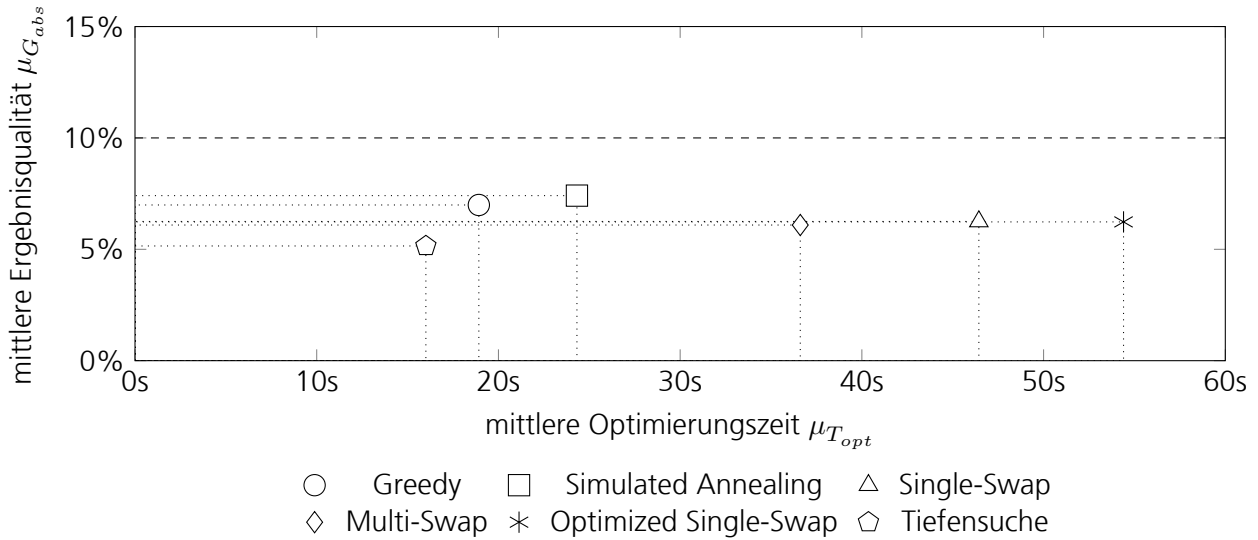


Abbildung 6.9: Vergleich der mittleren absoluten Ergebnisqualität $\mu_{G_{abs}}$ und der mittleren Optimierungszeit $\mu_{T_{opt}}$ für die »Vormontage Schwenklager« für alle Heuristiken mit Stichprobe $s=97$, max. Iterationszahl = 500.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Hybride rekonfigurierbare Montagearbeitsplätze, insb. MRK-Montagearbeitsplätze, gelten als Schlüsseltechnologie, um den Herausforderungen zukünftiger Produktionsszenarien wirtschaftlich zu begegnen. Die Gestaltung dieser Systeme stellt große Herausforderungen an die mit der Montageplanung betrauten Mitarbeiter, da die bisher vorherrschende inhaltliche und thematische Trennung automatischer und manueller Arbeitsstationen sukzessive aufgegeben wird, um ein breiteres Spektrum einer aufgabenorientierten Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine zu ermöglichen. Neben den steigenden Anforderungen aus Sicht der Produkte und Prozesstechnologien hat dabei die stetig zunehmende Frequenz der (Rekonfigurations-)Planung einen erheblichen Einfluss auf die verfügbare Zeit einer Planung.

Heutige Planungsansätze empfehlen, sich am Entwurfsprozess manueller Montagearbeitsplätze zu orientieren und schrittweise den Automatisierungsgrad einzelner Prozesse anzupassen. In einem iterativen Prozess soll so eine optimierte Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter identifiziert werden. Neben Grundkenntnissen der manuellen Arbeitsplatzgestaltung impliziert dieses Vorgehen zeitaufwendige Recherchen technischer Automatisierungslösungen für den kollaborativen Betrieb zwischen Mensch und Roboter. Hinzu kommen langwierige, vornehmlich manuelle Iterationsläufe zur Identifikation einer optimierten Arbeitsteilung und Prozessreihenfolge sowie Aufwände der Quantifizierung und Dokumentation der Systemeigenschaften.

Eigene Erfahrungen aus der industriellen Praxis zeigen, dass das volle Potential einer hybriden Montage mit diesem Vorgehen nicht gehoben werden kann. Oftmals wird kein optimales Interaktionsszenario zwischen Mensch und Roboter gefunden, was zu ungünstigen Montageszenarien aus Sicht der Arbeitsorganisation und Wirtschaftlichkeit führt. Die Effekte sind vielfältig und zeigen sich bspw. in einer geringen Auslastung der Ressource Mensch, ungünstigen Montagestückkosten aufgrund von Investitionen in zusätzliche Res-

sourcen oder einer erhöhten Taktzeit, da die eingesetzten Ressourcen aufeinander warten müssen.

Die Themen der Ressourcenallokation für eine optimierte Arbeitsteilung sowie die Berücksichtigung quantitativer Bewertungsmethoden im Zuge der Grobplanung von Montagearbeitsplätzen sind Themen von industrieller Relevanz. Aus dieser Motivation heraus entstand diese Arbeit, die eine »automatisierte Methode der Grobplanung hybrider Montagearbeitsplätze unter Nutzung optimierter Ressourcenkombinationen« adressiert.

Die entwickelte Methode orientiert sich am V-Modell der Richtlinie VDI 2206. Sie identifiziert alternative Ressourcenlösungen (PPR-Tripel) je Montageschritt und rekombiniert diese zu übergreifenden Montagearbeitsplätzen. Das Vorgehen greift auf Informationsmodelle zur Beschreibung der Montageressourcen zurück, verwendet Regeln zur fähigkeitsoptimierten Allokation von Ressourcen und integriert in einem systemgetriebenen Entwurf die Eigenschaften der einzelnen PPR-Tripel zu hybriden Montagearbeitsplätzen. Zur Bewertung der Systemlösungen wird eine Fitnessfunktion implementiert, die es erlaubt, unterschiedliche Lösungsalternativen anhand eines Katalogs an konkurrierenden Optimierungskriterien miteinander zu vergleichen.

Die Optimierung der Ressourcenallokation und der Arbeitsteilung hybrider Montagearbeitsplätze kann als NP-schweres Optimierungsproblem der flexiblen Arbeitsvorbereitung (FJSSP) aufgefasst werden. Es gilt, einen Produktionsauftrag auf mehrere parallele Ressourcen eines zu definierenden hybriden Montagearbeitsplatzes (Mensch, Roboter, Automatisierungskomponenten) zu verteilen und hinsichtlich technischer und betriebswirtschaftlicher Ziele unter gegebenen Randbedingungen zu optimieren. Aufgrund der Klassifizierung des Optimierungsproblems und der Eigenschaften der Fitnessfunktion werden Heuristiken zur Lösungsfindung eingesetzt.

Der Vergleich unterschiedlicher Heuristiken zeigt, dass insbesondere hybride Algorithmen, die auf dem Verfahren der Rekombination der PPR-Tripel basieren, die besten Ergebnisqualitäten liefern und sogar die Qualität einer Expertenplanung übertreffen. In Bezug auf die Optimierungszeit kann festgehalten werden, dass alle Heuristiken eine Beschleunigung der Lösungssuche im Vergleich zur vollständigen Enumeration des Lösungsraums ermöglichen. So liegen im Fall der heuristischen Lösungssuche mit vorab erfolgter Ressourcenallokation bereits nach wenigen Sekunden valide Systemlösungen vor. Für eine detaillierte Betrachtung

und kritische Würdigung der Ergebnisse der heuristischen Lösungsverfahren sei auf Kapitel 6 verwiesen.

Die entwickelte Methode hat ihren Schwerpunkt in der Grobplanung und Optimierung hybrider, kollaborierender Montagearbeitsplätze. Es ist aber auch denkbar, durch Anpassung der Nebenbedingungen aus Kapitel 4.1.1, rein manuelle oder automatische Montagearbeitsplätze zu planen. Das methodische Vorgehen verändert sich in diesem Fall nicht.

7.2 Validierung der Arbeitshypothesen

Die geltenden Limitierungen einer manuellen Grobplanung hybrider Montagearbeitsplätze wurden in Kapitel 1.4 anhand von drei Arbeitshypothesen formuliert. Nach erfolgter Validierung der Methode gilt es zu überprüfen, inwieweit diese Hypothesen verifiziert oder falsifiziert werden konnten.

Hypothese 1: Der Faktor Mensch hemmt die Lösungsqualität und -breite

Hypothese eins befasst sich mit der »Lösungsqualität und -breite manuell generierter Montagearbeitsplätze«. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass im Zuge einer manuellen Grobplanung in endlicher Zeit nur eine begrenzte Menge an Ressourcen identifiziert und nachfolgend zu einigen wenigen Systemlösungen kombiniert werden kann. Beide Aspekte werden in der vorgestellten Methode adressiert.

Im Zuge der automatischen Ressourcenallokation kann im Fall der entwickelten Methode aus einer großen Menge an unterschiedlichen Ressourcen geschöpft werden, die in einem fähigkeitsbasierten Ansatz den Montageschritten zugewiesen werden. Die Menge der Ressourcen ist fallspezifisch, kann aber bei sorgsamer Recherche und Pflege der Informationsmodelle den Kenntnisstand und das Leistungsvermögen eines einzelnen Planers weit übertreffen. Aus den identifizierten Ressourcen (PPR-Tripel) kann in wenigen Sekunden eine Vielzahl an Lösungsalternativen automatisch generiert, entsprechend den vorab definierten Optimierungskriterien bewertet und miteinander verglichen werden.

Die implementierten Lösungsverfahren optimieren das Ergebnis dabei strikt anhand den Planungsvorgaben und Randbedingungen. Subjektive Präferenzen, die über die Auswahl

der Optimierungskriterien und die Definition der Merkmalsausprägung der Optimierung (Kano-Modell) hinausgehen, werden nicht berücksichtigt.

Vergleiche zwischen den Ergebnissen manueller und automatischer Planung zeigen, dass die Ergebnisse der Expertenplanung das absolute Optimum der vollständigen Enumeration in keinem Anwendungsbeispiel reproduzieren konnten und der Erwartungswert der heuristischen Lösungsverfahren besser ist. Hinzu kommt, dass durch den Zeitvorteil der automatischen Planung mehrere Lösungsalternativen in der gleichen Zeit generiert werden können. Die Arbeitshypothese der Limitierung der Lösungsqualität und -breite durch den Mensch kann somit bestätigt werden.

Hypothese 2: Optimierte Produktionsszenarien sind nur durch kontinuierliche Reinitialisierung und Rekonfiguration des Systementwurfs möglich

Die zweite Hypothese beschreibt den »Bedarf einer stetigen Reinitialisierung und Rekonfiguration des Systementwurfs« zur Erreichung einer operativen Exzellenz in der Produktion. Die stetige Rekonfiguration der Ressourcen eines Montagearbeitsplatzes kann helfen, Unsicherheiten in den Prognosemodellen der Planung zu begegnen und durch eine kontinuierliche Reinitialisierung und Rekonfiguration des technischen Systementwurfs, potentiell wirtschaftlichere und resilientere Produktionsszenarien zu entwerfen.

Die entwickelte Methode unterstützt den Montageplaner bei der Beherrschung der zeitabhängigen Komplexität im Systementwurf nach Matt (2007). Eine Beschleunigung und inhaltliche Formalisierung der Grobplanung kann die Hemmschwelle zu einer kontinuierlichen Anpassung und Optimierung des Systementwurfs senken und langfristig zu einer objektiveren Auswahl und Bewertung von Ressourcen im Montageszenario führen.

Die Automatisierung der Planungsprozesse hilft, die nicht wertschöpfenden Aufwände in Arbeitsvorbereitung und -planung zu reduzieren und objektivere Ressourcen- und Planungsentscheidungen zu treffen. Aufgrund der typischerweise parallelen Entwicklungsprozesse von Produkt und Produktion sind mit diesem beschleunigten Planungsvorgehen exaktere Prognosen der technisch-funktionalen Anforderungen an die Fähigkeiten eines Montagearbeitsplatzes möglich, da diese zu einem späteren Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess getroffen werden können. Potentielle Fehlannahmen bei der Definition der

Randbedingungen sowie der Produkt- und Prozesseigenschaften können ebenso reduziert werden.

Da die Methode nicht über einen langfristigen Zeitraum in einem realen Produktionsszenario unter volatilen Randbedingungen validiert wurde, kann die Hypothese weder verifiziert noch falsifiziert werden. Die Automatisierung der Planungsprozesse der Ressourcenidentifikation und -allokation repräsentiert jedoch einen validen Ansatz, um eine kontinuierliche Rekonfiguration des Systementwurfs zu ermöglichen und die manuelle Arbeitslast der Grobplanung trotz einer sich abzeichnenden Zunahme der Frequenz der Planungszyklen gering zu halten.

Hypothese 3: Der langfristige Horizont einer Investitionsentscheidung benachteiligt Automatisierungslösungen

Die dritte Hypothese beschäftigt sich mit dem »langfristigen Entscheidungshorizont einer Investitionsplanung von Montagesystemen«, der automatische Ressourcenlösungen im Umfeld einer volatilen Produktion benachteiligt. Der Ansatz einer Kostenvergleichsrechnung von Produktionsressourcen im Leasingmodell, mit ressourcenabhängigen Stundensätzen für den Zeitraum der Produktion einer definierten Losgröße, ermöglicht die Verschiebung der Investitionsentscheidung zeitlich näher an den Produktionsstart (SOP) und die Vermeidung von Kapitaldienstkosten aufgrund Investitionen in Betriebsmittel.

Einmal getätigte Entscheidungen in Betriebsmittel sind mit dieser Kostenrechnung nicht mehr langfristig bindend. Das hybride MRK-Montageszenario hat weiterhin den Vorteil, dass spezialisierte und somit teure Ressourcenlösungen durch eine optimierte Arbeitsteilung mit dem Menschen vermieden werden können.

Im Zusammenspiel mit dem beschleunigten Planungsvorgehen sind verlässlichere Prognosen und kontinuierliche Anpassungen der Ressourcen und Arbeitsteilungen bzgl. Stückzahl und Produktvarianz möglich. Die Hypothese der Benachteiligung automatischer Ressourcenlösungen aufgrund der höheren Investitionskosten kann damit widerlegt werden.

Anhand der durchgehenden variablen Kostenrechnung werden direkte Vergleiche der Montagestückkosten manueller, hybrider und automatischer Ressourcenlösungen ermöglicht. Das Risiko einer Fehlinvestition in Produktionsressourcen wird minimiert, da in kurzfristigen Zyklen die Möglichkeit besteht, Ressourcen auszutauschen oder an den Leasinggeber

zurückzugeben. In diesem Zug kann auch die Arbeitsteilung der Ressourcen an die aktuellen Rand- und Umweltbedingungen angepasst werden, um bspw. die Produktivität zu steigern.

7.3 Ausblick und Anknüpfungspunkte weiterführender Forschung

Das methodische Vorgehen dieser Arbeit ist Bestandteil eines wachsenden Forschungsfeldes. Untersuchungen zeigen, dass in den vergangenen Jahren insb. die Themen der »Arbeitsteilung und Ablauforganisation hybrider Arbeitsstationen« eine wachsende Relevanz durch eine steigende Anzahl an Veröffentlichungen erfahren haben (Gualtieri et al. 2021).

Im Kontext der Produktionsforschung wurden in den vergangenen Jahren viele Anstrengungen unternommen, neue Formen der Arbeitsorganisation (bspw. MRK) oder Systemintegration (bspw. Plug & Produce) zu implementieren, um die Flexibilität und Produktivität in den physischen Aspekten der Produktionsprozesse zu steigern und die direkten Kosten zu reduzieren. Die Nachteile einer zunehmend komplexen Systemplanung und -optimierung unter der Nebenbedingung einer steigenden Wiederholfrequenz wurden dabei nur selten adressiert (Lohse et al. 2005, S.302; Fechter & Dietz 2020, S.151). Gerade diese Tätigkeiten werden aber von hochbezahlten Spezialisten in den Fachabteilungen Arbeitsvorbereitung und -planung ausgeführt, die für einen deutlichen Anteil der indirekten Kosten verantwortlich sind.

Das Fraunhofer IPA bearbeitet seit mehreren Jahren das Themenfeld der »Automatisierung von Produktionsplanungsprozessen«. Das beschriebene Verfahren beschreibt einen Ausschnitt zur Beschleunigung des Planungsvorgehens und der Reduktion nicht wertschöpfender, indirekter Tätigkeiten in der Systemplanung von Robotersystemen. Abbildung 7.1 greift die aktuellen Forschungstätigkeiten auf und setzt diese in einen zeitlichen Ablauf, ausgehend von der geometrischen Definition des Produkts im CAD bis hin zur abgeschlossenen Planung des Montagearbeitsplatzes.

Die nachfolgenden Ausführungen sollen einen Eindruck vermitteln, in welchen Bereichen der Produktions- und Montageplanung ein Potential für weitere Forschung besteht und wo zukünftige Schwerpunkte der Prozessautomatisierung gelegt werden können.

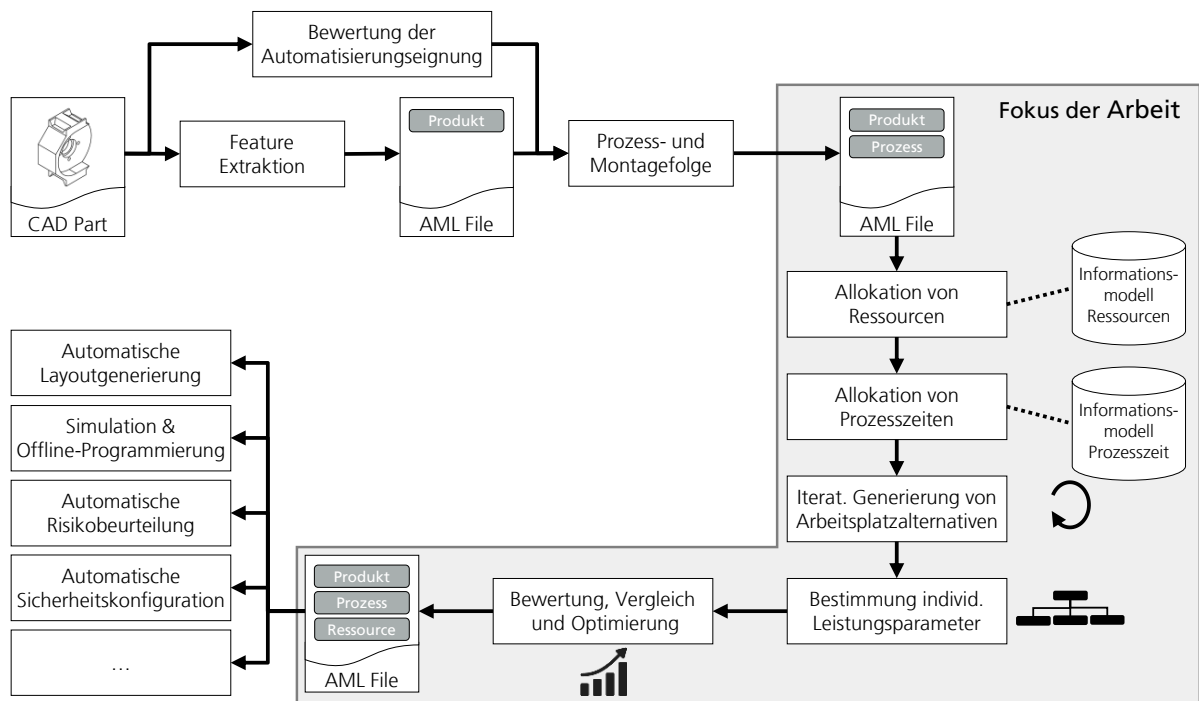


Abbildung 7.1: Digitaler Planungsprozess von Montagearbeitsplätzen – von den Produktdaten zum Montagearbeitsplatz. Dunkel hervorgehoben ist der betrachtete Umfang der vorliegenden Arbeit

Computer Aided Assembly Planning (CAAP)

Heutzutage wird viel Aufwand in die Erstellung der Prozessinformationen gesteckt. Dies betrifft insb. die Identifikation der Montageschritte sowie die Ableitung der zugehörigen Prozessparameter. Ein Schwerpunkt aktueller Forschung liegt daher auf der direkten »Ableitung optimierter Montagevorranggraphen« und der automatischen Identifikation »relevanter Produkt- und Prozessparameter« aus den zur Verfügung stehenden geometrischen Modellen. Es gilt, die aufwendige Suche nach montagerelevanten, geometrischen Eigenschaften (Assembly Features) zu automatisieren sowie die Möglichkeit von Fehlannahmen in der Identifikation und Parametrierung der Montageprozesse und -reihenfolge zu reduzieren. Eine erste Veröffentlichung im Hinblick auf die Kombination der automatischen Bauteilanalyse (Computer Aided Assembly Planning, CAAP) mit der Methode zur automatisierten Grobplanung von Montagearbeitsplätzen ist bereits erfolgt (Fechter & Neb 2019).

Automatische Bewertung der Automatisierungseignung

Für den Schritt der Ressourcenallokation muss bekannt sein, wie gut sich ein Produkt und dessen Montageprozesse für eine Automatisierung eignen. Dieser Schritt erfolgt heutzutage

vornehmlich durch manuelle Analyse und Dokumentation, was die Ergebnisse abhängig vom Erfahrungswissen, wie auch dem subjektiven Empfinden des Experten macht.

Am Fraunhofer IPA wird daher an einer reproduzierbaren und automatisierten »Bewertung der Automatisierungseignung« von CAD-Bauteilen und -Baugruppen geforscht. Erste Ergebnisse der Formalisierung und Reproduktion manuellen Erfahrungswissens zur Bewertung der Automatisierungseignung von Bauteilen und Baugruppen, unter Nutzung der Verfahren des maschinellen Lernens, finden sich bei Schönhof & Fechter (2020).

Automatische Risikobeurteilung und Sicherheitskonfiguration

Weiterführender Bedarf an Forschung besteht im Bereich der »Qualifikation und Zertifizierung« von rekonfigurierbaren Montageprozessen und -arbeitsplätzen. Ein schneller Produktionsanlauf nach Initialisierung oder Rekonfiguration wird aktuell in vielen Fällen durch regulatorische Prozesse im Rahmen der Qualifikation und Zertifizierung der Systeme erschwert.

Ein gutes Beispiel hierfür ist das sichere Zusammenspiel unterschiedlicher Ressourcen. Aufgrund der Vorgaben der Maschinensicherheit und zur Reduktion potentieller Gefährdungen ist eine technische Dokumentation und Risikobeurteilung zur Generierung einer CE-Kennzeichnung für den Produktionsbetrieb unerlässlich. Ein Großteil der Risiko- und Gefährdungsbeurteilung kann anhand der Systemeigenschaften der Produkt-, Prozess- und Ressourcendomänen (PPR) abgeleitet und in der Konzeptionsphase des Montagearbeitsplatzes zur Definition der Sicherheitskonfiguration verwendet werden (Awad et al. 2017; Koch 2019). Neben einer beschleunigten Planung, gilt es daher Möglichkeiten zu finden, wie diese so generierten Systemlösungen in kurzer Zeit und mit wenig Aufwand für einen operativen Betrieb qualifiziert werden können.

Automatische Layoutgenerierung

Zukünftige Forschung sollte ebenso die automatische »Generierung alternativer Layouts« der Produktionsressourcen adressieren. Gerade in der Brownfield-Planung ergeben sich strikte, meist unveränderliche Randbedingungen aufgrund externer Infrastruktur, Medienversorgung oder des verfügbaren Platzangebots, die bei der Anordnung der Ressourcen berücksichtigt werden müssen. Es gilt, Optimierungsverfahren zu entwickeln, die anhand der gegebenen Ressourcenauswahl und Flächendefinition eine optimierte Anordnung der

Ressourcen im Raum identifizieren.

Das Ergebnis der Layoutplanung kann in Verbindung mit der PPR-Modellierung der Montagearbeitsplätze für die automatische Generierung von Maschinenprogrammen (Offline Programming, OLP) bspw. im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme oder zur Absicherung und Optimierung des Montagearbeitsplatzes verwendet werden.

Erstellung und Pflege der Informationsmodelle

Kritisch anzumerken ist weiterhin der hohe Aufwand für die »Suche geeigneter Ressourcen« sowie die »Erstellung und Pflege der Informationsmodelle«. Eine Vollständigkeit der Informationen und Regeln kann dabei nicht garantiert werden. Dies gilt insbesondere für dynamische Themenfelder, die sich kontinuierlich weiterentwickeln, wie bspw. die MRK. Es ist daher wichtig festzuhalten, dass die hinterlegten Informationsmodelle und damit auch die entwickelten heuristischen Lösungsverfahren immer nur einen Bruchteil des Lösungsspektrums der Gesamtheit aller hybriden Montagearbeitsplätze abbilden können. Technische Lösungen zur automatischen Identifikation neuer Ressourcentypen, der kontinuierlichen Aktualisierung vorhandener Ressourcenattribute sowie der Modellierung von Regeln sind dabei wünschenswert und sollten in zukünftigen Arbeiten adressiert werden.

Absicherung der Informationsmodelle und Informationsqualität

Ein weiterer zentraler Punkt betrifft die »Absicherung der Informationsmodelle und der Informationsqualität«. Am Beispiel der Validierung der Expertenbefragung konnte gezeigt werden, wie eine Verknappung von Information im Fragebogen zu Fehlannahmen und damit ungültigen Lösungen führen konnte.

Hinzu kommt der Umstand, dass manuell generierte Informations- und Datenmodelle, stets das formale Wissen der modellierenden Personen beschreiben (vgl. Kapitel 2.5). Potentielle Unkenntnis über technische und organisatorische Zusammenhänge werden somit propagiert und finden sich final auch in den Ergebnissen der automatischen Optimierung wieder. Weiterhin gilt es festzuhalten, dass die Zusammenhänge relevanter Produktattribute oder Prozesseigenschaften sowie die Regeln der Ressourcenallokation nicht generisch und übergreifend für alle Anwendungsbereiche der Montage und Produktion definiert werden können. Jeder Transfer der vorliegenden Implementierung und zugehörigen Modellierungen in eine neue Anwendungsdomäne ist daher mit redaktionellem Aufwand verbunden.

Aus den genannten Gründen sollten sich neue Forschungsansätze explizit mit der »automatischen Gewinnung von Daten« aus strukturierten Texten (bspw. Normen, Lehrbüchern) oder dokumentierten Montagesystemen (bspw. AutomationML) befassen. Dabei gilt es, aus den vorhandenen Informationen automatisch die Informationsmodelle und -graphen abzuleiten. Methoden der automatisierten Schlussfolgerung (Reasoning) können die Informationsgewinnung unterstützen und zu einer gesteigerten Informationsqualität führen.

Dateninteroperabilität und Standardisierung von Informationsmodellen

Der Schritt der Informationsgewinnung, -modellierung und -pflege wird größeren Unternehmen mit leistungsfähigen IT-Systemen des Produktdaten- oder Ressourcenmanagements tendenziell leichter fallen als KMUs. Es gilt jedoch festzuhalten, dass aktuelle Bestrebungen der Forschung hinsichtlich »Dateninteroperabilität« der Produktions- und Produktdaten, der »Standardisierung von Informationsmodellen« sowie der Implementierung von übergreifenden »Austauschformaten zwischen den verschiedenen Engineering-Disziplinen« allen Unternehmen zur Verfügung stehen. Bekannte Beispiele hierfür sind die Bemühungen um eine Standardisierung der Strukturierung von Daten eines physischen oder nicht-physischen Assets (bspw. Maschine, Mensch, Produktionslinie) in Form der »Verwaltungsschale« sowie die Entwicklung »Digitaler Zwillinge« auf Ebene der Produkte und Produktionskomponenten.

Neue Lösungsverfahren

Wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, ist das NP-schwere Optimierungsproblem des FJSSP auf heute bekannten deterministischen Rechenmaschinen in endlicher Zeit nicht optimal lösbar. Neue Verfahren des »angewandten Quantencomputing« sind möglicherweise in der Lage, die Lösungssuche spezieller Optimierungsprobleme zu beschleunigen. Es gilt jedoch zu beachten, dass auch Quantenalgorithmen bei NP-schweren Problemen polynominell skalieren. Anders formuliert bedeutet dies, dass auch Quantenalgorithmen wahrscheinlich unter den gleichen algorithmischen Limitierungen hinsichtlich NP-schweren Optimierungsproblemen leiden werden, wie klassische deterministische Computer (Aaronson 2008). Erste Anwendungen des »angewandten Quantencomputings« sollen in den kommenden Jahren, insbesondere zur Lösung von Optimierungsproblemen, zum Verständnis molekularer und chemischer Zusammenhänge oder der Analyse komplexer Relationen in Wirtschaft

und Industrie implementiert werden. Hierfür steht der Fraunhofer Gesellschaft ab dem Jahr 2021 ein Quantencomputer für Forschungszwecke zur Verfügung (Fraunhofer 2020).

Literaturverzeichnis

- Aaltonen et al. 2018** Aaltonen, Iina; Salmi, Timo; Marstio, Ilari, 2018.
Refining levels of collaboration to support the design and evaluation of human-robot interaction in the manufacturing industry.
Procedia CIRP **72**, 2018, S. 93–98.
DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.214
- Aaronson 2008** Aaronson, Scott, 2008.
The Limits of Quantum Computers.
Scientific American **298** (Issue 3), 2008, S. 62–69
- Abele et al. 2006** Abele, Eberhard; Liebeck, Tobias; Wörn, Arno, 2006.
Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems.
CIRP Annals - Manufacturing Technology **55** (1), 2006, S. 433–436.
DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60452-1
- Ahlsvede 2019** Ahlsvede, Andreas, 2019.
Stundenlohn in der Automobilindustrie in Deutschland im Zeitraum der Jahre 2005 bis 2018.
URL: <https://www.shorturl.at/dguwB>
Zugriff am: 29.02.2020
- Andersen et al. 2014** Andersen, Rasmus Hasle; Solund, Thomas; Hallam, John, 2014.
Definition and initial case-based evaluation of hardware-independent robot skills for industrial robotic co-workers.
Proceedings of 41st International Symposium on Robotics; 2014, S. 101–107
- Awad et al. 2017** Awad, Ramez; Fechter, Manuel; van Heerden, Jessica, 2017.
Integrated risk assessment and safety consideration during design of HRC workplaces.
In: *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Automation 2017*.
DOI: 10.1109/ETFA.2017.8247648
- Awad & Fechter 2016** Awad, Ramez.; Fechter, Manuel, 2016.
Proceedings of ISR 2016: 47th International Symposium on Robotics: 21-22 June 2016,
2016.
URL:
<http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7558447>

- Babic 1999** Babic, Bojan, 1999.
Axiomatic design of flexible manufacturing systems.
International Journal of Production Research **37** (5), 1999, S. 1159–1173.
DOI: 10.1080/002075499191454
- Bahill & Gissing 1998** Bahill, A. Terry; Gissing, Bruce, 1998.
Re-evaluating systems engineering concepts using systems thinking.
IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews) **28** (4), 1998, S. 516–527.
DOI: 10.1109/5326.725338
- Bänziger et al. 2018** Bänziger, Timo; Kunz, Andreas; Wegener, Konrad, 2018.
Optimizing human–robot task allocation using a simulation tool based on standardized work descriptions.
Journal of Intelligent Manufacturing **3** (12), 2018, S. 285.
DOI: 10.1007/s10845-018-1411-1
- Bauer et al. 2015** Bauer, Wilhelm; Bender, Manfred; Kazmaier, B.; Kemmler, B.; Rally, Peter, 2015.
Leichtbauroboter in der manuellen Montage: Leichtbauroboter eröffnen neue Möglichkeiten der Arbeitsplatzgestaltung.
wt Werkstatttechnik online **105** (9), 2015, S. 610–613.
Zugriff am: 31.05.2018
- Bauer et al. 2016** Bauer, Wilhelm; Bender, Manfred; Braun, Martin; Rally, Peter; Scholtz, Oliver, 2016.
Lightweight robots in manual assembly – best to start simply!: Examining companies' initial experiences with lightweight robots.
Stuttgart, URL: <https://www.shorturl.at/kHQ12>
- Bauernhansl et al. 2012** Bauernhansl, Thomas; Mandel, Jörg; Diermann, Sven, 2012.
Evaluating Changeability Corridors for Sustainable Business Resilience.
Procedia CIRP **3**, 2012, S. 364–369.
DOI: 10.1016/j.procir.2012.07.063
- Bauernhansl 2014** Bauernhansl, Thomas, 2014.
Die Vierte Industrielle Revolution.
In: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik.*
Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 5–35.
ISBN: 978-3-658-04681-1

- Berkholz 2008** Berkholz, Daniel, 2008.
Einleitung: Wandlungsfähige Produktionssysteme - der Zukunft einen Schritt voraus.
In: Nyhuis, Peter; Reinhart, Gunther; Abele, Eberhard (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionssysteme*.
Garbsen: PZH-Verlag, S. 13–18.
ISBN: 978-3-939-02696-9
- Berufsgenossenschaft Holz und Metall 2013** Berufsgenossenschaft Holz und Metall, 2013.
BGHM-Information 101: Mensch und Arbeitsplatz in der Holz- und Metallindustrie. April 2019. Mainz.
URL: <https://www.shorturl.at/noBY8>
Zugriff am: 01.11.2019
- Beumelburg 2005** Beumelburg, Katharina, 2005.
Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation. Heimsheim: Jost-Jetter.
IPA-IAO-Forschung und -Praxis.
ISBN: 3-936947-52-X
- Biffel et al. 2017** Biffel, Stefan; Mordinyi, Richard; Steininger, Heinrich; Winkler, Dietmar, 2017.
Integrationsplattform für anlagenmodellorientiertes Engineering.
In: Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Band 2*.
Berlin: Springer Vieweg, S. 189–212.
ISBN: 978-3-662-53247-8
- Bokranz & Landau 2012** Bokranz, Rainer; Landau, Kurt, 2012.
Handbuch Industrial Engineering: Produktivitätsmanagement mit MTM. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart:
Schäffer-Poeschel-Verlag.
ISBN: 978-3-7910-2863-7
- Brassler & Schneider 2001** Brassler, Axel; Schneider, Herfried, 2001.
Valuation of strategic production decisions.
International Journal of Production Economics **69** (2), 2001, S. 119–127.
DOI: 10.1016/S0925-5273(99)00135-8
- Brown 2006** Brown, Christopher A., 2006.
Elements of Axiomatic Design: A simple and practical approach to engineering design.
Cazenovia, New York, NY, 2006
- Brucker 2004** Brucker, Peter (Hrsg.), 2004.
Scheduling Algorithms. Fourth Edition. Berlin und Heidelberg:
Springer-Verlag.
ISBN: 978-3-662-12944-9

- Bugge 2021** Bugge, Karen, 2021.
Technologien für digitale Zwillinge: Übersicht und Einordnung,
URL: <https://www.salt-solutions.de/solutions/detail/technologien-fuer-digitale-zwillinge-uebersicht-und-einordnung-2.html#ce-2625>
Zugriff am: 18.04.2021
- Bullinger & Ammer 1986** Bullinger, Hans-Jörg; Ammer, Dieter (Hrsg.), 1986.
Systematische Montageplanung. München: Hanser Verlag.
ISBN: 978-3-446-14606-7
- Buxbaum & Häusler 2020** Buxbaum, Hans-Jürgen; Häusler, Ruth, 2020.
Ladenburger Thesen zur zukünftigen Gestaltung der
Mensch-Roboter-Kollaboration.
In: Buxbaum, Hans-Jürgen (Hrsg.):
Mensch-Roboter-Kollaboration.
Wiesbaden Germany: Springer Gabler, S. 293–317.
ISBN: 978-3-658-28306-3
- Chang et al. 2013** Chang, Yung-Chia; Li, Vincent C.; Chiang, Chia-Ju, 2013.
An ant colony optimization heuristic for an integrated
production and distribution scheduling problem.
Engineering Optimization **46** (4), 2013, S. 503–520.
DOI: 10.1080/0305215X.2013.786062
- Chen et al. 2011** Chen, Fei; Sekiyama, K.; Sasaki, H.; Huang, Jian; Sun, Baiqing;
Fukuda, T., 2011.
Assembly strategy modeling and selection for human and robot
coordinated cell assembly.
In:
2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots
and Systems (IROS 2011).
San Francisco, CA, S. 4670–4675.
25.09.2011 - 30.09.2011.
ISBN: 978-1-61284-456-5
- Chen et al. 2012** Chen, Fei; Sekiyama, Kosuke; Fukuda, Toshio, 2012.
A genetic algorithm for subtask allocation within human and
robot coordinated assembly.
In:
2012 International Symposium on Micro-Nano Mechatronics
2012.
Nagoya, Japan, S. 507–511.
04.-07. November 2012.
ISBN: 978-1-4673-4813-3

- Chen et al. 2014** Chen, Fei; Sekiyama, Kosuke; Cannella, Ferdinando; Fukuda, Toshio, 2014.
Optimal Subtask Allocation for Human and Robot Collaboration Within Hybrid Assembly System.
IEEE Transactions on Automation Science and Engineering **11** (4), 2014, S. 1065–1075.
DOI: 10.1109/TASE.2013.2274099
- Chittenden & Derregia 2015** Chittenden, Francis; Derregia, Mohsen, 2015.
Uncertainty, irreversibility and the use of 'rules of thumb' in capital budgeting.
The British Accounting Review **47** (3), 2015, S. 225–236.
DOI: 10.1016/j.bar.2013.12.003
- Choi & Ip 1999** Choi, C. K.; Ip, W. H., 1999.
A comparison of MTM and RTM.
Work Study **48** (2), 1999, S. 57–61.
DOI: 10.1108/00438029910253707
- Chryssolouris & Subramaniam 2001** Chryssolouris, George; Subramaniam, Velusamy, 2001.
Dynamic Scheduling of Manufacturing Job Shops using Genetic Algorithms.
Journal of Intelligent Manufacturing **12** (3), 2001, S. 281–293.
DOI: 10.1023/A:1011253011638
- Cochran et al. 2001** Cochran, David S.; Arinez, Jorge F.; Duda, James W.; Linck, Joachim, 2001.
A decomposition approach for manufacturing system design.
Journal of Manufacturing Systems **20** (6), 2001, S. 371–389.
DOI: 10.1016/S0278-6125(01)80058-3
- Costa Mateus et al. 2018** Costa Mateus, João E.; Aghezzaf, El-Houssaine; Claeys, Dieter; Limère, Veronique; Cottyn, Johannes, 2018.
Method for transition from manual assembly to Human-Robot collaborative assembly.
IFAC-PapersOnLine **51** (11), 2018, S. 405–410.
DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.328
- Cuiper 2000** Cuiper, Ralf, 2000.
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen. München: Utz-Verlag.
Forschungsberichte / IWB.
ISBN: 978-3896757838
- Cutting-Decelle et al. 2016** Cutting-Decelle, Anne-Françoise.; Young, Robert I.; Michel, Jean-Jacques; Reyes Grangel, M.; Le Cardinal, Julie; Bourey, Jean-Pierre, 2016.
ISO 15531 MANDATE: A Product-process-resource based Approach for Managing Modularity in Production Management.
Concurrent Engineering **15** (2), 2016, S. 217–235.
DOI: 10.1177/1063293X07079329

- Diedrich et al. 2017** Diedrich, Christian; Hadlich, Thomas; Thron, Mario, 2017. Semantik durch Merkmale für Industrie 4.0. In: Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Band 2*. Berlin: Springer Vieweg, S. 417–432. ISBN: 978-3-662-53247-8
- Dietz et al. 2013** Dietz, Thomas; Pott, Andreas; Verl, Alexander, 2013. Practice for planning and realization of advanced industrial robot systems. In: 2013 44th International Symposium on Robotics (ISR). Seoul, Korea (South), S. 1–4. 24.10.2013 - 26.10.2013. ISBN: 978-1-4799-1173-8
- Dietz 2019** Dietz, Thomas, 2019. *Knowledge-based cost-benefit analysis of robotics for SME-like manufacturing*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. ISBN: 978-3-8396-1437-2
- DIN 33402-2** DIN 33402-2:2005. *Ergonomie - Körpermaße des Menschen: Teil 2: Werte*
- DIN EN ISO 10218-2** DIN EN ISO 10218-2:2011:2011. *Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 2: Robotersysteme und Integration: Deutsche Fassung EN ISO 10218-2:2011 Robot systems and integration*
- DIN/ISO 8580** Deutsche Industrie Norm 8580:2003-09-01. *Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung*
- DIN/ISO 8593** DIN/ISO 8593:2003-09-01. *Fertigungsverfahren Fügen: Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*
- Ding et al. 2014** Ding, Hao; Schipper, Malte; Matthias, Bjorn, 2014. Optimized task distribution for industrial assembly in mixed human-robot environments - Case study on IO module assembly. In: 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Taipei, S. 19–24. 18.08.2014 - 22.08.2014. ISBN: 978-1-4799-5283-0
- Domschke et al. 1997** Domschke, Wolfgang; Scholl, Armin; Voß, Stefan, 1997. *Produktionsplanung: Ablauforganisatorische Aspekte ; mit 48 Tabellen. 2., überarb. und erw. Aufl.* Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. Springer-Lehrbuch. ISBN: 978-3-540-63560-4

-
- Domschke et al. 2015** Domschke, Wolfgang; Drexl, Andreas; Klein, Robert, 2015. *Einführung in Operations Research*. 9., überarb. u. verb. Aufl. 2015. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-662-48216-2
- Dorigo et al. 1999** Dorigo, Marco; Di Caro, Gianni; Gambardella, Luca M., 1999. Ant Algorithms for Discrete Optimization. *Artificial Life* **5** (2), 1999, S. 137–172. DOI: 10.1162/106454699568728
- Drath 2010** Drath, Rainer, 2010. *Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-642-04673-5
- Dueck 1993** Dueck, Gunter, 1993. New Optimization Heuristics. *Journal of Computational Physics* **104** (1), 1993, S. 86–92. DOI: 10.1006/jcph.1993.1010
- ECLASS e.V. 2021** ECLASS e.V., 2021. *Der ECLASS Standard*, URL: <https://www.eclass.eu/standard.html> Zugriff am: 18.04.2021
- Ehrlenspiel et al. 2007** Ehrlenspiel, Klaus; Kiewert, Alfons; Lindemann, Udo; Mörtl, Markus, 2007. *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 6., überarbeitete und korrigierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. VDI-Buch. ISBN: 978-3540742227
- Eigner 2013** Eigner, Martin, 2013. Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung auf einer Plattform für System Lifecycle Management. In: Sandler, Ulrich (Hrsg.): *Industrie 4.0: Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysML*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 91–110. ISBN: 978-3-642-36917-9
- Eisele 2018** Eisele, Michael, 2018. *Ein Verfahren zur Planung von verschwendungsarmen getakteten Fließmontagen*. Stuttgart. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. ISBN: 978-3-8396-1376-4
- Eisenführ et al. 2010** Eisenführ, Franz; Weber, Martin; Langer, Thomas, 2010. *Rationales Entscheiden*. 5., überarb. und erw. Aufl. Berlin: Springer-Verlag. Springer-Lehrbuch. ISBN: 978-3-642-02848-9

- ElMaraghy & Wiendahl 2009** ElMaraghy, Hoda A.; Wiendahl, Hans-Peter, 2009. Changeability - An Introduction. In: ElMaraghy, Hoda A. (Hrsg.): *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*. London: Springer, S.3–24. ISBN: 978-1-84882-066-1
- Eversheim 1981** Eversheim, Walter, 1981. *Organisation in der Produktionstechnik: Bd. 4: Fertigung und Montage*. Düsseldorf: VDI-Verlag. Studium und Praxis. ISBN: 978-3184004545
- Eversheim 1986** Eversheim, Walter, 1986. Wirtschaftlichkeit von Montagesystemen. In: Spur, Günter; Stöferle, Theodor (Hrsg.): *Fügen, Handhaben und Montieren*. München: Hanser-Verlag, S. 793–800. ISBN: 3446125361
- Eversheim 1989** Eversheim, Walter, 1989. *Organisation in der Produktionstechnik: Band 4. 2.*, neubearbeitete und erweiterte Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag. Studium und Praxis. ISBN: 978-3-642-61344-9
- Fasth et al. 2008** Fasth, Åsa; Stahre, Johan; Dencker, Kerstin, 2008. Measuring and analysing Levels of Automation in an assembly system. In: Mitsuishi, Mamoru; Ueda, Kanji; Kimura, Fumihiko (Hrsg.): *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*. London: Springer London, S. 169–172. ISBN: 978-1-84800-266-1
- Fasth et al. 2012** Fasth, Åsa; Provost, Julien; Fabian, Martin; Stahre, Johan; Lennartson, Bengt E.V., 2012. From Task Allocation Towards Resource Allocation when Optimising Assembly Systems. *Procedia CIRP* **3**, 2012, S. 400–405. DOI: 10.1016/j.procir.2012.07.069
- Fechter et al. 2016** Fechter, Manuel; Foith-Förster, Petra; Pfeiffer, Marc Sascha; Bauernhansl, Thomas, 2016. Axiomatic Design Approach for Human-Robot Collaboration in Flexibly Linked Assembly Layouts. *Procedia CIRP* **50**, 2016, S. 629–634. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.186
- Fechter et al. 2018** Fechter, Manuel; Seeber, Carsten; Chen, Shengjian, 2018. Integrated Process Planning and Resource Allocation for Collaborative Robot Workplace Design. *Procedia CIRP* **72**, 2018, S. 39–44. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.179

-
- Fechter et al. 2019a** Fechter, Manuel; Dietz, Thomas; Bauernhansl, Thomas, 2019.
Cost calculation model for reconfigurable, hybrid assembly systems.
In:
2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE).
Vancouver, BC, Canada, S. 836–841.
8/22/2019 - 8/26/2019.
ISBN: 978-1-7281-0356-3
- Fechter & Neb 2019** Fechter, Manuel; Neb, Alexander, 2019.
From 3D product data to hybrid assembly workplace generation using the AutomationML exchange file format.
Procedia CIRP **81**, 2019, S. 57–62.
DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.011
- Fechter et al. 2019b** Fechter, Manuel; Keller, Robert; Chen, Shengjian; Seeber, Carsten, 2019.
Heuristic Search Based-Design of Hybrid, Collaborative Assembly Systems.
In:
WGP Jahreskongress 2018.
Aachen, S. 188–197.
ISBN: 978-3-030-03451-1
- Fechter & Dietz 2020** Fechter, Manuel; Dietz, Thomas, 2020.
Zusammenfassung und Ausblick.
In: Bauernhansl, Thomas; Fechter, Manuel; Dietz, Thomas (Hrsg.): *ARENA2036 - Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion*.
Berlin: Springer Vieweg-Verlag, S. 145–158.
ISBN: 978-3-662-60490-8
- Feldhusen & Grote 2013** Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich, 2013.
Einleitung.
In: Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*.
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 769–771.
ISBN: 978-3-642-29568-3
- Feldmann 2014a** Feldmann, Klaus, 2014.
Einführung.
In: Feldmann, Klaus; Schöppner, Volker; Spur, Günter (Hrsg.): *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*.
München: Hanser-Verlag, S. 3–22.
ISBN: 978-3-446-42827-0

- Feldmann 2014b** Feldmann, Klaus, 2014.
Montagezellen.
In: Feldmann, Klaus; Schöppner, Volker; Spur, Günter (Hrsg.):
Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren.
München: Hanser-Verlag, S. 435–445.
ISBN: 978-3-446-42827-0
- Feldmann 2014c** Feldmann, Klaus, 2014.
Übersicht zu Montagesystemen.
In: Feldmann, Klaus; Schöppner, Volker; Spur, Günter (Hrsg.):
Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren.
München: Hanser-Verlag, S. 591–601.
ISBN: 978-3-446-42827-0
- Ferrer et al. 2015** Ferrer, Borja Ramis; Ahmad, Bilal; Lobov, Andrei;
Vera, Daniel Alexandre; Lastra, Jose Luis Martinez;
Harrison, Robert, 2015.
An approach for knowledge-driven product, process and
resource mappings for assembly automation.
In:
2015 IEEE International Conference on Automation Science
and Engineering (CASE).
Gothenburg, Sweden, S. 1104–1109.
24.08.2015 - 28.08.2015.
ISBN: 978-1-4673-8183-3
- Fiege 2009** Fiege, René, 2009.
Axiomatic Design. Wiesbaden: Gabler-Verlag.
ISBN: 978-3-8349-2136-9
- Fischer et al. 2017** Fischer, Martin; Krings, Bettina-Johanna; Moniz, Antonio;
Zimpelmann, Eike, 2017.
Herausforderungen der Mensch-Roboter- Kollaboration.
lernen & lehren **32** (125), 2017, S. 8–14.
Zugriff am: 19.10.2019
- Flehsig et al. 2019** Flehsig, Christian; Lohmer, Jacob; Lasch, Rainer, 2019.
Realizing the Full Potential of Robotic Process Automation
Through a Combination with BPM.
In: Bierwirth, Christian; Kirschstein, Thomas; Sackmann, Dirk
(Hrsg.): *Logistics Management*.
Cham: Springer International Publishing, S. 104–119.
ISBN: 978-3-030-29820-3
- Fleschutz 2010** Fleschutz, Timo, 2010.
*Beitrag zur nachhaltigen industriellen Wertschöpfung durch
multiattributive Bewertung von Montageanlagen*. Stuttgart:
Fraunhofer-Verlag. Berichte aus dem Produktionstechnischen
Zentrum Berlin.
ISBN: 978-3-8396-0171-6

- Foith-Förster & Bauernhansl 2015** Foith-Förster, Petra; Bauernhansl, Thomas, 2015. Changeable assembly systems through flexibly linked process modules (in publication): 48th CIRP Conference on Manufacturing Systems CIRP CMS 2015 ; 24.-26. Juni 2015, Ischia. *Procedia CIRP* (00), 2015, S. 0
- Fraunhofer 2020** Fraunhofer, 2020. *Fraunhofer und IBM bringen Quantenrechner für Industrie und Forschung nach Deutschland: Presseinformation*. München, URL: <https://www.shorturl.at/rtuJW>
- Fries et al. 2021** Fries, Christian; Fechter, Manuel; Ranke, Daniel; Trierweiler, Michael; Al Assadi, Anwar; Foith-Förster, Petra; Wiendahl, Hans-Hermann; Bauernhansl, Thomas, 2021. Fluid Manufacturing Systems (FLMS). In: Weißgraeber, Philipp; Heieck, Frieder; Ackermann, Clemens (Hrsg.): *Advances in Automotive Production Technology - Theory and Application*. Berlin: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-662-62961-1
- Frohm et al. 2008** Frohm, Jörgen; Lindström, Veronica; Stahre, Johan; Winroth, Mats, 2008. Levels of automation in manufacturing. *Ergonomia-an International journal of ergonomics and human factors* **30** (3), 2008, S. 1–28
- Frohm 2008** Frohm, Jörgen, 2008. *Levels of automation in production systems*. Göteborg: Chalmers Univ. of Technology. ISBN: 978-91-7385-055-1
- Gagsch & Herbst 2001** Gagsch, Bernd; Herbst, Claus, 2001. Ausrichtung der Montage auf den Markt mit Hilfe der Simulation. In: Westkämper, Engelbert; Bullinger, Hans-Jörg; Horváth, Péter; Zahn, Erich (Hrsg.): *Montageplanung - effizient und marktgerecht*. Berlin: Springer, S. 37–56. ISBN: 978-3-642-56438-3
- Gerkey & Mataric 2002** Gerkey, Brian P.; Mataric, Maja J., 2002. Sold!: Auction methods for multirobot coordination. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **18** (5), 2002, S. 758–768. DOI: 10.1109/TRA.2002.803462
- Götze 2008** Götze, Uwe, 2008. *Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. 6., durchges. und aktualisierte Aufl. Berlin: Springer. Springer-Lehrbuch. ISBN: 978-3-540-78872-0

- Greschke 2015** Greschke, Peter, 2015.
Matrix-Produktion als Konzept einer taktunabhängigen Fließfertigung. Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität Braunschweig.
ISBN: 978-3-8027-8344-9
- Gröll 2018** Gröll, Lutz, 2018.
Klassifikation von Optimierungsproblemen.
at - Automatisierungstechnik **66** (11), 2018, S. 903–927.
DOI: 10.1515/auto-2018-0081
- Großmann et al. 2013** Großmann, Christian; Özdemir, Denis; Eilers, Jan; Müller, Rainer; Possel-Dölken, Frank; Schreiber, Andreas, 2013.
Lösungen für die Smart Factory bei Phoenix Contact.
In: Spath, Dieter (Hrsg.): *Zukunftsfähige Montagesysteme*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 221–249.
ISBN: 978-3-8396-0605-6
- Gualtieri et al. 2021** Gualtieri, Luca; Rauch, Erwin; Vidoni, Renato, 2021.
Emerging research fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: A systematic literature review.
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing **67**, 2021, S. 1–30.
DOI: 10.1016/j.rcim.2020.101998
- Hägele et al. 2016** Hägele, Martin; Nilsson, Klas; Pires, Noberto; Bischoff, Rainer, 2016.
Industrial Robotics.
In: Siciliano, Bruno; Khatib, Oussama (Hrsg.): *Springer Handbook of Robotics*. Cham: Springer International Publishing, S. 1385–1421.
ISBN: 978-3-319-32552-1
- Hartel & Lotter 2012** Hartel, Marko; Lotter, Bruno, 2012.
Planung und Bewertung von Montagesystemen.
In: Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 365–388.
ISBN: 978-3-642-29060-2
- Heger 2007** Heger, Christoph Lutz, 2007.
Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum. Berichte aus dem IFA.
ISBN: 978-3-939026-43-3
- Heilala & Voho 2001** Heilala, Juhani; Voho, Paavo, 2001.
Modular reconfigurable flexible final assembly systems.
Assembly Automation **21** (1), 2001, S. 20–30.
DOI: 10.1108/01445150110381646

- Heinen et al. 2008** Heinen, Tobias; Rimpau, Christoph; Wörn, Arno, 2008. Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. In: Nyhuis, Peter; Reinhart, Gunther; Abele, Eberhard (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionssysteme*. Garbsen: PZH-Verlag, S. 19–31. ISBN: 978-3-939-02696-9
- Hengstebeck et al. 2016** Hengstebeck, André; Weisner, Kirsten; Klöckner, Maïke; Deuse, Jochen; Kuhlenkötter, Bernd; Roßmann, Jürgen, 2016. Formal Modelling of Manual Work Processes for the Application of Industrial Service Robotics. *Procedia CIRP* **41**, 2016, S. 364–369. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.013
- Hentsch et al. 2013** Hentsch, Peter; Eilers, Jan; Tepper, Thorsten, 2013. Prozessorientierte rekonfigurierbare Hochleistungsmontage mechatronischer Produkte. In: Spath, Dieter (Hrsg.): *Zukunftsfähige Montagesysteme*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 273–279. ISBN: 978-3-8396-0605-6
- Hernandez & Wiendahl 2005** Hernandez, Roberto; Wiendahl, Hans-Peter, 2005. Die wandlungsfähige Fabrik. In: Kaluza, Bernd; Blecker, Thorsten (Hrsg.): *Erfolgsfaktor Flexibilität*. Berlin: Erich-Schmidt-Verlag, S. 203–228. ISBN: 978-3-503-08367-1
- Hernández Morales 2003** Hernández Morales, Roberto, 2003. *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*. Düsseldorf: VDI-Verlag. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft. ISBN: 978-3183149162
- Hesse 2012a** Hesse, Stefan, 2012. Automatische Montagemaschinen. In: Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 195–272. ISBN: 978-3-642-29060-2
- Hesse 2012b** Hesse, Stefan, 2012. Montagegerechte Produktgestaltung. In: Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 9–48. ISBN: 978-3-642-29060-2

- Hesse 2012c** Hesse, Steffen, 2012.
Automatische Montagemaschinen.
In: Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*.
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 195–272.
ISBN: 978-3-642-29060-2
- Hesse et al. 1992** Hesse, Wolfgang; Merbeth, Günter; Frölich, Rainer, 1992.
Software-Entwicklung: Vorgehensmodelle, Projektführung, Produktverwaltung. München: Oldenbourg-Verlag. Handbuch der Informatik.
ISBN: 978-3486206937
- Hirzle 2014** Hirzle, Anton, 2014.
AutomationML - ein Überblick.
In: Hirzle, Anton (Hrsg.): *AutomationML - Fachexperten erklären das Format*.
, S. 3–5
- Hitzler 2008** Hitzler, Pascal, 2008.
Semantic Web: Grundlagen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. eXamen.press.
ISBN: 978-3-540-33993-9
- Hoffman 2019** Hoffman, Guy, 2019.
Evaluating Fluency in Human–Robot Collaboration.
IEEE Transactions on Human-Machine Systems **49** (3), 2019, S. 209–218.
DOI: 10.1109/THMS.2019.2904558
- Holtewert 2018** Holtewert, Philipp, 2018.
Design for Capacity Flexibility : Entwicklung einer Methodik zur wirtschaftlichen Kapazitätsflexibilisierung mithilfe von substituierbaren Produktdesignvarianten. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung.
ISBN: 978-3-8396-1266-8
- Hoppe 2017** Hoppe, Stefan, 2017.
Standardisierte horizontale und vertikale Kommunikation.
In: Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Band 2*.
Berlin: Springer Vieweg, S. 371–390.
ISBN: 978-3-662-53247-8
- Horváth 2003** Horváth, Péter, 2003.
Controlling. 9., vollst. überarb. Aufl. München: Vahlen. Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften.
ISBN: 3 8006 2992 5

-
- Hu et al. 2008** Hu, Shixin Jack; Zhu, Xiaowei; Wang, Hui; Koren, Yoram, 2008. Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **57** (1), 2008, S. 45–48.
DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.138
- Hundt & Prinz 2014** Hundt, Lorenz; Prinz, Josef, 2014. AutomationML - Datenaustausch. In: Hirzle, Anton (Hrsg.): *AutomationML - Fachexperten erklären das Format.*, S. 12–15
- IEC 2019** IEC, 2019. *IEC White Paper: Semantic interoperability: Challenges in the digital transformation age.* Geneva.
ISBN: 978-2-8322-7321-0
- Jonas 2000** Jonas, Christian, 2000. *Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen.* München: Utz-Verlag. Forschungsberichte / IWB.
ISBN: 3896758705
- Karp 1972** Karp, Richard M., 1972. Reducibility among combinatorial problems. In: *Complexity of computer computations.* Boston, MA: Springer, S. 85–103.
ISBN: 978-1-468-42001-2
- Keddis et al. 2015** Keddis, Nadine; Kainz, Gerd; Zoitl, Alois; Knoll, Alois, 2015. Modeling production workflows in a mass customization era. In: 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Seville, S. 1901–1906. 17.03.2015 - 19.03.2015.
ISBN: 978-1-4799-7800-7
- Kluge 2011** Kluge, Stefan, 2011. *Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme.* Stuttgart: Fraunhofer Verlag. IPA-IAO-Forschung und Praxis.
ISBN: 978-3-939890-81-2
- Koch 2019** Koch, Thomas, 2019. Approach for an automated safety configuration for robot applications. *Procedia CIRP* **84**, 2019, S. 896–901.
DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.280

- Konold & Reger 2009** Konold, Peter; Reger, Herbert, 2009.
Praxis der Montagetechnik: Produktdesign, Planung, Systemgestaltung. 2., überarb. und erw. Aufl., korrigierter Nachdruck. Wiesbaden: Springer Vieweg-Verlag. Vieweg Praxiswissen.
ISBN: 978-3-528-13843-1
- Koren 2010** Koren, Yoram, 2010.
The global manufacturing revolution: Product-process-business integration and reconfigurable systems. Hoboken, N.J: Wiley. Wiley series in systems engineering and management.
ISBN: 978-0-470-58377-7
- Kroll et al. 2016** Kroll, Christian; Bujak, Adam; Darius, Volker; Enders, Wolfgang; Esser, Marcus, 2016.
Robotic Process Automation - Robots conquer business processes in back offices: A 2016 study conducted by Capgemini Consulting and Capgemini Business Services.
URL: <https://www.shorturl.at/exCRT>
Zugriff am: 06.09.2020
- Kromrey & Strübing 2009** Kromrey, Helmut; Strübing, Jörg, 2009.
Empirische Sozialforschung: Modelle und Methoden der standardisierten Datenerhebung und Datenauswertung. 12., überarb. und erg. Aufl. Stuttgart: Lucius & Lucius. UTB Soziologie.
ISBN: 3-8252-1040-5
- Küber 2017** Küber, Christian, 2017.
Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen in der variantenreichen Serienmontage. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung.
ISBN: 978-3-8396-1232-3
- Kubicek 1977** Kubicek, Herbert, 1977.
Heuristischer Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung.
In: Köhler, Richard (Hrsg.): *Empirische und handlungstheoretische Forschungskonzeptionen in der Betriebswirtschaftslehre*.
Stuttgart: Poeschel, S. 3–36.
ISBN: 3-7910-0214-7
- Kuhn et al. 2019** Kuhn, Thomas; Damm, Markus; Schnicke, Frank, 2019.
Die Revolution braucht neue Software.
Digital Engineering Magazin (1), 2019, S. 40–41.
URL: https://www.basys40.de/wp-content/uploads/2019/12/Sonderdruck_Dig_Eng_Magazin_HM_2019.pdf
Zugriff am: 18.04.2021

- KUKA AG 2019** KUKA AG, 2019.
Human-Robot-Collaboration: More than just a technical solution.
Augsburg, URL: <https://www.shorturl.at/ekKY7>
Zugriff am: 24.03.2019
- Kulak & Kahraman 2005** Kulak, Osman; Kahraman, Cengiz, 2005.
Multi-attribute comparison of advanced manufacturing systems using fuzzy vs. crisp axiomatic design approach.
International Journal of Production Economics **95** (3), 2005, S. 415–424.
DOI: 10.1016/j.ijpe.2004.02.009
- Landherr et al. 2013** Landherr, Martin Hubert; Neumann, Michael; Volkmann, Johannes; Constantinescu, Carmen, 2013.
Digitale Fabrik.
In: Westkämper, Engelbert (Hrsg.): *Digitale Produktion.*
Berlin: Springer Vieweg, S. 107–131.
ISBN: 978-3-642-20258-2
- Landherr 2014** Landherr, Martin Hubert, 2014.
Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration für die variantenreiche Serienfertigung. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag.
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung.
ISBN: 978-3-8396-0809-8
- Lenstra et al. 1977** Lenstra, Jan Karel; Rinnooy Kan, Alexander H.G.; Brucker, Peter J., 1977.
Complexity of Machine Scheduling Problems.
Annals of Discrete Mathematics **1** (1), 1977, S. 343–362.
DOI: 10.1016/S0167-5060(08)70743-X
- LIAA 2013** LIAA, 2013.
Lean Automation Project: Motivation.
Stuttgart, URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/608604/de>
Zugriff am: 21.09.2020
- Liu et al. 2015** Liu, Chunfeng; Wang, Jufeng; Leung, Joseph Y.-T.; Li, Kai, 2015.
Solving cell formation and task scheduling in cellular manufacturing system by discrete bacteria foraging algorithm.
International Journal of Production Research **54** (3), 2015, S. 923–944.
DOI: 10.1080/00207543.2015.1113328
- Lohse et al. 2005** Lohse, Niels; Hirani, Hitendra; Ratchev, Svetan, 2005.
Equipment ontology for modular reconfigurable assembly systems.
International Journal of Flexible Manufacturing Systems **17** (4), 2005, S. 301–314.
DOI: 10.1007/s10696-006-9030-0

- Lotter 1992** Lotter, Bruno, 1992.
Wirtschaftliche Montage: Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik. 2., erw. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag.
ISBN: 3184011682
- Lotter & Wiendahl 2009** Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter, 2009.
Changeable and Reconfigurable Assembly Systems.
In: ElMaraghy, Hoda A. (Hrsg.): *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*.
London: Springer, S.127–142.
ISBN: 978-1-84882-066-1
- Lotter 2012a** Lotter, Bruno, 2012.
Die primär-Sekundär-Analyse.
In: Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*.
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 49–78.
ISBN: 978-3-642-29060-2
- Lotter 2012b** Lotter, Bruno, 2012.
Einführung.
In: Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*.
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 1–8.
ISBN: 978-3-642-29060-2
- Lotter 2012c** Lotter, Bruno, 2012.
Einführung.
In: Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*.
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 1–8.
ISBN: 978-3-642-29060-2
- Lotter 2012d** Lotter, Bruno, 2012.
Manuelle Montage von Kleingeräten.
In: Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*.
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 109–146.
ISBN: 978-3-642-29060-2
- Lotter & Wiendahl 2012** Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.), 2012.
Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg:
Springer-Verlag.
ISBN: 978-3-642-29060-2
- Lotter 2012e** Lotter, Edwin, 2012.
Hybride Montagesysteme.
In: Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*.
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 167–193.
ISBN: 978-3-642-29060-2

- Lotter 2014** Lotter, Edwin, 2014.
Montagezellen.
In: Feldmann, Klaus; Schöppner, Volker; Spur, Günter (Hrsg.): *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*.
München: Hanser-Verlag, S. 483–513.
ISBN: 978-3-446-42827-0
- Lüder et al. 2014** Lüder, Arndt; Hundt, Lorenz; Schmidt, Nicole;
Schleipen, Miriam, 2014.
AutomationML - die Architektur.
In: Hirzle, Anton (Hrsg.): *AutomationML - Fachexperten erklären das Format*.
, S. 6–8
- Lüder & Schmidt 2017** Lüder, Arndt; Schmidt, Nicole, 2017.
AutomationML in a Nutshell.
In: Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas;
ten Hompel, Michael (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Band 2*.
Berlin: Springer Vieweg, S. 213–258.
ISBN: 978-3-662-53247-8
- Lüder 2017** Lüder, Arndt, 2017.
Integration des Menschen in Szenarien der Industrie 4.0.
In: Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas;
ten Hompel, Michael (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Band 2*.
Berlin: Springer Vieweg, S. 559–573.
ISBN: 978-3-662-53247-8
- Lüttich & Fiege 2008** Lüttich, Michael; Fiege, René, 2008.
Anwendung von Axiomatic Design für den Entwurf serviceorientierter Architekturen: Arbeitsbericht Nr. 2008-02.
Ilmenau: Techn. Univ. Inst. für Wirtschaftsinformatik. Ilmenauer Beiträge zur Wirtschaftsinformatik.
ISBN: 978-3-938940-20-4
- Malvankar-Mehta & Mehta 2015** Malvankar-Mehta, Monali S.; Mehta, Siddhartha S., 2015.
Optimal task allocation in multi-human multi-robot interaction.
Optimization Letters **9** (8), 2015, S. 1787–1803.
DOI: 10.1007/s11590-015-0890-7
- März & von Langsdorff 2001** März, Lothar; von Langsdorff, Philipp, 2001.
Flexibilität und Marktorientierung in der Montage.
In: Westkämper, Engelbert; Bullinger, Hans-Jörg;
Horváth, Péter; Zahn, Erich (Hrsg.): *Montageplanung - effizient und marktgerecht*.
Berlin: Springer, S. 3–10.
ISBN: 978-3-642-56438-3
- Matt 2007** Matt, Dominik T., 2007.
Achieving Operational Excellence Through Systematic Complexity Reduction in Manufacturing System Design.
Key Engineering Materials **344**, 2007, S. 865–872.
DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.344.865

- Matt 2010** Matt, Dominik T., 2010.
Axiomatic design of Agile manufacturing systems.
In: Aized, Tauseef (Hrsg.): *Future Manufacturing Systems*.
London: IntechOpen: Sciyo.
ISBN: 978-953-307-128-2
- Matthias & Ding 2013** Matthias, Bjorn; Ding, Hao, 2013.
Die Zukunft der Mensch-Roboter-Kollaboration in der
industriellen Montage.
Internationales Forum Mechatronik **12** (121), 2013, S. 8–35
- Mersmann et al. 2013** Mersmann, Tobias; Goßmann, Dennis; Klemke, Tim, 2013.
Grundlagen der Wandlungsfähigkeit.
In: Nyhuis, Peter; Deuse, Jochen; Rehwald, Jürgen (Hrsg.):
Wandlungsfähige Produktion.
Garbsen und Hannover: PZH-Verlag, S. 18–27.
ISBN: 978-3-944586-02-1
- Mertins & Seidel 2009** Mertins, Kai; Seidel, Holger, 2009.
Wissensmanagement im Mittelstand. Berlin, Heidelberg:
Springer-Verlag.
ISBN: 978-3-540-69362-8
- Microsoft 2017** Microsoft, 2017.
*OPC Foundation and Microsoft: Accelerating the future of
manufacturing*,
URL: [https://cloudblogs.microsoft.com/industry-
blog/manufacturing/2017/03/21/microsoft-and-opc-
foundation-accelerating-the-future-of-manufacturing/](https://cloudblogs.microsoft.com/industry-blog/manufacturing/2017/03/21/microsoft-and-opc-foundation-accelerating-the-future-of-manufacturing/)
Zugriff am: 18.04.2021
- Müller 2013** Müller, Rainer, 2013.
Montagegerecht.
In: Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.): *Pahl/Beitz
Konstruktionslehre*.
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 702–725.
ISBN: 978-3-642-29568-3
- Müller et al. 2013a** Müller, Rainer; Vette, Matthias; Quinders, Stefan;
Mbarek, Taoufik; Schneider, Thomas; Loser, Raimund;
Antar, Nebil; Schnier, Axel, 2013.
Wandlungsfähiges Montagesystem für Großbauteile
am Beispiel der Flugzeugstrukturmontage.
In: Spath, Dieter (Hrsg.): *Zukunftsfähige Montagesysteme*.
Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 251–259.
ISBN: 978-3-8396-0605-6
- Müller et al. 2013b** Müller, Rainer; Vette, Matthias; Speicher, Christoph, 2013.
Zukunftssicherung mit wandlungsfähigen Montagesystemen.
In: Spath, Dieter (Hrsg.): *Zukunftsfähige Montagesysteme*.
Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 359–370.
ISBN: 978-3-8396-0605-6

- Müller et al. 2016** Müller, Rainer; Vette, Matthias; Mailahn, Ortwin, 2016. Process-oriented Task Assignment for Assembly Processes with Human-robot Interaction. *Procedia CIRP* **44**, 2016, S. 210–215. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.080
- Naumann & Fechter 2015** Naumann, Martin; Fechter, Manuel, 2015. Robots as enablers for changeability in assembly applications. In: Bargende, Michael; Reuss, Hans-Christian; Wiedemann, Jochen (Hrsg.): *15. Internationales Stuttgarter Symposium*. Wiesbaden: Springer Vieweg-Verlag, S. 1155–1171. ISBN: 978-3-658-08843-9
- Neumann & Morlock 1993** Neumann, Klaus; Morlock, Martin, 1993. *Operations Research: Mit 111 Tabellen*. München: Carl Hanser Fachbuchverlag. ISBN: 3-446-15771-9
- Nielsen 2003** Nielsen, Johan, 2003. *Information Modeling of Manufacturing Processes: Information Requirements for Process Planning in a Concurrent Engineering Environment*. Stockholm: Högskoletryckeriet. URL: urn:nbn:se:kth:diva-3628
- Nikolakis et al. 2018** Nikolakis, Nikolaos; Kousi, Niki; Michalos, George; Makris, Sotiris, 2018. Dynamic scheduling of shared human-robot manufacturing operations. *Procedia CIRP* **72**, 2018, S. 9–14. DOI: 10.1016/j.procir.2018.04.007
- Nof & Lechtman 1982** Nof, Shimon Y.; Lechtman, Hannan, 1982. Robot time and motion system provides means of evaluating alternate robot work methods. *Industrial Engineering* **14**, 1982, S. 38–42, 44
- Nyhuis et al. 2008** Nyhuis, Peter; Heinen, Tobias; Reinhart, Gunther; Rimpau, Christoph; Abele, Eberhard; Wörn, Arno, 2008. Wandlungsfähige Produktionssysteme: Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. *wt Werkstatttechnik online* (98), 2008, S. 85–91
- Nyhuis et al. 2013** Nyhuis, Peter; Deuse, Jochen; Rehwald, Jürgen (Hrsg.), 2013. *Wandlungsfähige Produktion*. Garbsen und Hannover: PZH-Verlag. ISBN: 978-3-944586-02-1

- Oberer-Treitz 2018** Oberer-Treitz, Susanne, 2018.
Abschätzung der Kollisionsfolgen von Robotern zur Bewertung des sicheren Einsatzes in der Mensch-Roboter-Kooperation.
Stuttgart: Fraunhofer-Verlag. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung.
ISBN: 978-3-8396-1299-6
- Ogorodnikova 2008** Ogorodnikova, Olessia, 2008.
Human weaknesses and strengths in collaboration with robots.
Periodica Polytechnica Mechanical Engineering **52** (1), 2008, S. 25.
DOI: 10.3311/pp.me.2008-1.05
- Paul & Nof 1979** Paul, Richard P.; Nof, Shimon Y., 1979.
Work methods measurement - a comparison between robot and human task performance.
International Journal of Production Research **17** (3), 1979, S. 277–303.
DOI: 10.1080/00207547908919615
- Pischke et al. 2018** Pischke, Dennis; Recker, Tobias; Blankemeyer, Sebastian; Oubari, Assem; Raatz, Annika, 2018.
Prozessspezifische Aufgabenzuordnung im MRK-System: Methode zur zielgrößenorientierten Allokation von Arbeitsvorgängen zwischen Mensch und Roboter.
wt Werkstatttechnik online **108** (9), 2018, S. 592–596.
Zugriff am: 31.10.2018
- Plattform Industrie 4.0 2018** Plattform Industrie 4.0, 2018.
RAMI 4.0: Ein Orientierungsrahmen für die Digitalisierung,
URL: https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/rami40-einfuehrung-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=7
Zugriff am: 20.04.2021
- Price 1985** Price, Harold E., 1985.
The Allocation of Functions in Systems.
Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society **27** (1), 1985, S. 33–45.
DOI: 10.1177/001872088502700104
- Rachuri et al. 2005** Rachuri, Sudarsan; Baysal, Mehmet; Roy, Utpal; Fofou, Sebti; N.A., Conrad Bock; Fenves, Steven J.; Subrahmanian, Eswaran; Lyons, Kevin; Sriram, Ram D., 2005.
Information models for product representation: Core and assembly models.
International Journal of Product Development **2** (3), 2005, S. 207.
DOI: 10.1504/IJPD.2005.007248

- Rampersad 1995** Rampersad, Hubert K., 1995.
Concurrent design of product, process and robotic assembly system.
Assembly Automation **15** (1), 1995, S. 21–28.
DOI: 10.1108/EUM00000000004222
- Ranz et al. 2017** Ranz, Fabian; Hummel, Vera; Sihn, Wilfried, 2017.
Capability-based Task Allocation in Human-robot Collaboration.
Procedia Manufacturing **9**, 2017, S. 182–189.
DOI: 10.1016/j.promfg.2017.04.011
- Ranz et al. 2018** Ranz, Fabian; Komenda, Titanilla; Reisinger, Gerhard; Hold, Philipp; Hummel, Vera; Sihn, Wilfried, 2018.
A Morphology of Human Robot Collaboration Systems for Industrial Assembly.
Procedia CIRP **72**, 2018, S. 99–104.
DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.011
- Rauch 2013** Rauch, Erwin, 2013.
Konzept eines wandlungsfähigen und modularen Produktionssystems für Franchising-Modelle. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag. Schriftenreihe zu Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement.
ISBN: 978-3-8396-0585-1
- REFA 1990** REFA, 1990.
Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. 2. Aufl., 6. - 10. Tsd. München: Hanser-Verlag. Methodenlehre der Betriebsorganisation.
ISBN: 3-446-15967-3
- REFA 2014** REFA, 2014.
REFA-Grundausbildung 2.0: Lehrunterlage zu Teil 2A: Ermittlung und Anwendung von Prozessdaten: Arbeitssystemgestaltung. Darmstadt.
URL: <https://refa.de/blog-industrial-engineering/436-refa-standardprogramm-montagesystemgestaltung>
Zugriff am: 12.05.2020
- Reichenbach 2010** Reichenbach, Matthias, 2010.
Entwicklung einer Planungsumgebung für Montageaufgaben in der wandlungsfähigen Fabrik, dargestellt am Beispiel des impedanzgeregelten Leichtbauroboters. Aachen: Shaker-Verlag. Berichte aus dem Lehrstuhl Automatisierungstechnik, BTU Cottbus.
ISBN: 978-3-8322-9379-6

- Reinhart et al. 2013** Reinhart, Gunther; Backhaus, Julian; Hees, Andrea; Hagen, Christian; Wanzki, Stephanie, 2013. Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Montagetechnik in KMU. In: Spath, Dieter (Hrsg.): *Zukunftsfähige Montagesysteme*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 299–316. ISBN: 978-3-8396-0605-6
- Rudolf 2007** Rudolf, Henning, 2007. *Wissensbasierte Montageplanung in der digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie*. München: Utz. Forschungsberichte IWB. ISBN: 978-3831606979
- Ruiz 2019** Ruiz, Ruben, 2019. Scheduling Heuristics. In: Martí, Rafael; Panos, Pardalos; Resende, Mauricio G. C. (Hrsg.): *Handbook of Heuristics*. Cham: Springer International Publishing, S. 1–24. ISBN: 978-3-319-07123-7
- Rutherford 1977** Rutherford, B. A., 1977. Value Added as a Focus of Attention for Financial Reporting: Some Conceptual Problems. *Accounting and Business Research* **7** (27), 1977, S. 215–220. DOI: 10.1080/00014788.1977.9728707
- Sabou et al. 2017** Sabou, Marta; Kovalenko, Olga; Ekaputra, Fajar; Biffel, Stefan, 2017. Beiträge des Semantic Web zum Engineering für Industrie 4.0. In: Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Band 2*. Berlin: Springer Vieweg, S. 293–313. ISBN: 978-3-662-53247-8
- Salhi 2017** Salhi, Saïd, 2017. *Heuristic Search*. Cham: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-49354-1
- Sauerwein et al. 1996** Sauerwein, Elmar; Bailom, Franz; Hinterhuber, Hans H.; Matzler, Kurt, 1996. The Kano model: How to delight your customers. *Preprints Volume I of the IX. International Working Seminar on Production Economics*, 1996, S. 313–327
- Schäffer et al. 2018** Schäffer, Eike; Bartelt, Matthias; Pownuk, Tobias; Schulz, Jan-Peter; Kuhlenkötter, Bernd; Franke, Jörg, 2018. Configurators as the basis for the transfer of knowledge and standardized communication in the context of robotics. *Procedia CIRP* **72**, 2018, S. 310–315. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.190

- Schäffer et al. 2019** Schäffer, Eike; Mayr, Andreas; Bakakeu, Jupiter; Franke, Jörg; Kuhlenkötter, Bernd; Penczek, Lars, 2019. Digitalisierung im Engineering. *Industrie 4.0 Management* **35** (1), 2019, S. 61–66. DOI: 10.30844/I40M_19-1_S61-66
- Scharte & Thoma 2016** Scharte, Benjamin; Thoma, Klaus, 2016. Resilienz – Ingenieurwissenschaftliche Perspektive. In: Wink, Rüdiger (Hrsg.): *Multidisziplinäre Perspektiven der Resilienzforschung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 123–150. ISBN: 978-3-658-09622-9
- Schewe 2016** Schewe, Frank, 2016. *Was hinter der Referenzarchitektur RAMI 4.0 steckt*, URL: <https://www.computer-automation.de/steuerungsebene/steuern-regeln/was-hinter-der-referenzarchitektur-rami-4-0-steckt.129204.2.html> Zugriff am: 18.04.2021
- Schilling 2020** Schilling, Johannes, 2020. *Didaktik /Methodik Sozialer Arbeit: Grundlagen und Konzepte*. 8., aktualisierte Auflage. München: UTB und Ernst Reinhardt Verlag. Studienbücher für soziale Berufe. ISBN: 978-3-8252-8782-5
- Schließmann 2014** Schließmann, Alexander, 2014. iProduction, die Mensch-Maschine-Kommunikation in der Smart Factory. In: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 451–480. ISBN: 978-3-658-04681-1
- Schönhof & Fechter 2020** Schönhof, Raoul G.C.; Fechter, Manuel, 2020. Towards automated Capability Assessment leveraging Deep Learning. *Procedia CIRP* **91**, 2020, S. 433–438. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.195
- Schröter et al. 2016** Schröter, Daniel; Kuhlmann, Peter; Finsterbusch, Thomas; Kuhrke, Benjamin; Verl, Alexander, 2016. Introducing Process Building Blocks for Designing Human Robot Interaction Work Systems and Calculating Accurate Cycle Times. *Procedia CIRP* **44**, 2016, S. 216–221. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.038

- Schröter 2018** Schröter, Daniel, 2018.
Entwicklung einer Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung.
ISBN: 978-3-8396-1332-0
- Seliger & Neu 1999** Seliger, Günter; Neu, Steffen, 1999.
Montagesysteme.
In: Eversheim, Walter; Schuh, Günther (Hrsg.): *Produktion und Management 3*.
Berlin und Heidelberg: Springer, S. 10-27 - 10-34.
ISBN: 978-3-540-65453-7
- Slatineanu et al. 2017** Slatineanu, Laurentiu; Dodun, Oana; Coteata, Margareta; Dulgheru, Valeriu; Dusa, Petru; Banciu, Felicia; Besliu, Irina, 2017.
Selection of a Solution When Using Axiomatic Design.
MATEC Web of Conferences **127**, 2017, S. 01019.
DOI: 10.1051/mateconf/201712701019
- Solimanpur et al. 2004** Solimanpur, Maghsud; Vrat, Prem; Shankar, Ravi, 2004.
Ant colony optimization algorithm to the inter-cell layout problem in cellular manufacturing.
European Journal of Operational Research **157** (3), 2004, S. 592-606.
DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00248-0
- Spath & Rally 2013** Spath, Dieter; Rally, Peter, 2013.
Zukunftssicherung mit wandlungsfähigen Montagesystemen.
In: Spath, Dieter (Hrsg.): *Zukunftsfähige Montagesysteme*.
Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 9-19.
ISBN: 978-3-8396-0605-6
- Spingler & Beumelburg 2002** Spingler, Jochen; Beumelburg, Katharina, 2002.
Automatisierungspotential-Analyse: Eine Methode zur technischen und wirtschaftlichen Klassifizierung von Automatisierungspotentialen.
92 (3), 2002, S. 62-64.
Zugriff am: 12.05.2018
- Spur & Helwig 1986** Spur, Günter; Helwig, Hans-Joachim, 1986.
Einführung in die Montagetechnik.
In: Spur, Günter; Stöferle, Theodor (Hrsg.): *Fügen, Handhaben und Montieren*.
München: Hanser-Verlag, S. 1-14.
ISBN: 3446125361
- Spur & Stöferle 1986** Spur, Günter; Stöferle, Theodor (Hrsg.), 1986.
Fügen, Handhaben und Montieren. München: Hanser-Verlag.
ISBN: 3446125361

-
- Stähr 2020** Stähr, Tom Jonathan, 2020.
Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme - Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung. Karlsruhe.
DOI: 10.5445/IR/1000117748
- Stanev 2012** Stanev, Stilian, 2012.
Methodik zur produktionsorientierten Produktanalyse für die Wiederverwendung von Produktionssystemen – 2REUSE: Konzept, Informationsmodell und Validierung am besonderen Beispiel des Karosserierohbaus in der Automobilindustrie. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, Karlsruhe.
Informationsmanagement im Engineering Karlsruhe.
ISBN: 978-3-86644-932-9
- Stegmüller & Zürn 2014** Stegmüller, Dieter; Zürn, Michael, 2014.
Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft.
In: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik.* Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 103–119.
ISBN: 978-3-658-04681-1
- Steinwasser 1997** Steinwasser, Peter, 1997.
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung. Bamberg: Meisenbach-Verlag. Fertigungstechnik - Erlangen.
ISBN: 3-87525-084-2
- Suh 1990** Suh, Nam P., 1990.
The principles of design. New York: Oxford University Press. Oxford series on advanced manufacturing.
ISBN: 978-0195043457
- Suh 2001** Suh, Nam P., 2001.
Axiomatic design: Advances and applications. New York, NY: Oxford Univ. Press. The MIT-Pappalardo series in mechanical engineering.
ISBN: 0-19-513466-4
- Takata & Hirano 2011** Takata, Shozo; Hirano, Takeo, 2011.
Human and robot allocation method for hybrid assembly systems.
CIRP Annals - Manufacturing Technology **60** (1), 2011, S. 9–12.
DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.128
- Tepper & Witte 2013** Tepper, Thorsten; Witte, Karl-Werner, 2013.
Wandlungsanforderungen bei der Montage mechatronischer Produkte mit rekonfigurierbaren Plattformkonzepten.
In: Spath, Dieter (Hrsg.): *Zukunftsfähige Montagesysteme.* Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 67–85.
ISBN: 978-3-8396-0605-6

- Thomas 2017** Thomas, Carsten, 2017.
Entwicklung einer Bewertungssystematik für die Mensch-Roboter-Kollaboration. 1. Auflage. Düren: Shaker-Verlag. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme.
ISBN: 978-3-8440-5416-3
- Tilley 2017** Tilley, Jonathan, 2017.
Automation, robotics and the factory of the future,
URL: <https://www.shorturl.at/hrzK1>
Zugriff am: 01.05.2018
- Tomczak 1992** Tomczak, Torsten, 1992.
Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft: Ein Plädoyer für den qualitativen Forschungsansatz.
Marketing ZFP **14** (2), 1992, S. 77–87.
DOI: 10.15358/0344-1369-1992-2-77
- Ulrich 1984** Ulrich, Hans, 1984.
Management.
In: Thomas Dyllick; Gilbert J. B. Probst (Hrsg.): *Schriftenreihe Unternehmung und Unternehmungsführung*.
Bern {&} Stuttgart: Haupt-Verlag.
ISBN: 978-3258034461
- Ulrich & Hill 1976a** Ulrich, Peter; Hill, Wilhelm, 1976.
Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I).
Wirtschaftswissenschaftliches Studium : Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt **5** (7), 1976, S. 304–309
- Ulrich & Hill 1976b** Ulrich, Peter; Hill, Wilhelm, 1976.
Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil II).
Wirtschaftswissenschaftliches Studium : Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt **5** (8), 1976, S. 345–350.
Zugriff am: 20.06.2019
- van Brussel et al. 1998** van Brussel, Hendrik; Wyns, Jo; Valckenaers, Paul; Bongaerts, Luc; Peeters, Patrick, 1998.
Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA.
Computers in Industry **37** (3), 1998, S. 255–274.
DOI: 10.1016/S0166-3615(98)00102-X
- VDI 2206** VDI-Richtlinie 2206:2004.
Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme
- VDI 2221** VDI 2221:1993.
Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte

-
- VDI 2860** VDI-Richtlinie 2860:1990.
Montage und Handhabungstechnik: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole
- VDI 2884** VDI 2884:2005.
Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC)
- VDI 5200 Blatt 4** 5200 Blatt 4:2016.
Fabrikplanung: Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung in der Fabrikplanung
- VDI 5201** VDI 5201:2017.
Wandlungsfähigkeit: Beschreibung und Messung der Wandlungsfähigkeit produzierender Unternehmen
- Vogel-Heuser 2014** Vogel-Heuser, Birgit, 2014.
Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik.
In: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*.
Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 37–48.
ISBN: 978-3-658-04681-1
- Wakula 2016** Wakula, Jurij (Hrsg.), 2016.
Der montagespezifische Kraftatlas. Sankt Augustin.
ISBN: 978-3-88383-788-8
- Weber 2018** Weber, Jakob, 2018.
Entwicklung wandlungsfähiger Montageanlagen für den Automobilbau. Aachen: Shaker Verlag. Produktentwicklung.
ISBN: 978-3-8440-6289-2
- Weck et al. 1999** Weck, Manfred; Swoboda, Michael; Prust, Dirk, 1999.
Montagemittel.
In: Eversheim, Walter; Schuh, Günther (Hrsg.): *Produktion und Management 3*.
Berlin und Heidelberg: Springer, S. 10-17 - 10–27.
ISBN: 978-3-540-65453-7
- Weckenborg & Spengler 2019** Weckenborg, Christian; Spengler, Thomas S., 2019.
Assembly Line Balancing with Collaborative Robots under consideration of Ergonomics: a cost-oriented approach.
IFAC-PapersOnLine **52** (13), 2019, S. 1860–1865.
DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.473

- Weckenmann et al. 2014** Weckenmann, Albert; Dietlmaier, Adrian; Akkasoglu, Gökhan, 2014.
Qualitätssicherung und Traceability in der Montage.
In: Feldmann, Klaus; Schöppner, Volker; Spur, Günter (Hrsg.): *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*.
München: Hanser-Verlag, S. 834–856.
ISBN: 978-3-446-42827-0
- Weimer 2010** Weimer, Tobias, 2010.
Informationsmodell für die durchgängige Datennutzung in Fabrikplanung und -betrieb. Heimsheim: Jost-Jetter-Verlag.
ISW/IPA Forschung und Praxis.
ISBN: 978-3939890621
- Westkämper & Decker 2006** Westkämper, Engelbert; Decker, Markus, 2006.
Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
Springer-Lehrbuch.
ISBN: 978-3-540-30764-8
- Westkämper & Zahn 2009** Westkämper, Engelbert; Zahn, Erich, 2009.
Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
ISBN: 978-3-540-21889-0
- Wiendahl et al. 2007** Wiendahl, Hans-Peter; ElMaraghy, Hoda A.; Nyhuis, Peter; Zäh, Michael F.; Wiendahl, Hans-Hermann; Duffie, Neil A.; Brieke, Michael, 2007.
Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation.
CIRP Annals - Manufacturing Technology **56** (2), 2007, S. 783–809.
DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.003
- Wiendahl et al. 2010** Wiendahl, Hans-Peter; Reichardt, Jürgen; Nyhuis, Peter, 2010.
Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 1. Aufl.
München: Carl Hanser Fachbuchverlag.
ISBN: 978-3446224773
- Winzer 2016** Winzer, Petra, 2016.
Generic Systems Engineering: Ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung. 2. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg-Verlag.
ISBN: 978-3-662-52892-1
- Witte et al. 2013** Witte, Karl-Werner; Geusen, Karl-Theo; Klemm, Jochen, 2013.
Zeitgemäße Bewertung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Montagesysteme.
In: Spath, Dieter (Hrsg.): *Zukunftsfähige Montagesysteme*.
Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 317–335.
ISBN: 978-3-8396-0605-6

Wöllhaff 2020

Wöllhaff, Konrad, 2020.
Mensch-Roboter-Kollaboration.
In: Buxbaum, Hans-Jürgen (Hrsg.):
Mensch-Roboter-Kollaboration.
Wiesbaden Germany: Springer Gabler, S. 109–115.
ISBN: 978-3-658-28306-3

Xing & Gao 2014

Xing, Bo; Gao, Wen-Jing, 2014.
Bacteria Inspired Algorithms.
In: Xing, Bo; Gao, Wen-Jing (Hrsg.): *Innovative Computational
Intelligence: A Rough Guide to 134 Clever Algorithms*.
Cham: Springer International Publishing, S. 21–38.
ISBN: 978-3-319-03403-4

ZVEI 2018

ZVEI, 2018.
*Antrieb 4.0 - Vision wird Realität: Merkmale, Daten und
Funktionen elektrischer Antriebssysteme in Industrie 4.0 für
Hersteller, Maschinenbauer und Betreiber*. Frankfurt am Main.
URL: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/November/Antrieb_4.0_-_Vision_wird_Realitaet_-_erweiterte_Auflage/ZVEI_BR_Vision_Antrieb_4.0_2018_DOWNLOAD.pdf
Zugriff am: 25.04.2021

A Betreute studentische Arbeiten

Tabelle A.1 führt die im Rahmen der Tätigkeit am Fraunhofer IPA betreuten studentischen Arbeiten auf.

Tabelle A.1: Betreute studentische Arbeiten

Jahr	Typ	Student	Thema
2015	BA	Immanuel Gehrung	Umsetzung einer Türmodulmontage mit KUKA LBR iiwa unter Berücksichtigung wandlungsfähiger Montagestationen in direkter Mensch-Roboter-Kooperation
2015	MA	Marc Sascha Pfeiffer	Konzeption und Planung wandlungsfähiger Montagestationen mittels Axiomatic Design
2015	BA	Ferid Atilgan	Entwicklung einer mobilen App zur Bewertung der Wandlungsfähigkeit
2016	MA	Nicole Jans	Entwicklung und Programmierung von Algorithmen für die Datenanalyse zur automatischen Ableitung von Richtlinien zur Verbesserung wandlungsfähiger Montagestationen
2016	BA	Sebastian Zeh	Entwurf einer skalierbaren, aktiv freischaltbaren Werkzeugkupplung für die Mensch-Roboter-Kollaboration
2017	MA	Arik Lämmle	Entwicklung einer Sicherheitskupplung für die Mensch-Roboter-Kollaboration unter Verwendung magneto-rheologischer Flüssigkeiten

Jahr	Typ	Student	Thema
2017	BA	Konstantin Roock	Aufbau und Validierung des Konzepts der Mensch-Roboter-Kollaboration für schwere Lasten unter Verwendung eines sicheren Kamerasystems mit dynamischen Schutzfeldern
2017	BA	Torsten Schill	Entwicklung und Implementierung eines Regelalgorithmus zum kraft-sensitiven Handführen eines Industrieroboters
2018	SA	Shengjian Chen	Implementierung einer Methode zur automatischen Abschätzung der Prozess- und Handhabungszeiten für hybride Montagearbeitsplätze
2018	MA	Carsten Seeber	Implementierung einer Methode zur optimierten Auswahl von Ressourcen für hybride Montagearbeitsplätze
2018	MA	Robert Keller	Entwicklung heuristischer Such- und Optimierungsstrategien zur Planung von MRK-Montagearbeitsplätzen
2018	MA	Raoul Schönhof	Zur Automatisierbarkeitsbewertung des Montageprozesses mittels Deep Learning

Legende: SA: Studienarbeit, BA: Bachelorarbeit, MA: Masterarbeit

B Implementierung der Softwareapplikation

Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich mit der prototypischen Implementierung der Methode zur »automatisierten Grobplanung hybrider Montagearbeitsplätze«. Die Implementierung erfolgt in der Programmiersprache »Java«. Die Vorteile dieser Implementierung liegen in der weiten Verbreitung der Programmiersprache, der Objektorientierung sowie dem schnellen Transfer auf unterschiedliche Betriebssysteme. Dies wird ermöglicht, da der Programmcode in einer virtuellen Maschine, der sogenannten JVM, ausgeführt wird. Die Inhalte der Methode und die Modellierung der Informationszusammenhänge aus Kapitel 5.1 bis 5.9 wurden in einer gemeinsamen Applikation implementiert, die in den nachfolgenden Unterkapiteln adressiert werden.

B.1 Modellierung der Systemlösungen

Eine strukturierte Ablage und Beschreibung des Beziehungswissens der Wissensdomäne Montagearbeitsplatz mit den zugehörigen Unterdomänen der PPR-Modellierung ist unerlässlich (Rudolf 2007). Durch den Anstieg der Informationsmengen und der Dynamik im Planungsbereich ist der Bedarf für ein einheitliches Informationsmanagement, mit dem Ziel der Datentransparenz und -interoperabilität während der Planungsphase und dem Betrieb, kontinuierlich gestiegen (Steinwasser 1997; Weimer 2010). Datenformate der Automatisierungsplanung müssen daher in der Lage sein, die erforderlichen Informationen des Entwurfsprozesses über die verschiedenen Planungsstufen der Systemgestaltung abzubilden und hierarchisch zu strukturieren. Im Idealfall sind die Modellierungen über die Produktionsplanung hinaus weiterverwendbar.

Modellierung der Ressourceninformation

Die verschiedenen Ressourcen werden über eine Excel-Tabellen organisiert und in das OWL-Format exportiert. Wizards unterstützen bei der Eingabe einer neuen Ressource und helfen bei der Pflege der Daten. Vorkenntnisse der Semantik und Ressourcenstruktur sind dafür nicht erforderlich.

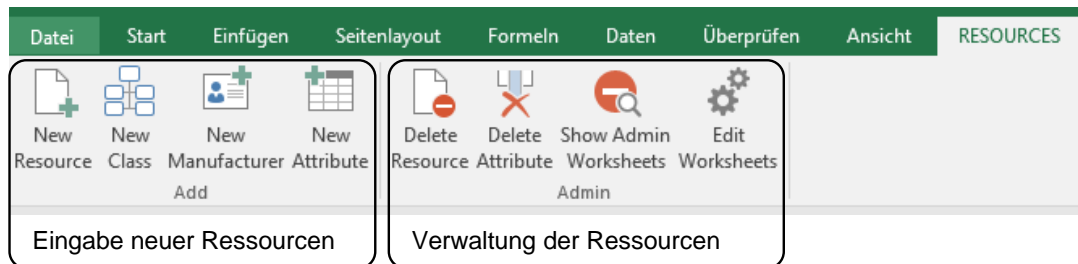


Abbildung B.1: Excel-Eingabemaske und Schnittstelle zur Pflege, Organisation und Eingabe von Ressourcen

Da es sehr wahrscheinlich ist, dass der aktuell vorhandene Pool an hybriden Ressourcen unvollständig ist, erscheint eine kontinuierliche Pflege und Erweiterung der Datensätze unabdingbar, um valide Ergebnisse zu erzielen. Es ist aus diesem Grund denkbar, Schnittstellen zu vorhandenen PDM-Systeme zu implementieren, um die Abhängigkeit von manuellen Benutzereingaben zu reduzieren und bereits semantisch beschriebene Datensätze zu verwenden.

Modellierung der Ressource Mensch

Die Modellierung der Ressource Mensch erfolgt generisch je Geschlecht für einen männlichen und einen weiblichen Werker im Alter von 25 Jahren. Tabelle B.1 beschreibt den Einfluss des Alters, die empfohlene Traglast sowie Angaben zur Maximalkraft in A+ Richtung (Heben) nach dem »montagespezifischen Kraftatlas« (Wakula 2016).

Modellierung der Normzeitwerte von Mensch und Roboter

Die Normzeitwerte der Handhabungstätigkeiten von Mensch (MTM) und Roboter (RTM) werden über eine zweite Excel-Datei verwaltet und nachfolgend in das OWL-Format exportiert.

Tabelle B.1: Planungsdaten Kraft und Reichweite des Menschen für aufrechte Körperhaltung in A+ Richtung (Heben) nach Wakula (2016)

Altersgruppe	Geschlecht	Maximalkraft (50% Perz.)	Maximalkraft (15% Perz.)	Reichweite (95% Perz.)	empfohlene Traglast
18-25 Jahre	männlich	564N	418N	825mm	30kg
	weiblich	282N	209N	760mm	10kg
26-35 Jahre	männlich	572N	424N	820mm	30kg
	weiblich	286N	212N	750mm	10kg
36-45 Jahre	männlich	518N	384N	810mm	30kg
	weiblich	259N	192N	745mm	10kg
46-60 Jahre	männlich	482N	357N	800mm	25kg
	weiblich	241N	179N	740mm	10kg
18-65 Jahre	männlich	515N	380N	815mm	25kg
	weiblich	258N	190N	750mm	10kg

Dateninteroperabilität

Der Datenaustausch erfolgt im AutomationML Format (AML). Die unterschiedlichen Domänen eines Montagearbeitsplatzes ergeben sich zu Produkt, Prozesse und Ressourcen sowie den Randbedingungen.

Die Daten der Produkt- und Prozessdomäne liegen zu Beginn der Optimierung vor und werden über die AML-Datei eingelesen. Dies betrifft die Beziehungen zwischen der Produkt- und Prozess-Domäne sowie die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen den einzelnen Montageschritten anhand des Montagevorranggraphen. Diese Informationen bieten somit den Ausgangspunkt der zu generierenden PPR-Tripel eines Montagearbeitsplatzes. Die vom Planer präferierte Systemlösung mit der entsprechenden Ressourcenkombination wird nach der Optimierung in die AML-Datei eingefügt. Hierdurch ist eine Weiterverwendung und Durchgängigkeit der Daten garantiert.

Im Gegensatz zum klassischen PPR-Modell nach Drath (2010, S.83), wird die übergreifende *InstanceHierarchy* um eine zusätzliche Klasse der Randbedingungen aus Planersicht (*Constraints*) erweitert. Die Strukturierung der Datenablage in den Objektklassen Randbedingung, Produkt, Prozess und Ressource erlaubt die hierarchische Repräsentation des Montagearbeitsplatzes. Die Implementierung von Konnektoren zwischen den einzelnen Objekten ermöglicht die Beschreibung individueller Eigenschaften und Beziehungen zwi-

schen den Objekten im Systementwurf. Abbildung B.2 illustriert den strukturellen Aufbau der angewendeten Modellierung.

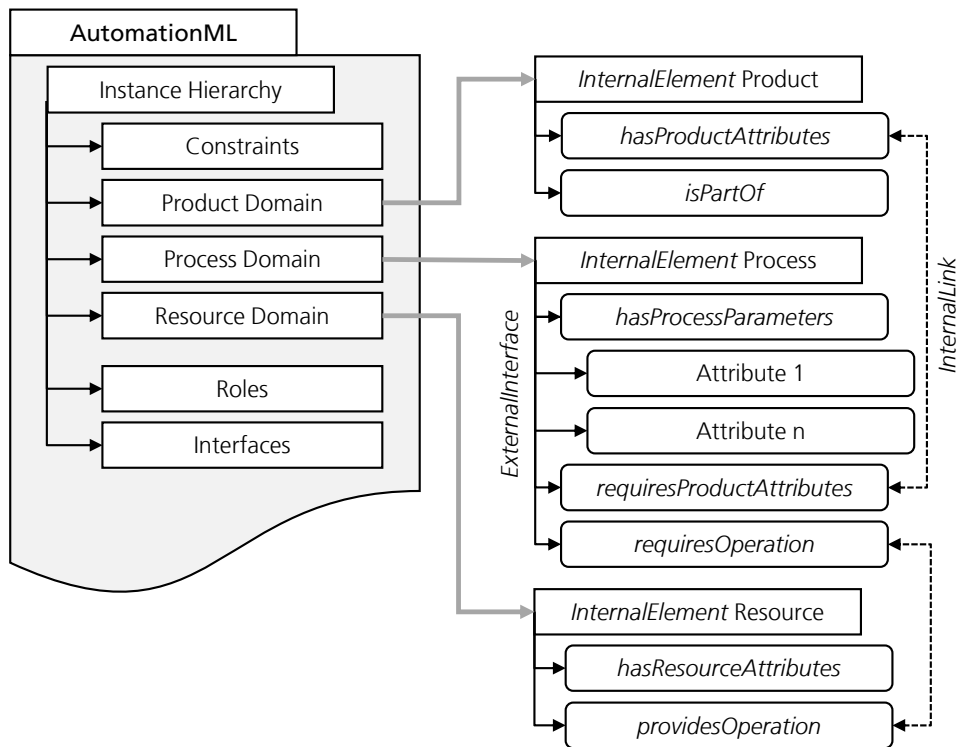


Abbildung B.2: Implementierung eines Montagearbeitsplatzes im AutomationML Datenaustauschformat mit Abbildung der Konnektoren (*ExternalInterfaces*) und Beziehungen (*InternalLinks*)

An die einzelnen Objekte der Objektklassen (*InternalElements*) können Konnektoren (*ExternalInterfaces*) angehängt werden. Diese bilden über *InternalLinks* Beziehungen zwischen den Objekten und Objektklassen ab. Die Schnittstellen werden über die *InterfaceClassLib* definiert und können je nach Anwendungsfall und Domäne instanziiert werden. Die Rollenbibliotheken dienen der einheitlichen und wiederkehrenden Klassifizierung von Objekten (*InternalElements*).

Neben den klassischen AML-Rollen- und Schnittstellenklassen werden zusätzlich Rollenbibliotheken für den Anwendungsfall der hybriden Montage definiert. Diese enthalten für die Produktdomäne die Rollen *ProductPart*, *ProductAssembly* und *JoiningElement*. Für die Montageschritte ergibt sich die Rollenbibliothek nach Abbildung 5.6 zu *SeparationTask*, *HandlingTask*, *PositioningTask*, *JoiningTask* und *MeasurementTask*.

Die Rollenbibliothek der Ressourcen orientiert sich an der Prozessbeschreibung zu *Separati-*

onResource, *PositioningResource*, *ManipulationResource*, *JoiningResource* und *MeasurementResource*.

B.2 Datenverarbeitung – Backend

Allokation von Ressourcen

Ausgehend von den Parametern der eingelesenen AML-Datei und den Vorgaben des Planers werden automatisch SPARQL-Queries erstellt und die potentiellen Ressourcen je Montageschritt identifiziert. Zur Berücksichtigung eventueller Unsicherheiten bei der Definition der Anforderungen und Auslegung der Ressourcen kann ein Unsicherheitsfaktor angegeben werden, der den Anforderungen zugeschlagen wird.

Sollte eine einzelne Ressource nicht in der Lage sein, die kompletten funktionalen Anforderungen der Operationen eines Montageschritts zur Verfügung zu stellen, so ist eine Kombination von zwei Ressourcen möglich. Beispiele dieser Herangehensweise sind schematisch in Abbildung 5.5 dargestellt.

Allokation von Prozesszeiten

Die Allokation der Prozesszeiten je Ressource und Montageschritt erfolgt analog dem Vorgehen der Ressourcenallokation. Anhand der Beschreibung der Montageoperationen je Montageschritt findet die Identifikation der korrespondierenden Prozesszeiten über die Normzeitwerte der MTM und RTM statt. Die Prozesszeiten jeder Montageoperation eines Montageschritts werden aus Gründen der Unveränderlichkeit der Reihenfolge aufaddiert. Die Summe der Einzelzeiten ergibt somit die Prozesszeit eines Montageschritts einer spezifischen Ressource.

Sollte eine Montageaufgabe nicht in den MTM- oder RTM-Bibliotheken hinterlegt sein, bspw. die Taktzeit eines Schraub- oder Positioniervorgangs, so werden diese Werte im Informationsmodell der Ressourcen manuell gepflegt. Diese Normzeitwerte können klassischerweise aus Produktdatenblättern oder Erfahrungswerten vergleichbarer Geräte gewonnen werden.

Generierung von Montagearbeitsplätzen

Montagearbeitsplätze werden entsprechend Kapitel 5.6 durch Kombination einzelner PPR-Tripel gebildet. Dies kann entweder durch vollständige Enumeration des Lösungsraums an PPR-Tripel je Montageschritt oder einen heuristischen Ansatz aus Kapitel 5.9.2 erfolgen. Ein Montagearbeitsplatz besteht immer aus einer Menge an PPR-Tripeln, die über das Produkt (Bauteil, Baugruppe) und die zugehörigen Montageprozesse zueinander in Beziehung stehen.

Reihenfolgenplanung und Bestimmung der Taktzeit

Aufbauend auf den generierten Montagearbeitsplätzen, den Präzedenz-Restriktionen aus dem Montagevorranggraph sowie den zugeordneten Ressourcen erfolgt die Reihenfolgenbildung der Montageschritte zur Bestimmung einer minimalen Taktzeit des gegebenen Sets an Ressourcen. Hierfür werden alle Montageschritte anhand der Manipulationsressourcen klassifiziert und in eine kürzeste Reihenfolge gebracht – vgl. Abbildung 5.11.

Die Randbedingungen der Optimierung orientieren sich an Kapitel 3.3. Zur Optimierung der Reihenfolge wird der frei verfügbare »CP-SAT-Solver« aus der »Google OR-Tools« Bibliothek verwendet²². Dieser kann in das »Java« Projekt eingebunden werden und ist in der Lage, das vorliegende Teilproblem der Reihenfolgenbildung der Montageschritte auf Ressourcen des FJSSP zu lösen.

Zur Abbildung realer Taktzeiten ohne Anlaufverluste beim Start der Montage, wird die Montage mehrerer aufeinander folgender Produkte eines Auftrags betrachtet. Dies hilft, eventuelle zeitliche Verluste im Anlauf der Montage zwischen Mensch und Roboter auszuschießen.

B.3 Benutzeroberfläche – Frontend

Zur Visualisierung der Einstellungen und Benutzerführung wird eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) programmiert, die den Planer durch die verschiedenen Arbeitsschritte der Optimierung führt. Diese GUI gliedert sich in sechs Reiter, die in aufsteigender Rei-

²²<https://developers.google.com/optimization>

henfolge durchlaufen werden – siehe Abbildungen B.3 und B.4. Die einzelnen Reiter und Funktionalitäten werden nachfolgend im Detail beschrieben.

Allokation von Ressourcen

Der Reiter dient zur Eingabe des Pfades der korrespondierenden Informationsmodelle von Ressourcen und Prozesszeiten. Ebenso werden hier die Randbedingungen der Ressourcen-Allokation definiert, wie bspw. der prozentuale Zuschlag der Anforderungen bei der Identifikation der Ressourcen oder der Schwellwert der Automatisierungseignung. Nach erfolgter Identifikation können die identifizierten Manipulationsressourcen mit ihren hinterlegten Fähigkeiten in diesem Reiter betrachtet werden.

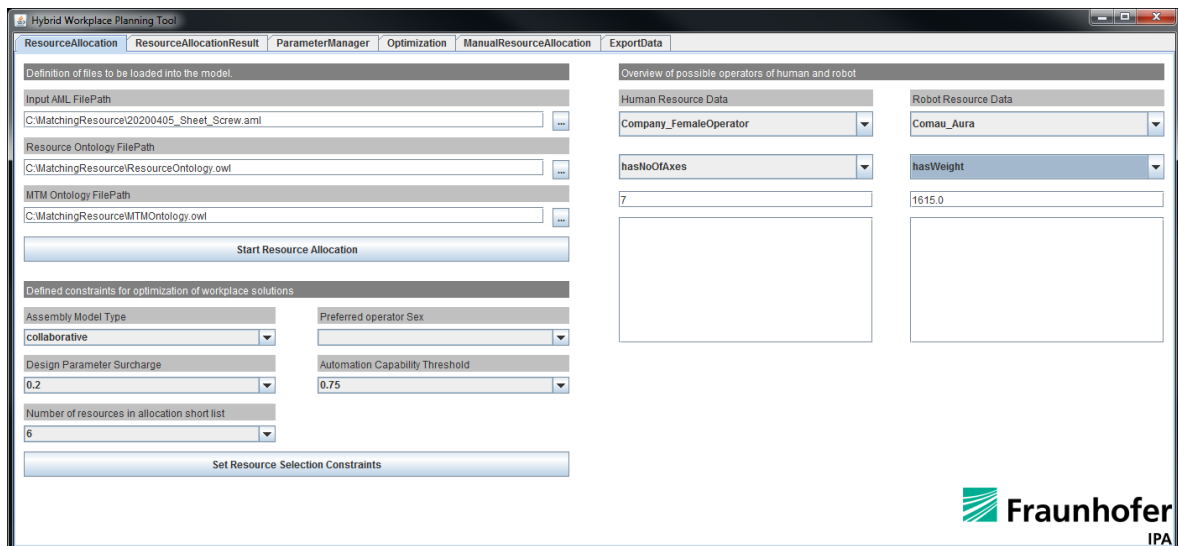


Abbildung B.3: Grafische Benutzeroberfläche des Planungstools inkl. Erklärungen der wichtigsten Funktionen

Ausgabe der Ressourcen je Produkt und Montageschritt

Der zweite Reiter stellt die identifizierten Ressourcen je Montageschritt dar. Jede Zeile definiert dabei ein PPR-Tripel. Die restlichen Spalten definieren individuelle Eigenschaften der Ressource im Anwendungsfall, die sich aus den gegebenen Anforderungen ergeben. Hierzu gehören bspw. die Prozesszeit einer Ressource im betrachteten Montageschritt, der benötig-

te Flächenbedarf, die technologische Eignung in Form des berechneten Informationsgehalts (vgl. Kapitel 5.5.1) sowie die Investitionskosten der Ressource.

Optimierungsparameter

Der dritte Reiter initialisiert die Randbedingungen aus Sicht des Planers, wie bspw. die Anzahl der Werkzeuge, das gewählte Schichtmodell sowie die Parameter des Leasingmodells (vgl. Kapitel 4.2.2).

Weiterhin werden die Parameter der Optimierungsfunktion definiert. Dies beinhaltet einerseits die Gewichte der einzelnen Kriterien, wie auch die entsprechenden Merkmalsausprägungen anhand des Kano-Modells aus Kapitel 5.8.

Optimierung

In diesem Reiter kann die Optimierung der Systemlösung gestartet werden. Die Randbedingungen der zu produzierenden Stückzahl, der maximalen Montagekosten, der erwünschten Ausbringung sowie der verfügbaren Hallenfläche werden hier definiert. Durch Anwahl des entsprechenden Lösungsverfahrens (Heuristik, vollständige Enumeration) wird die Optimierung gestartet.

Die Lösungsverfahren wurden entsprechend den theoretischen Grundlagen aus Kapitel 5.9 implementiert. Für jedes heuristische Lösungsverfahren wird ein Abbruchkriterium einer maximalen Zahl an Iterationen definiert.

Manuelle Ressourcenallokation

Dieser Reiter dient der Eingabe manueller Lösungen zur Validierung der Expertenbefragung. Weiterhin können automatisch generierte Systemlösungen betrachtet und manuell editiert werden. So können nach jeder manuellen Änderung die aktuellen Eigenschaften der Systemlösung berechnet und ausgegeben werden.

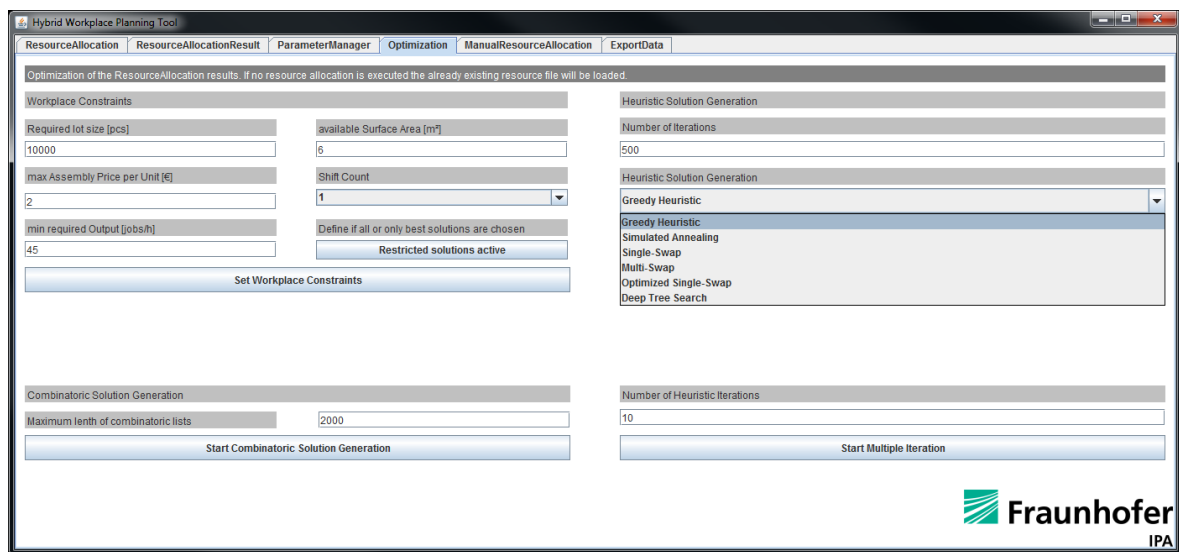


Abbildung B.4: Grafische Benutzeroberfläche des Planungstools mit Auswahlmöglichkeit der heuristischen Lösungsverfahren (Mitte rechts)

Ausgabe der Ergebnisse

In diesem Reiter kann das Ergebnis der Optimierung exportiert werden. Hierbei werden die ausgewählten PPR-Tripel mit den Prozessen und Ressourcen der eingangs eingelesen AML-Datei verknüpft und nachfolgenden Planungsschritten zur Verfügung gestellt.

C Expertenbefragung

Die Teilnehmer der Expertenbefragung rekrutierten sich aus dem Bereich der angewandten Forschung in der Industrie und an Forschungsinstituten. Ihre Affiliation und ihre Erfahrung im Themenbereich MRK können in Tabelle C.1 nachgelesen werden.

Tabelle C.1: Teilnehmer der Expertengruppe

ID	beruflicher Hintergrund	Erfahrung mit MRK
2	Ingenieur an einem Forschungsinstitut	<3 Jahre
3	Ingenieur an einem Forschungsinstitut	3-5 Jahre
4	Ingenieur in der industrienahen Forschung	>5 Jahre
5	Ingenieur an einem Forschungsinstitut	<3 Jahre
6	Ingenieur in der industrienahen Forschung	>5 Jahre

Tabelle C.2 und C.3 geben nach Einschätzung der Experten die Wichtigkeit der Optimierungskriterien wieder. Die Klassifizierung der Wichtigkeit eines Kriteriums erfolgt anhand einer Skala von gering (1) bis hoch (5).

Tabelle C.2: Verteilung der Häufigkeit der Nennung in Bezug auf die Wichtigkeit der einzelnen Optimierungskriterien der PPR-Tripel (n=10) inkl. Angabe einer qualitativen Relevanz

	Wichtigkeit					Mittelwert	Relevanz
	1	2	3	4	5		
Technologische Kriterien							
Technische Eignung	0	0	1	9	0	3,90	o
Prozesszeit	0	0	0	5	5	4,50	+
Wirtschaftliche Kriterien							
Flächenbedarf	0	3	5	0	2	3,10	--
Investitionskosten	0	0	2	2	6	4,40	+

Legende: (1) geringe bis (5) hohe Wichtigkeit

Tabelle C.3: Verteilung der Häufigkeit der Nennung in Bezug auf die Wichtigkeit der einzelnen Optimierungskriterien der Montagearbeitsplätze (n=10) inkl. Angabe einer qualitativen Relevanz

	Wichtigkeit					Mittel	Relevanz
	1	2	3	4	5		
Technologische Kriterien							
Technische Eignung	0	0	1	8	1	4,00	o
Ressourcenstückliste	0	0	4	5	1	3,70	-
Anlagentakt	0	0	0	7	3	4,30	+
Montagewirkungsgrad	0	0	1	8	1	4,00	o
Stetigkeit der Verrichtung	0	0	0	5	5	4,50	+
Ressourcennutzung (insb. Mensch)	0	0	0	6	4	4,40	+
Wirtschaftliche Kriterien							
Flächenbedarf	0	3	4	1	2	3,20	--
Montagekosten	0	0	0	3	7	4,70	++

Legende: (1) geringe bis (5) hohe Wichtigkeit

Weiterhin wurden die Experten gebeten, potentiell fehlende Optimierungskriterien zu nennen, die sie aufgrund ihrer Erfahrung als nützlich erachten. Hierzu wurde auf Seiten der PPR-Tripel das Kriterium der »technischen Verfügbarkeit« und auf Seiten der Montagearbeitsplätze das Kriterium der »Akzeptanz des Roboters« durch den Menschen genannt. Beide Kriterien wurden nicht in den Optimierungskatalog aufgenommen. Eine Erklärung hierzu findet sich in Kapitel 6.3.1.

D Daten der Anwendungsbeispiele

Die nachfolgenden Tabellen D.1 – D.6 beschreiben die Randbedingungen aus Kapitel 6 und die Produktinformationen, wie sie zu Beginn der Optimierung im AML-Format vorliegen.

D.1 Produktdaten »Schraubbaugruppe«

Tabelle D.1: Beschreibung der Randbedingungen »Schraubbaugruppe«

	Einheit	Wert
Randbedingungen		
Losgröße	-	10.000
maximal verfügbare Fläche	[m ²]	2
Montageszenario	-	kollaborierend
Aufschlag Design-Parameter für Ressourcenauswahl	-	20%
Anzahl an Schichten	-	1
Schwellwert der Automatisierungseignung ²¹	-	0,75
Ziele		
minimale Ausbringung	[jobs/h]	45
maximale Montagestückkosten	[€/Stück]	2

²¹Berechnung der Automatisierungseignung i.A.a. Spingler & Beumelburg (2002)

Tabelle D.2: Beschreibung der Produkteigenschaften »Schraubbaugruppe«

Attribut	Einheit	Produkt			
		Bauteil1	Bauteil2	Schraube	Baugruppe
Dimension	[mm]	100x150x15	100x100x10	13x8x36	100x150x38
Gestalt	-	blockförmig	blockförmig	pilzförmig	blockförmig
Material	-	Aluminium	Aluminium	Stahl	gemischt
Bereitstellung	-	sortiert	sortiert	Schüttgut	-
Gewicht	[kg]	0,602	0,263	0,017	0,933
Toleranz	[mm]	-	-	1,0	0,5
Drehmoment	[Nm]	-	-	8,0	-
Anzahl	-	1	1	4	1
Typ	-	ProductPart	ProductPart	Joining-Element	Assembly-Group

D.2 Produktdaten »Aufnahme Dachgepäckträger«

Tabelle D.3: Beschreibung der Randbedingungen »Aufnahme Dachgepäckträger«

	Einheit	Wert
Randbedingungen		
Losgröße	-	10.000
maximal verfügbare Fläche	[m ²]	6
Montageszenario	-	kollaborierend
Aufschlag Design-Parameter für Ressourcenauswahl	-	20%
Anzahl an Schichten	-	1
Schwellwert der Automatisierungseignung	-	0,75
Ziele		
minimale Ausbringung	[jobs/h]	45
maximale Montagestückkosten	[€/Stück]	2

²¹Berechnung der Automatisierungseignung i.A.a. Spingler & Beumelburg (2002)

Tabelle D.4: Beschreibung der Produkteigenschaften »Aufnahme Dachgepäckträger«

Attribut	Einheit	Produkt			
		Außenteil	Innenteil	Blindniet 5x6	Baugruppe
Dimension	[mm]	100x76x65	97x71x90	6x11.4x18	100x81x92
Gestalt	-	quaderförmig	quaderförmig	pilzförmig	quaderförmig
Material	-	Stahl	Stahl	Stahl	Stahl
Bereitstellung	-	gestapelt	gestapelt	Schüttgut	-
Gewicht	[kg]	0,178	0,366	0,01	0,584
Toleranz	[mm]	-	-	0,15	0,15
Abzugskraft	[N]	-	-	5.000	-
Hub	[mm]	-	-	5	-
Anzahl	-	1	1	4	1
Typ	-	ProductPart	ProductPart	Joining-Element	Assembly-Group

D.3 Produktdaten »Vormontage Schwenklager«

Tabelle D.5: Beschreibung der Randbedingungen »Vormontage Schwenklager«

	Einheit	Wert
Randbedingungen		
Losgröße	-	600
maximal verfügbare Fläche	[m ²]	10
Montageszenario	-	kollaborierend
Aufschlag Design-Parameter für Ressourcenauswahl	-	20%
Anzahl an Schichten	-	2
Schwellwert der Automatisierungseignung	-	0.75
Ziele		
minimale Ausbringung	[jobs/h]	120
maximale Montagestückkosten	[€/Stück]	10

²¹Berechnung der Automatisierungseignung i.A.a. Spingler & Beumelburg (2002)

Tabelle D.6: Beschreibung der Produkteigenschaften »Vormontage Schwenklager«

Attribut	Einheit	Produkt		
		Schwenklager	Abschirmblech	Schraube M6
Dimension	[mm]	600x150x150	300x200x10	13x13x30
Gestalt	-	block	flach	pilzförmig
Material	-	Metall	Metall	Metall
Bereitstellung	-	sortiert	gestapelt	Schüttgut
Gewicht	[kg]	8,8	0,2	0,05
Toleranz	[mm]	-	0,3	0,3
Drehmoment	[Nm]	-	-	8
Einschubkraft	[N]	-	15	-
Anzahl	-	1	1	4
Typ	-	ProductPart	ProductPart	ProductPart

Attribut	Einheit	Produkt	
		Bremsscheibe	Schraube M8
Dimension	[mm]	300x300x60	13x13x30
Gestalt	-	zylindrisch	pilzförmig
Material	-	Metall	Metall
Bereitstellung	-	sortiert	Schüttgut
Gewicht	[kg]	10	0,05
Toleranz	[mm]	0,5	0,5
Drehmoment	[Nm]	-	5
Einschubkraft	[N]	25	-
Anzahl	-	1	1
Typ	-	ProductPart	ProductPart

Attribut	Einheit	Bremssattel	Produkt	
			Schraube M12	ZSB Schwenklager
Dimension	[mm]	150x150x250	18x18x50	600x200x150
Gestalt	-	block	pilzförmig	block
Material	-	Metall	Metall	Metall
Bereitstellung	-	sortiert	Schüttgut	sortiert
Gewicht	[kg]	9	0,06	29
Toleranz	[mm]	0,75	0,75	-
Drehmoment	[Nm]	-	30	-
Einschubkraft	[N]	25	-	-
Anzahl	-	1	2	1
Typ	-	ProductPart	ProductPart	AssemblyGroup

D.4 Definition der Optimierungskriterien

Die Bewertung der Fitness der Montagearbeitsplätze erfolgt für alle Anwendungsbeispiele und Lösungsverfahren anhand der Kriterien »Montagekosten«, »Montagewirkungsgrad«, »Taktzeit« und »mittlere technische Eignung der Ressourcen«.

Für die rekombinierenden Verfahren findet auf Seiten der PPR-Tripel ein Vergleich der technischen Eignung statt. Alle Optimierungskriterien besitzen das gleiche Gewicht und sind als Leistungsmerkmal ausgeführt.

Tabelle D.7 beschreibt die verwendeten Optimierungskriterien, deren individuelles Gewicht im Kontext der Bewertung einer Lösungsalternative sowie die Klassifizierung des Optimierungsverhaltens eines Kriteriums entsprechend des Kano-Modells aus Kapitel 5.8.

Tabelle D.7: Darstellung der Optimierungskriterien für PPR-Tripel und Montagearbeitsplätze, deren Gewichte und Optimierungsprinzipien nach dem Kano-Modell aus Kapitel 5.8

	Einzelressource (PPR)		Montagearbeitsplatz	
	Gewicht	Opt.-Prinzip	Gewicht	Opt.-Prinzip
Technologische Kriterien				
Technische Eignung	100%	Leistung	25%	Leistung
Ressourcenstückliste	-	-	-	-
Prozess-/ Taktzeit	-	-	25%	Leistung
Montagewirkungsgrad	-	-	25%	Leistung
Stetigkeit der Verrichtung	-	-	-	-
Ressourcennutzung	-	-	-	-
Wirtschaftliche Kriterien				
Flächenbedarf	-	-	-	-
Montagekosten	-	-	25%	Leistung
Investitionskosten	-	-	-	-

D.5 Definition der Annahmen der Kostenrechnung

Tabelle D.8 beschreibt die Annahmen der Kostenvergleichsrechnung im Leasingmodell aus Kapitel 5.5.5.

Tabelle D.8: Annahmen der Kostenvergleichsrechnung im Leasingmodell zur Berechnung variabler Kostensätze und fixer Inbetriebnahmeaufwände je Ressource nach Kapitel 5.5.5

	Einheit	Wert
Annahmen zur Arbeitszeit		
Arbeitstage pro Jahr	[d]	250
Urlaubstage pro Jahr	[d]	30
Stunden je Arbeitstag	[h]	8
Annahmen der Kostensatzrechnung nach Hartel & Lotter (2012, S.383f)		
Abschreibungsdauer	[a]	4
Jährlicher prozentualer Anteil der Instandhaltungskosten	-	30%
Jährlicher Zins auf die Maschinenabschreibung	-	10%
Annahmen des Leasingmodells		
Angenommene Rendite des Leasinggebers	-	10%
Anteil der Gesamtzeit, die eine Ressource vermietet ist	-	33%
Sonstige Annahmen		
Elektrizitätskosten	[€/kWh]	0,30
Kostensatz Mensch	[€/a]	75.000
Kostensatz eines Inbetriebnehmers	[€/h]	100

E Ergebnisse der Validierung

Die nachfolgenden Tabellen E.1 – E.5 beinhalten die detaillierten Ergebnisse der Validierung der Expertenbefragung und der vollständigen Enumeration.

Die Abbildungen E.1 – E.9 beschreiben detailliert die Ergebnisse der statistischen Auswertung der heuristischen Lösungsverfahren.

E.1 Ergebnisse der Expertenbefragung

Die Tabellen E.1 – E.2 beinhalten die Ergebnisse der Expertenbefragung für die Anwendungsbeispiele aus Kapitel 6.1.

Tabelle E.1: Vergleich der Lösungen der Expertengruppe mit der vollständigen Enumeration am Anwendungsbeispiel »Schraubbaugruppe« inkl. Angabe der absoluten Ergebnisqualität

ID	$F_q(q)$	$G_{abs}(q)$	Kosten		$T(q)$	Ressourcen
			$C_{f,b}(q)$	$C_{v,b}(q)$		
2	0,367	6%	347,77 €	6216,16 €	34,05 s	Human StepFeeder FormNest CollabScrewingTool + Cobot-5
3	0.381	11%	402,77 €	6999,75 €	34,05 s	Human StepFeeder PlanarClampingDevice CollabScrewingTool + Cobot-10
<i>Nachträgliche Anpassung der Expertenlösung: Änderung des »PlanarClampingDevice« auf »FormNest«, da ein Spannen für den Fügevorgang nicht erforderlich ist.</i>						
4	0,396	16%	516,20 €	5799,60 €	34,23 s	ObjectDetectionSystem CollabSuctionPad + Cobot-5 ManualScrewingTool Human
5	0,398	17%	516,20 €	5754,91 €	34,23 s	ObjectDetectionSystem CollabSuctionPad + Cobot-10 ManualScrewingTool Human
6	0,381	11%	369,43 €	6881,52 €	34,05 s	Human BulkFeeder PlanarClampingDevice CollabScrewingTool + Cobot-15
<i>Nachträgliche Anpassung der Expertenlösung: Änderung des »PlanarClampingDevice« auf »FormNest«, da ein Spannen für den Fügevorgang nicht erforderlich ist.</i>						

Tabelle E.2: Vergleich der Lösungen der Expertengruppe mit der vollständigen Enumeration am Anwendungsbeispiel »Aufnahme Dachgepäckträger« inkl. Angabe der absoluten Ergebnisqualität

ID	$F_q(q)$	$G_{abs}(q)$	Kosten		$T(q)$	Ressourcen
			$C_{f,b}(q)$	$C_{v,b}(q)$		
2	0,440	26%	424,96 €	8989,13 €	43,95 s	Human BulkFeeder PlanarClampingDevice CollabRivetingTool + Cobot-10
<i>Nachträgliche Anpassung der Expertenlösung: Änderung des »FormNest« aufgrund Toleranzanforderungen auf »PlanarClampingDevice« im Schritt Positionierung. Änderung »CollabRivetingTool + Cobot-5« auf »CollabRivetingTool + Cobot-10« aufgrund des Eigengewichts des Nietwerkzeugs.</i>						
3	0,438	25%	424,96 €	8989,13 €	43,95 s	Human StepFeeder PlanarClampingDevice CollabRivetingTool + Cobot-10
4	-	-	- €	- €	- s	Human ObjectDetectionSystem CollabSuctionPad + Cobot-5 ManualRivetingTool
<i>Ausschluss der Expertenlösung: Keine valide Lösung, da die Automatisierungseignung des Montageschritts der Handhabung des Innenteils zu gering ist. Eine manuelle Anpassung des Montageschritts auf »Human« würde aufgrund der Nebenbedingung »mind. 1 Roboter und 1 Mensch je Montagearbeitsplatz« zu einer ungültigen Lösung führen.</i>						
5	0,436	24%	511,32 €	9004,39 €	43,95 s	Human CollabSuctionPad + Cobot-10 BulkFeeder PlanarClampingDevice CollabRivetingTool + Cobot-10
<i>Nachträgliche Anpassung der Expertenlösung: Die Automatisierungseignung des Montageschritts der Vereinzelung des Außenteils ist zu gering. Änderung des »ObjectDetectionSystem« auf »Human« im Montageschritt Handhabung Innenteil. Das »CircularClampingDevice« ist im Montageschritt der Positionierung funktional ungeeignet – daher Änderung auf »PlanarClampingDevice«. Änderung »Cobot-5« auf »Cobot-10« aufgrund des Eigengewicht des Nietwerkzeugs.</i>						
6	0,445	28%	446,63 €	9370,64 €	43,95 s	Human StepFeeder PlanarClampingDevice CollabRivetingTool + Cobot-15

E.2 Ergebnisse der vollständigen Enumeration

In den Tabellen E.3 - E.5 finden sich die jeweils fünf besten und die schlechteste Lösung der vollständigen Enumeration der Anwendungsbeispiele aus Kapitel 6.1. Alle Zahlenwerte wurden anhand der Annahmen aus den Tabellen D.7 und D.8 berechnet.

Tabelle E.3: Auszug der fünf besten und des schlechtesten Montagearbeitsplatzes des Anwendungsbeispiels »Schraubbaugruppe«, Mächtigkeit der iterierten Lösungsmenge: $|Q_{red}^{\mu}| = 4.538 \cdot 10^6$

Rang	$F_q(q)$	Kosten		$T(q)$	Ressourcen
		$C_{f,b}(q)$	$C_{v,b}(q)$		
1	0,349	360,86 €	5294,89 €	31,82 s	Female Operator SCHMALZ SAOXM 60x20 UNIVERSAL ROBOT UR5 STÖGER STF 8010 KOLVER Pluto 10DN
2	0,349	360,86 €	5253,35 €	31,82 s	Female Operator SCHMALZ SAOXM 60x20 DOOSAN M0609 STÖGER STF 8010 KOLVER Pluto 10DN
3	0,350	360,86 €	5322,50 €	31,82 s	Female Operator SCHMALZ SAOXM 60x20 UNIVERSAL ROBOT UR5 STÖGER STF 8010 KOLVER Pluto 15DN
4	0,351	360,86 €	5432,97 €	31,82 s	Female Operator SCHMALZ SAOXM 60x20 UNIVERSAL ROBOT UR5 STÖGER SGF 3 KOLVER Pluto 10DN
5	0,351	360,86 €	5280,97 €	31,82 s	Female Operator SCHMALZ SAOXM 60x20 DOOSAN M0609 STÖGER STF 8010 KOLVER Pluto 15DN
...					
15.760	0,643	794,64 €	16189,99 €	75,76 s	Female Operator ENSENSO 3D Camera System DEPRAG 11011-2 SCHMALZ SAOXM 60x20 KUKA SYSTEMS Langhubgreifer SCHMALZ SAOXM 80x30 STÖGER CSX Schrauber UNIVERSAL ROBOT UR5

Tabelle E.4: Auszug der fünf besten und des schlechtesten Montagearbeitsplatzes des Anwendungsbeispiels »Aufnahme Dachgepäckträger«, Mächtigkeit der iterierten Lösungsmenge: $|Q_{red}^{\mu}| = 4.719 \cdot 10^6$

Rang	$F_q(q)$	Kosten		$T(q)$	Ressourcen
		$C_{f,b}(q)$	$C_{v,b}(q)$		
1	0,377	438,40 €	6073,16 €	34,55 s	Female Operator SCHMALZ SAOXM 60x20 UNIVERSAL ROBOT UR5 WEBER ZEL240 SPREITZER MZR 120-36 GÖBEL Airpower 2
2	0,377	441,40 €	6028,06 €	34,55 s	Female Operator SCHMALZ SAOXM 60x20 DOOSAN M0609 WEBER ZEL240 SPREITZER MZR 120-36 GÖBEL Airpower 2
3	0,377	441,40 €	6079,16 €	34,55 s	Female Operator SCHMALZ SAOXM 60x20 UNIVERSAL ROBOT UR5 WEBER ZEL240 SPREITZER MZR 150-80 GÖBEL Airpower 2
4	0,377	461,40 €	6079,16 €	34,55 s	Female Operator SCHMALZ SAOXM 60x20 UNIVERSAL ROBOT UR5 WEBER ZEL240 SPREITZER MZR 150-125 GÖBEL Airpower 2
5	0,377	461,40 €	6034,06 €	34,55 s	Female Operator SCHMALZ SAOXM 60x20 DOOSAN M0609 WEBER ZEL240 HOLEX SPREITZER MZR 150-80 GÖBEL Airpower 2
...					
35.784	0,620	908,26 €	17266,59 €	61,92 s	Male Operator SCHMALZ SAOXM 60x20 KUKA SYSTEMS Langhubgreifer GESIPA GAV 8000 KUKA LBR iiwa R800 SEIGERT KÖBERLEIN M-Serie DEPRAG 11011-2.5 SPREITZER MZR 190-100

Tabelle E.5: Auszug der fünf besten und des schlechtesten Montagearbeitsplatzes des Anwendungsbeispiels »Vormontage Schwenklager«, Mächtigkeit der iterierten Lösungsmenge: $|Q_{red}^{\mu}| = 2.595 \cdot 10^6$

Rang	$F_q(q)$	Kosten		$T(q)$	Ressourcen
		$C_{f,b}(q)$	$C_{v,b}(q)$		
1	0,338	357,61 €	156,75 €	14,04 s	Male Operator KUKA SYSTEMS LBR Greifer KUKA LBR iiwa R820 STÖGER STF 8010 KOLVER Pluto 10DN
2	0,339	357,61 €	158,58 €	14,04 s	Male Operator KUKA SYSTEMS LBR Greifer KUKA LBR iiwa R820 STÖGER SGF 3 KOLVER Pluto 10DN
3	0,339	357,61 €	159,68 €	14,04 s	Male Operator KUKA SYSTEMS LBR Greifer KUKA LBR iiwa R820 MAFU Typ B450 LC KOLVER Pluto 10DN
4	0,339	379,28 €	132,98 €	14,04 s	Male Operator KUKA SYSTEMS LBR Greifer DOOSAN 1509 STÖGER STF 8010 KOLVER Pluto 10DN
5	0,339	3357,61 €	157,12 €	14,04 s	Male Operator KUKA SYSTEMS LBR Greifer KUKA LBR iiwa R820 STÖGER STF 8010 KOLVER Pluto 15DN
...					
12.960	0,501	582,20 €	238,30 €	24,36 s	Male Operator ENSENSO 3D Camera System KUKA SYSTEMS LBR Greifer UNIVERSAL ROBOT UR16e KOLVER Pluto 50CA-SR

E.3 Ergebnisse der heuristischen Optimierung

In den Abbildungen E.1 – E.2, E.4 – E.5 und E.7 – E.8 werden die statistischen Verteilungen der absoluten Ergebnisqualitäten und Optimierungszeiten der unterschiedlichen heuristischen Lösungsverfahren dargestellt.

Weiterhin finden sich in den Abbildungen E.3, E.6 und E.9 die erreichten Ergebnisqualitäten über die Optimierungszeiten für jeden Optimierungslauf je Heuristik und Anwendungsbeispiel.

Ergebnisse »Schraubbaugruppe«

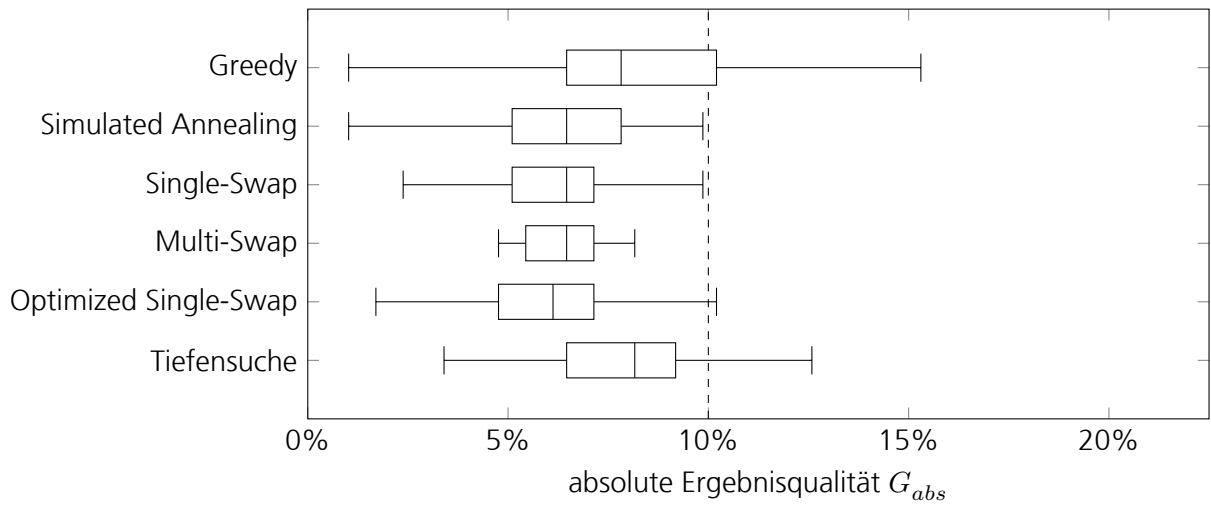


Abbildung E.1: Statistische Verteilung der absoluten Ergebnisqualität G_{abs} je Heuristik am Beispiel der »Schraubbaugruppe«, Anzahl Optimierungszyklen entsprechend Stichprobengröße $s=97$, konstante Iterationszahl je Optimierungszyklus $p=500$

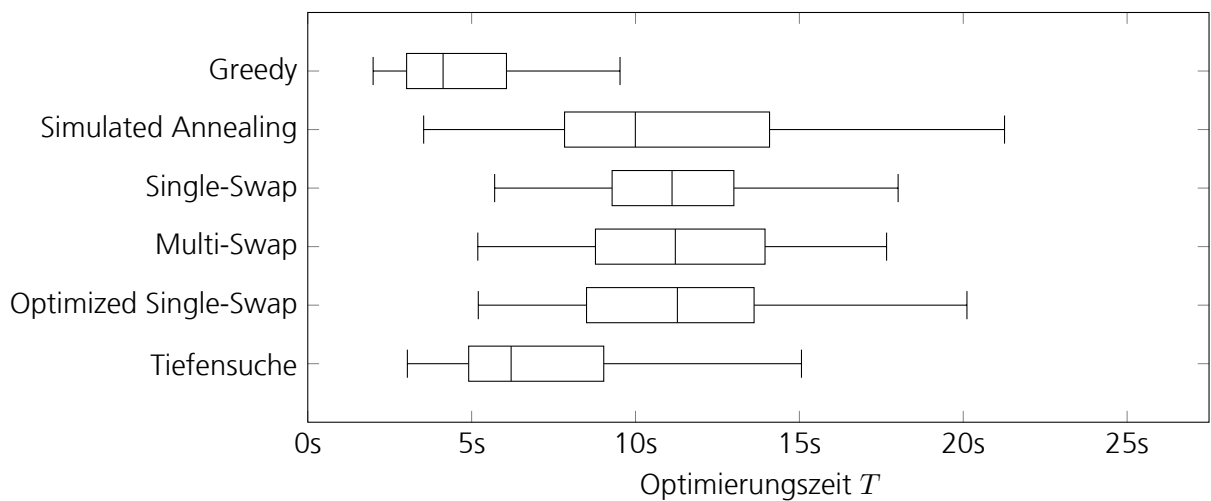


Abbildung E.2: Statistische Verteilung der Optimierungszeit T je Heuristik am Beispiel der »Schraubbaugruppe«, Anzahl Optimierungszyklen entsprechend Stichprobengröße $s=97$, konstante Iterationszahl je Optimierungszyklus $p=500$

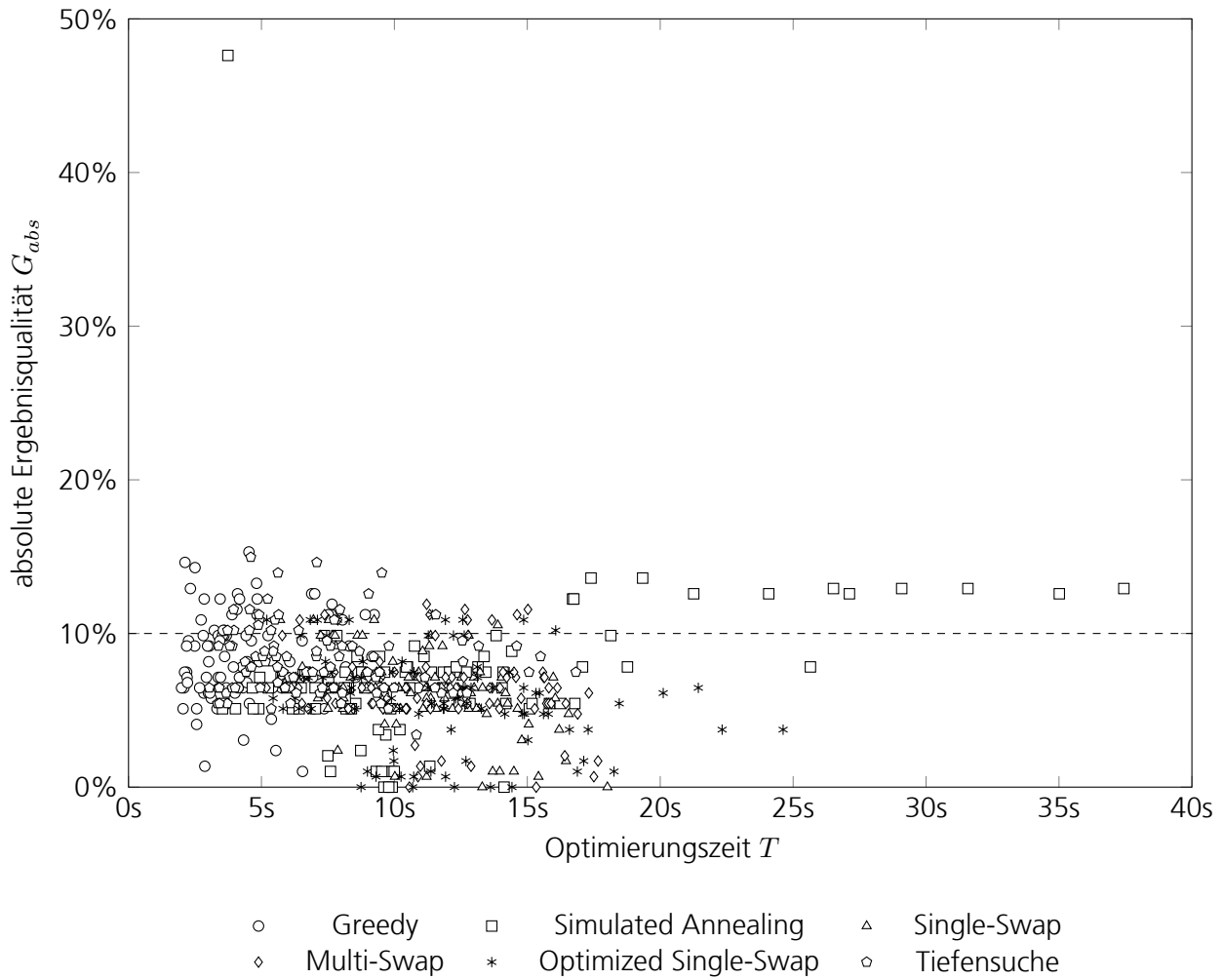


Abbildung E.3: Gegenüberstellung der absoluten Ergebnisqualitäten G_{abs} und Optimierungszeiten T der heuristischen Lösungsverfahren am Beispiel der »Schraubbaugruppe«, Anzahl der Iterationszyklen entsprechend Stichprobengröße $s=97$, konstante Iterationszahl je Optimierungszyklus $p=500$

Ergebnisse »Aufnahme Dachgepäckträger«

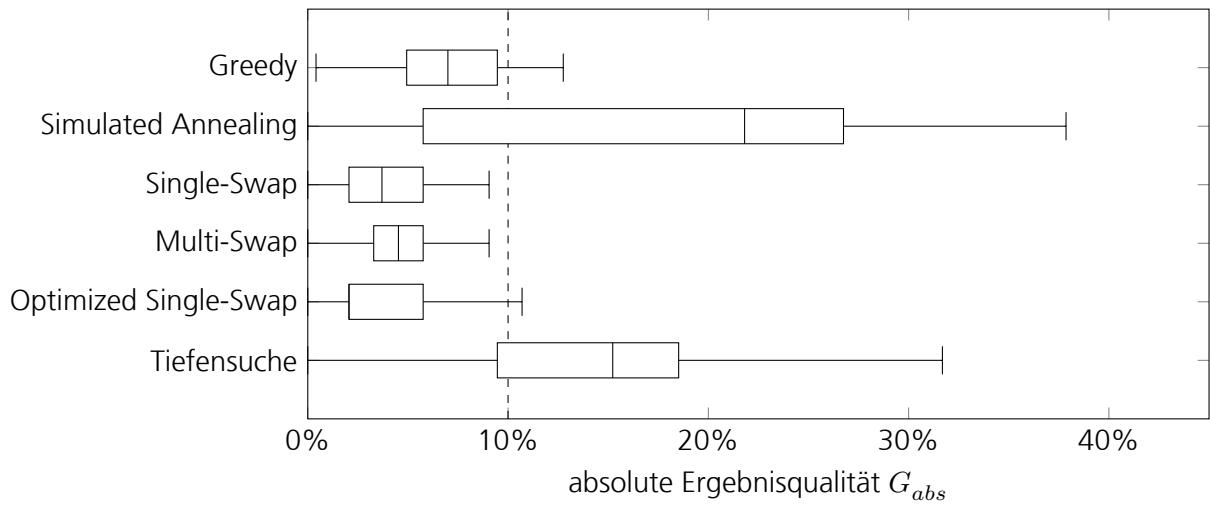


Abbildung E.4: Statistische Verteilung der absoluten Ergebnisqualität G_{abs} je Heuristik am Beispiel der »Aufnahme Dachgepäckträger«, Anzahl Optimierungszyklen entsprechend Stichprobengröße $s=97$, konstante Iterationszahl je Optimierungszyklus $p=500$

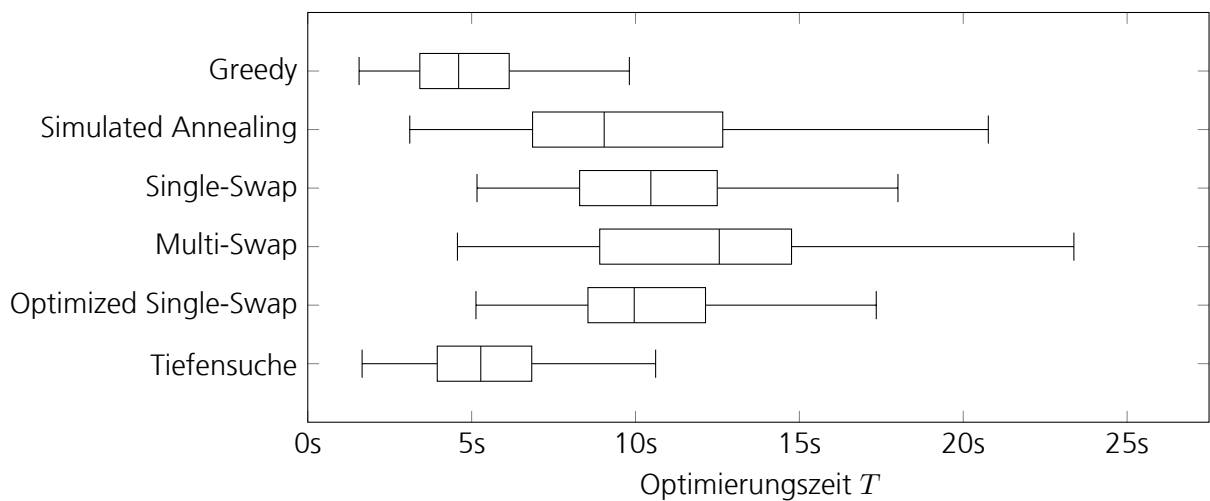


Abbildung E.5: Statistische Verteilung der absoluten Optimierungszeit T je Heuristik am Beispiel der »Aufnahme Dachgepäckträger«, Anzahl Optimierungszyklen entsprechend Stichprobengröße $s=97$, konstante Iterationszahl je Optimierungszyklus $p=500$

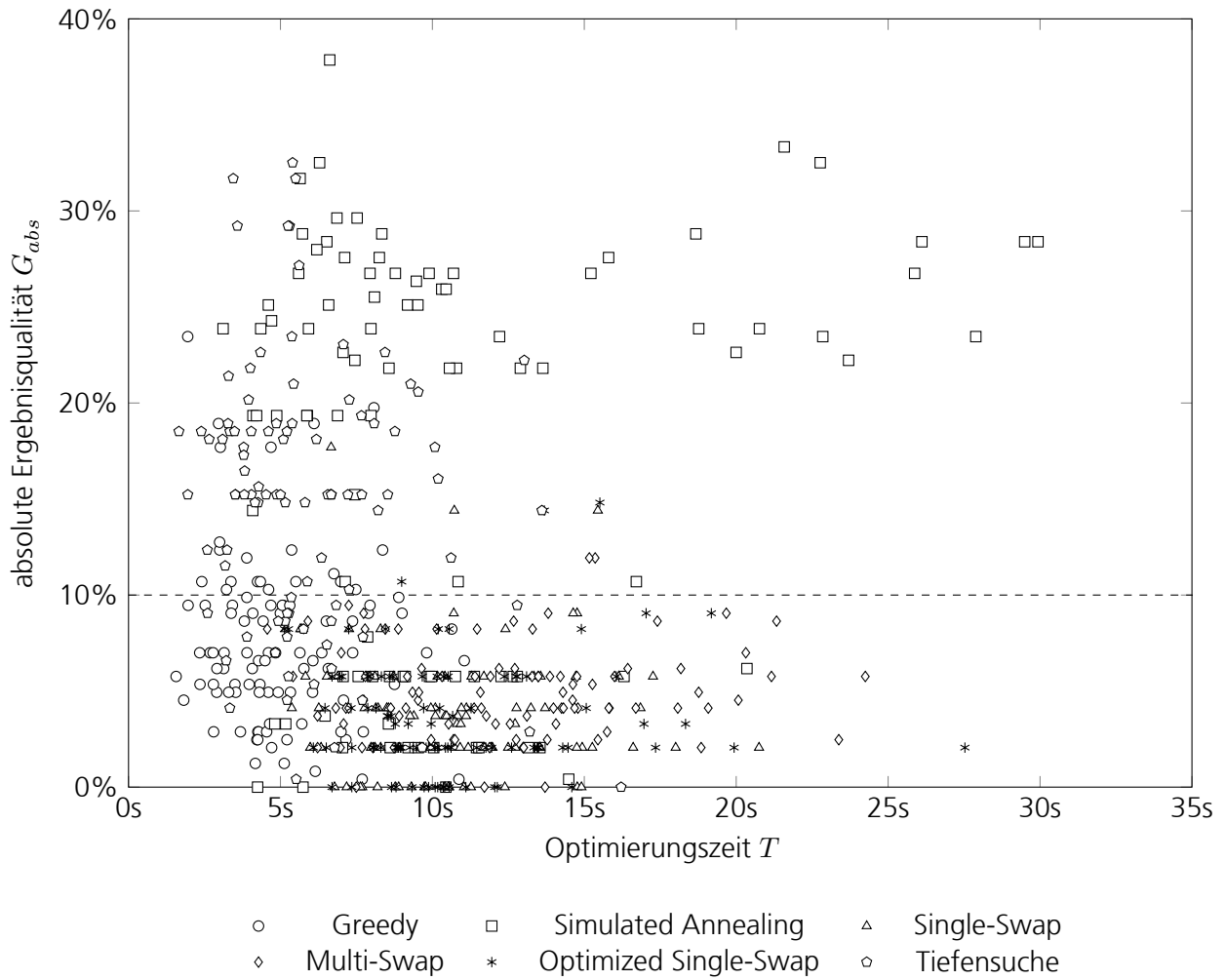


Abbildung E.6: Gegenüberstellung der absoluten Ergebnisqualitäten G_{abs} und Optimierungszeiten T der heuristischen Lösungsverfahren am Beispiel des »Dachgepäckträgers«, Anzahl der Iterationszyklen entsprechend Stichprobengröße $s=97$, konstante Iterationszahl je Optimierungszyklus $p=500$

Ergebnisse »Vormontage Schwenklager«

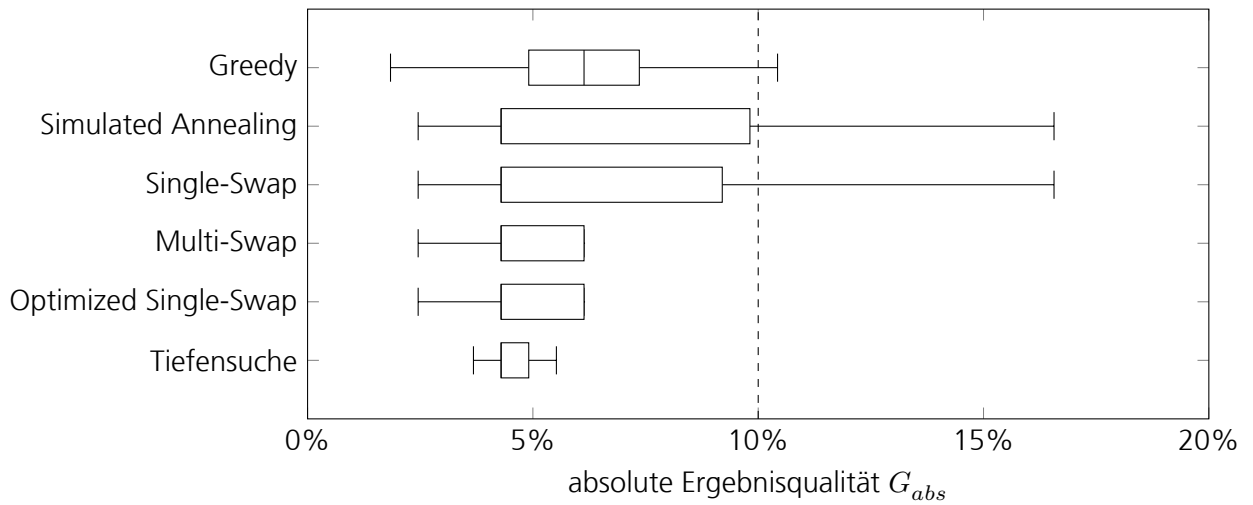


Abbildung E.7: Statistische Verteilung der absoluten Ergebnisqualität G_{abs} je Heuristik am Beispiel der »Vormontage Schwenklager«, Anzahl Optimierungszyklen entsprechend Stichprobengröße $s=97$, konstante Iterationszahl je Optimierungszyklus $p=500$

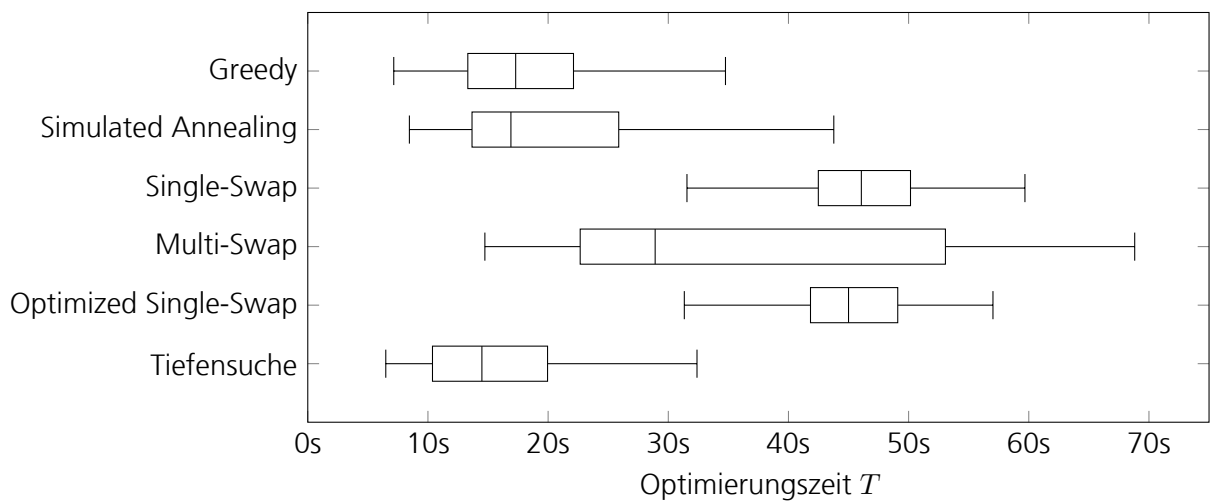


Abbildung E.8: Statistische Verteilung der absoluten Optimierungszeit T je Heuristik am Beispiel der »Vormontage Schwenklager«, Anzahl Optimierungszyklen entsprechend Stichprobengröße $s=97$, konstante Iterationszahl je Optimierungszyklus $p=500$

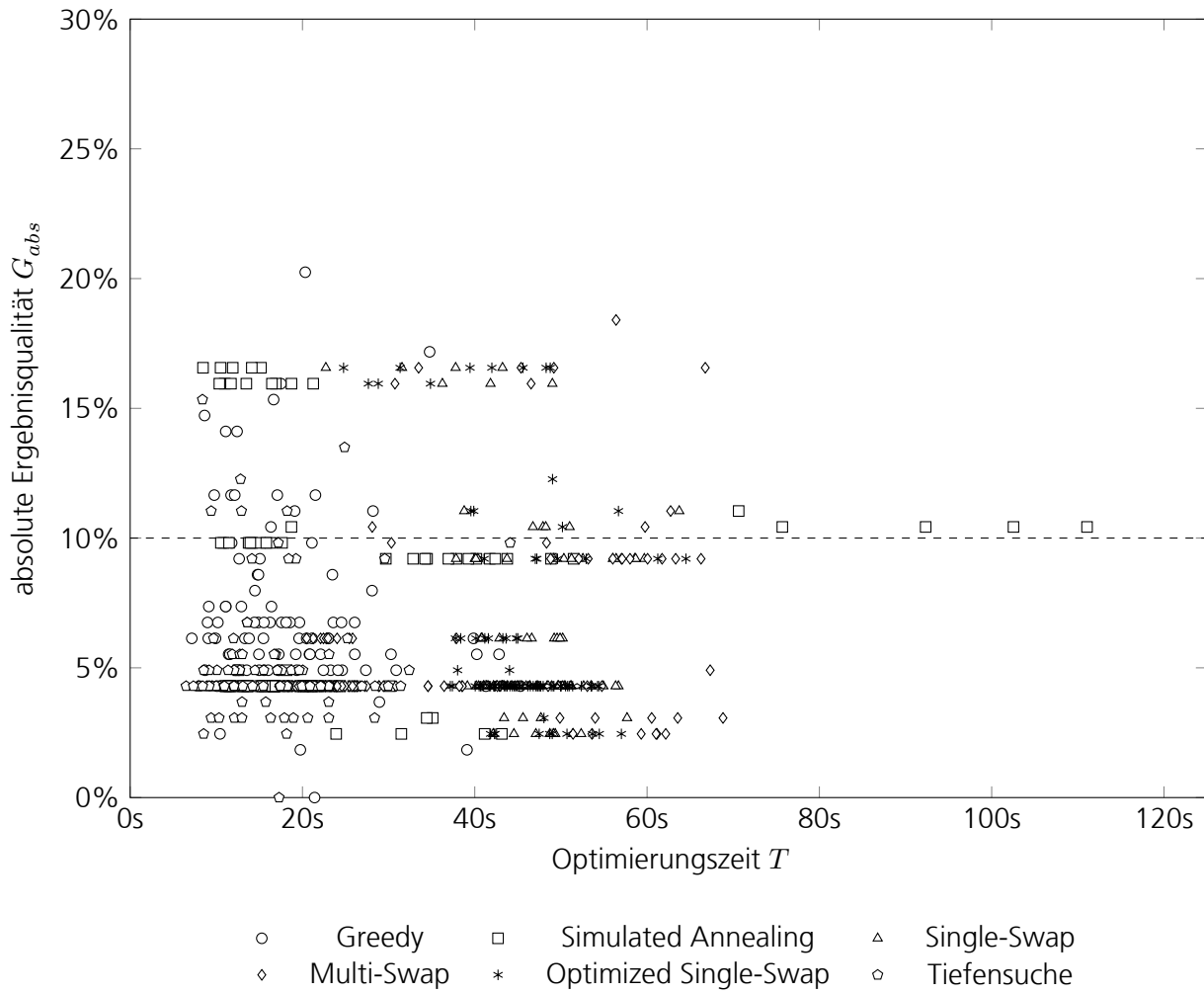


Abbildung E.9: Gegenüberstellung der absoluten Ergebnisqualitäten G_{abs} und Optimierungszeiten T der heuristischen Lösungsverfahren am Beispiel der »Vormontage Schwenklager«, Anzahl der Iterationszyklen entsprechend Stichprobengröße $s=97$, konstante Iterationszahl je Optimierungszyklus $p=500$

