

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme

**Planung der Fließbandabstimmung
am Beispiel der Automobilmontage**

Band 226



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Johannes Klaus Benedikt Fisel

**Veränderungsfähigkeit getakteter
Fließmontagesysteme**
Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der
Automobilmontage

Band 226

**Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme
Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der
Automobilmontage**

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation
von

Johannes Klaus Benedikt Fisel
aus Biberach an der Riss

Tag der mündlichen Prüfung: 05.04.2019
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6804-7

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferentin und für das mir entgegengebrachte Vertrauen in den vergangenen Jahren. Weiter danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis für sein Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen für den Prüfungsvorsitz.

Dem Karlsruher House of Young Scientists (KHYS) danke ich für die Förderung meines Forschungsaufenthaltes an der University of Wisconsin-Madison (UW). Ebenso gilt mein Dank Prof. Neil Duffie für die herzliche Gastfreundschaft und die wissenschaftlichen Diskussionen.

Allen Kolleginnen und Kollegen am wbk, im Besonderen im Bereich „Produktionssysteme“, danke ich für die freundschaftliche Atmosphäre am Institut und außerhalb des Arbeitsalltags. Besonders bedanken möchte ich mich an dieser Stelle bei meinen Kollegen Fabio Echsler Minguillon und Christoph Liebrecht für die vertrauensvolle Zusammenarbeit während meiner Zeit am wbk und ihr großes Engagement beim Korrekturlesen. Mein besonderer Dank gilt zudem allen Studenten, die mit großem Fleiß zum Gelingen meiner wissenschaftlichen Arbeit beigetragen haben. Für die offene, wissenschaftliche Diskussion bedanke ich mich besonders bei Atamert Arslan, Yannick Exner, Jan Heinzelmann, Tim Hellweg, Simon Hort, Matthias Liebig und Axel Reimold.

Abschließend möchte ich meinen Eltern und Brüdern für die bedingungslose Unterstützung und den liebevollen Rückhalt herzlich danken. Der größte Dank gilt meiner Freundin Melanie Mienhardt, die mit ihrem Verständnis und ihrer Unterstützung entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Karlsruhe, im Januar 2019

Johannes Klaus Benedikt Fisel

Abstract

The increasing popularity of electric vehicles poses challenges for companies in the automotive industry. The forecast of market penetration and shares of electrically powered vehicles is a current research topic and is subject to a high degree of uncertainty. This uncertainty of future market share translates into uncertainty of the variant mix used by car manufacturers in order to conduct the planning task of assembly line balancing. Changes in the variant mix can hardly be reacted to once the assembly line balancing has been determined.

Therefrom the scope of the present work can be derived. The daily operation of an assembly system using an initially defined assembly line balancing is to be designed under the premise of high economic efficiency. However, the system's changeability in terms of capacity reserves such as additional assembly stations or cycle time for the purpose of preventive protection against fluctuations in demand reduces the economic efficiency of an assembly system. For this reason, a planning methodology is required that equally pursues and evaluates the efficient design of the assembly line balancing as well as the allocation of additional capacities.

The current literature offers approaches for the mathematical optimization of assembly line balancing. Yet no approach can be identified that optimizes line balancing configurations with regard to the trade-off between inherent changeability and operating costs under uncertainty of the future variant mix. For this reason, the aim of the presented approach is to develop a methodology for conducting assembly line balancing planning tasks while taking into account possible future changes in the variant mix depending on defined scenarios.

The proposed methodology consists of three modules. The optimization module focuses on the development of an algorithm for the generation of changeable assembly line balancing configurations. In the evaluation module, the generated solutions are analyzed and evaluated with regard to specific production programs of the scenarios. The evaluated configuration alternatives form a multi criteria decision problem that is processed in the concluding decision module. By determining a ranking order of the alternatives based on the preference function of a decision-maker, a decision basis is provided.

The developed approach has been discussed and successfully applied in the BMBF-funded research project "EFFECT 360°". It makes a decisive contribution towards the changeability of assembly line balancing and supports the complex decision-making process in production planning under uncertainty of the future mix of variants.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
Formelverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen	5
2.1 Montage und Fließbandabstimmung	5
2.1.1 Begriff der Montage	5
2.1.2 Organisation und Funktionsweise der Montage	6
2.1.3 Montage in der Automobilproduktion	9
2.1.4 Fließbandabstimmung variantenreicher Montagelinien	11
2.2 Veränderungsfähigkeit	20
2.2.1 Veränderung und Veränderungsfähigkeit	20
2.2.2 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit	21
2.2.3 Kosten der Veränderungsfähigkeit	25
2.3 Methoden des Operations Research	27
2.3.1 Multikriterielle Entscheidungsprobleme	27
2.3.2 Allgemeines Optimierungsproblem	28
2.3.3 Klassifikation von Problemstellungen	29
2.3.4 Lösungsverfahren im Überblick	31
2.3.5 Die Fließbandabstimmung als Optimierungsproblem	32
3 Stand der Forschung	34

3.1	Anforderungen an die Planungsmethodik	34
3.2	Vorstellung und Diskussion bestehender Ansätze	37
3.2.1	Ansätze zur Planung und Bewertung veränderungsfähiger Fabriken und Produktionssysteme	37
3.2.2	Ansätze zur Fließbandabstimmung von Montagesystemen	42
3.3	Forschungsdefizit	45
4	Lösungsansatz	51
5	Gestaltung veränderungsfähiger getakteter Fließmontagesysteme	55
5.1	Optimierungsmodul	55
5.1.1	Annahmen	55
5.1.2	Modellierung des Fließmontagesystems	56
5.1.3	Einführung der Veränderungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen	57
5.1.4	Flexibilität von Fließbandabstimmungen	60
5.1.5	Wandlungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen	68
5.1.6	Optimierungsmodell veränderungsfähiger Fließbandabstimmungen	77
5.2	Bewertungsmodul	93
5.2.1	Annahmen	95
5.2.2	Optimierungsmodell der Reihenfolgebildung zur Bestimmung der Überlast	95
5.2.3	Bewertung der Greenfield-Kosten	102
5.2.4	Bewertung der Flexibilität	104
5.2.5	Bewertung der Wandlungsfähigkeit	111
5.3	Entscheidungsmodul	112
5.3.1	Auswahl der Zielkriterien	112
5.3.2	Parameter der Zielkriterien	113
6	Erprobung der Methodik und prototypische Softwarerealisierung	114
6.1	Einführung in das Anwendungsbeispiel der Automobilmontage	114
6.2	Optimierungsphase	115
6.2.1	Ausgestaltung des Montagesystems	115
6.2.2	Veränderungsfähigkeit	119
6.2.3	Zwischenergebnisse	127

6.3	Bewertungsphase	132
6.3.1	Definition der Produktionsprogramme	132
6.3.2	Bewertung der Greenfield-Kosten	133
6.3.3	Bewertung der Flexibilität	135
6.3.4	Bewertung der Wandlungsfähigkeit	137
6.4	Entscheidungsphase	138
6.4.1	Parametrisierung des Auswahlmodells	138
6.4.2	Rangfolge der Lösungsalternativen	139
6.5	Prototypische Implementierung	143
7	Diskussion und Ausblick	145
7.1	Diskussion und kritische Würdigung	145
7.2	Ausblick	147
8	Zusammenfassung	149
	Literaturverzeichnis	XV
	Abbildungsverzeichnis	XXXIX
	Tabellenverzeichnis	XLV
	Anhang	XLVII

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AHP	Analytic Hierarchy Process
AP	Arbeitsplatz
AVO	Arbeitsvorgang
BEV	Battery Electric Vehicle
BM	Betriebsmittel
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
bNGV	Bivalent Natural Gas Vehicle
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWK	Direkte Wandlungsprozesskosten
EFFECT	Energieeffiziente und flexibel industriell herstellbare Elektrofahrzeugantriebe
ELECTRE	Elimination et Choix Traduisant la Réalité
EW	Erwartungswert
FKZ	Flexibilitätskennzahl
GALBP	General Assembly Line Balancing Problem
ICE	Internal Combustion Engine
IWK	Indirekte Wandlungsprozesskosten
KA	Karosserieansprachepunkt
LAM	Lastaufnahmemittel
MADM	Multi Attribute Decision Making
MCDM	Multi Criteria Decision Analysis
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MODM	Multi Objective Decision Making

MTM	Methods-Time Measurement
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
PKW	Personenkraftwagen
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (früher: Reichsausschuß für Arbeitszeitermittlung)
RMS	Reconfigurable manufacturing systems
SALBP	Simple Assembly Line Balancing Problem
SK	Stationskosten
SUV	Sport Utility Vehicle
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
UML	Unified Modeling Language
VBA	Visual Basic for Applications
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WOK	Wandlungsobjektkosten
ZFW	Zielfunktionswert

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Größe
a	Jahr
A_{aw}	Zeitspanne vor Wandel
a_n	Nutzungsdauer in Jahren
A_p	Menge der Jahre einer Planungsperiode p
A_{pw}	Zeitspanne nach Wandel
AN	Anschaffungswert
at	Montagetakt eines Produktionsprogramms
AT	Menge der Montagetakte eines Produktionsprogramms
b	Betriebsmittel
B	Menge der Betriebsmittel
B_{desint}	Menge der zu desintegrierenden Betriebsmittel
B_{desinv}	Menge der zu veräußernden Betriebsmittel
B_{int}	Menge der zu integrierenden Betriebsmittel
B_{inv}	Menge der zu beschaffenden Betriebsmittel
B_{trans}	Menge der zu transportierenden Betriebsmittel
$bm_{b,i}$	Binäre Entscheidungsvariable für die Zuordnung des Betriebsmittels b zu Arbeitsvorgang i
$Bm_{b,u,i}$	Substitutionsmatrix des Betriebsmittels b durch Betriebsmittel u für Arbeitsvorgang i
bp	Betriebspunkt
BP_p	Menge zu prüfender Betriebspunkte
BP_r	Reduzierte Menge zu prüfender Betriebspunkte
C	Taktzeit

c_{ag}	Lohnnebenkosten
$c_{ap}(\tau)$	Kosten eines Montagearbeitsplatzes zum Zeitpunkt τ
$c_{ap,s}$	Mitarbeiterkosten in Szenario s
c_{build}	Kosten der physischen Integration
c_{desint}	Desintegrationskosten
c_{desinv}	Desinvestitionskosten
c_{eg}	Opportunitätskosten des entgangenen Gewinns
c_{ent}	Entgelt
c_{int}	Integrationskosten
c_{inv}	Investitionskosten
c_{lost}	Kosten entgangener Erlöse
c_{mq}	Kosten zur Qualifikation von Mitarbeitern
c_{od}	Kosten des Entsorgungsprozesses
c_{ol}	Kapazitätserweiterungskosten
c_{or}	Kosten des Beschaffungsprozesses
c_p	Kaufpreis
c_{plan}	Planungskosten
c_r	Restwert
c_{sd}	Kosten für Abtransport und Verpackung
c_{set}	Kosten der Inbetriebnahme
c_{si}	Kosten für Transport und Verpackung
$c_{stat}(\tau)$	Kosten einer Montagestation zum Zeitpunkt τ
$c_{stat,s}$	Kosten einer Montagestation in Szenario s
c_{sz}	Schichtzulage
c_{trans}	Kosten des Transports
$c_{w,p}$	Stundensatz eines Unterstützers in Periode p
COV	Kovarianz
D	Driftfähigkeit

d_y	Arbeitstage pro Jahr
d_i^+	Distanz einer Entscheidungsalternative i zum Idealpunkt
d_i^-	Distanz einer Entscheidungsalternative i zum Nadirpunkt
dc	Antriebskonzept
DC	Menge der Antriebskonzepte
dm_v	Nachfrage einer Fahrzeugvariante v
EA	Entscheidungsalternative
ED	Entscheidungsmatrix
$EW(Z)$	Erwartungswert einer Zufallsvariable Z
F	Zielfunktion
$f_{add,s}$	Funktion der Kosten für Mitarbeiter und zusätzliche Montagestationen für den Wandel zu Szenario s
$f_{desint,s}$	Funktion der Desintegrationskosten für den Wandel zu Szenario s
$f_{desinv,s}$	Funktion der Desinvestitionskosten für den Wandel zu Szenario s
f_{flex}	Zielfunktion der Flexibilität
f_{gk}	Zielfunktion der Greenfield-Kosten
$f_{int,s}$	Funktion der Integrationskosten für den Wandel zu Szenario s
$f_{inv,s}$	Funktion der Investitionskosten für den Wandel zu Szenario s
$f_{lost,s}$	Funktion der Opportunitätskosten für den Wandel zu Szenario s
$f_{plan,s}$	Funktion der Planungskosten für den Wandel zu Szenario s
$f_{trans,s}$	Funktion der Transportkosten für den Wandel zu Szenario s
f_{wf}	Zielfunktion der Wandlungsfähigkeit
fa	Fließbandabstimmung
FA	Menge der Fließbandabstimmungen
FG_{dc}	Freiheitsgrad eines Antriebskonzepts
FK^+	Obere Grenze des Flexibilitätskorridors
FK^-	Untere Grenze des Flexibilitätskorridors
FKZ	Flexibilitätskennzahl
FKZ^+	Obere Grenze der Flexibilitätskennzahl

FL_L	Kennzahl der Lage
FL_R	Kennzahl der Robustheit
g	Nebenbedingungsfunktion
$g_{h,i,j,k,s}$	Binäre Entscheidungsvariable für die gemeinsame Bearbeitung der Arbeitsvorgänge h und i an Arbeitsplatz j der Montagestation k in Szenario s
h	Arbeitsvorgang $\neq i$
i	Arbeitsvorgang
I	Menge der Arbeitsvorgänge
$I_{KA,s}$	Menge der in Szenario s an Karosserieansprachepunkt KA durchzuführenden Arbeitsvorgänge
I_{plan}	Menge der zu verschiebenden Arbeitsvorgänge
I_s	Menge der in Szenario s durchzuführenden Arbeitsvorgänge
I_{vr}	Menge der Tupel $(h, i) h, i \in I$ für die eine Vorrangbeziehung besteht
inc	Inkrement
int	Jahreszins
j	Arbeitsplatz
J	Menge der Arbeitsplätze
k	Montagestation
K	Menge der Montagestationen
KA	Menge der Karosserieansprachepunkte
$KA_{i,s}$	Menge der Karosserieansprachepunkte des Arbeitsvorgangs i in Szenario s
l	Antriebskonzept $\neq dc$
L	Menge der Antriebskonzepte $DC \setminus \{dc\}$
$lr_{b,k}$	Untere Schranke der Betriebsmittelzuordnung $r_{b,k}$
ls_i	Frühester Startzeitpunkt des Arbeitsvorgangs i
ly_i	Früheste Montagestation des Arbeitsvorgangs i
m	Montagestation $\leq k$
M	Hinreichend große Zahl

$m_{des,b,j,k,s}$	Binäre Entscheidungsvariable für die Desintegration eines Betriebsmittels b an einen Arbeitsplatz j der Montagestation k beim Wandel zu Szenario s
$m_{int,b,j,k,s}$	Binäre Entscheidungsvariable für die Integration eines Betriebsmittels b an einen Arbeitsplatz j der Montagestation k beim Wandel zu Szenario s
$me_{at,j,k}$	Endzeitpunkt des Montagetakts at an Arbeitsplatz j der Montagestation k
$ms_{at,j,k}$	Startzeitpunkt des Montagetakts at an Arbeitsplatz j der Montagestation k
mt	Monatsgehälter pro Jahr
n_{ik}	Normierte Ausprägung des Zielkriteriums r_{ik}
ND	Normalisierte und gewichtete Entscheidungsmatrix
oe	Ausstattungsmerkmal
OP	Optimierungsproblem
p	Planungsperiode
P_{pac}	Buchungswahrscheinlichkeit eines Ausstattungspakets
P_s	Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios s
$P_{spe,oe}$	Wahrscheinlichkeit der Einzelbestellung des Ausstattungsmerkmals oe
pac	Ausstattungspaket
$q_{b,s}$	Differenz der Anzahl von Betriebsmitteln b beim Wandel zu Szenario s
$q_{stat,s}$	Anzahl zusätzlicher Montagestationen beim Wandel zu Szenario s
$q_{trans,b,s}$	Anzahl der Transportvorgänge für Betriebsmittel b beim Wandel zu Szenario s
r_{ik}	Zielkriterium
$r_{b,k,j,s}$	Binäre Entscheidungsvariable für die Zuordnung eines Betriebsmittels b an einen Arbeitsplatz j der Montagestation k in Szenario s
r_{flex}	Entscheidungskriterium der Flexibilität
r_{gk}	Entscheidungskriterium der Greenfield-Kosten
r_{wf}	Entscheidungskriterium der Wandlungsfähigkeit

rc_i	Relative Nähe einer Entscheidungsalternative i
REF	Bestplatziertes Lösungsbündel basierend auf der Referenzlösung für s_0
s	Szenario
S	Menge der Szenarien
$S_v(Z)$	Dichtefunktion einer Zufallsvariable Z
sh_{dc}	Anteil des Antriebskonzepts dc im Modellmix
sh_{dc}^{var}	Variierter Anteil des Antriebskonzepts dc im Modellmix
$sh_i^{r,dc}$	Relativer Anteil eines Antriebskonzepts l im Modellmix ohne dc
$sh_i^{var,dc}$	Relativ skaliertes Anteil eines Antriebskonzepts l im Modellmix ohne dc
$shft_d$	Anzahl Schichten pro Tag
sol	Aus Fließbandabstimmungen bestehendes Lösungsbündel
SOL	Menge der Lösungsbündel
sol_{ev}	Durch zusätzliche Bewertungen ergänztes Lösungsbündel
t_{avg}	Arithmetisch gemittelte Bearbeitungszeit
t_{desint}	Zeit zur Durchführung eines Desintegrationsvorgangs
$t_{dr,j,k}$	Driftzeitpuffer an Arbeitsplatz j der Montagestation k für Drift in Arbeitsplatz j an Montagestation $k + 1$
t_i	Bearbeitungszeit der Arbeitsvorgangs i
t_i^{bp}	Betriebspunktspezifische Bearbeitungszeit des Arbeitsvorgangs i
t_{int}	Zeit zur Durchführung eines Integrationsvorgangs
t_{kum}	Kumulierte Bearbeitungszeit
t_{lost}	Zeit in der Opportunitätskosten anfallen
t_m	Verfügbare Bearbeitungszeit an Montagestation m
t_{max}	Höchste Bearbeitungsdauer
t_{min}	Niedrigste Bearbeitungsdauer
t_{ol}	Überlast pro Schicht
t_{robust}	Bearbeitungszeit inklusive Zeitaufschlag
t_{trans}	Zeit zur Durchführung eines Transportvorgangs

$t_{v,j,k}$	Bearbeitungszeit der Fahrzeugvariante v an Arbeitsplatz j der Montagestation k
u	Betriebsmittelsubstitut
$um_{desint,b,k}$	Obere Schranke der Betriebsmitteldesintegration $m_{desint,b,k}$
$um_{int,b,k}$	Obere Schranke der Betriebsmittelintegration $m_{int,b,k}$
$ur_{b,k}$	Obere Schranke der Betriebsmittelzuordnung $r_{b,k}$
us_i	Spätester Startzeitpunkt des Arbeitsvorgangs i
uy_i	Späteste Montagestation des Arbeitsvorgangs i
v	Fahrzeugvariante
V	Menge der Fahrzeugvarianten
var_j	Varianz der aggregierten Bearbeitungszeit an Arbeitsplatz j
$Var(Z)$	Varianz einer Zufallsvariable Z
VB_{oe}	Verbaurrate eines Ausstattungsmerkmals oe
VG_i	Vorgänger des Arbeitsvorgangs i
w	Gewichtungsfaktor
w_{FlR}	Gewichtungsfaktor der Robustheit von Flexibilitätskorridoren
w_{FlL}	Gewichtungsfaktor der Lage von Flexibilitätskorridoren
w_{flex}	Gewichtungsfaktor des Zielkriteriums Flexibilität
w_{gk}	Gewichtungsfaktor des Zielkriteriums Greenfield-Kosten
w_n	Gewichtungsfaktor der Varianz einer Zufallszahl
w_s	Gewichtungsfaktor eines Szenarios
w_{wf}	Gewichtungsfaktor des Zielkriteriums Wandlungsfähigkeit
W	Wertebereich
WBW	Wiederbeschaffungswert
WP	Konstante zur Definition der maximalen Arbeitsplätze pro Montagestation
\vec{x}	Variablenvektor
$x_{i,j,k,s}$	Binäre Entscheidungsvariable für die Zuordnung eines Arbeitsvorgangs i zu einem Arbeitsplatz j der Montagestation k in Szenario s

$x_{v,at}$	Binäre Entscheidungsvariable für die Zuordnung einer Fahrzeugvariante v zu einem Montagetak at
$y_{at,j,k}$	Binäre Entscheidungsvariable für die Nutzung des Driftbereichs von Arbeitsplatz j an Montagestation k in Montagetak at
y_j	Binäre Entscheidungsvariable für die Nutzung von Arbeitsplatz j
y_k	Binäre Entscheidungsvariable für die Nutzung von Montagestation k
z	Zielfunktionswert
\vec{z}	Zielfunktionsvektor
ZFW	Zielfunktionswert
z_{dc}^{bp}	Binäre Entscheidungsvariable für die Zulässigkeit eines Betriebspunkts bp für das Antriebskonzept dc
\vec{z}_{dc}	Zulässigkeitsvektor des Antriebskonzepts dc
α	Anzahl Entscheidungsalternativen
β	Anzahl Zielkriterien
$\gamma_{b,s}$	Binäre Entscheidungsvariable für die Kennzeichnung des Betriebsmittels b als Verursacher der höchsten Opportunitätskosten beim Wandel zu Szenario s
$\delta_{eq,b,s}$	Binäre Entscheidungsvariable für die gleichbleibende Anzahl an Betriebsmitteln b beim Wandel zu Szenario s
$\delta_{neg,b,s}$	Binäre Entscheidungsvariable für die Verringerung der Anzahl an Betriebsmitteln b beim Wandel zu Szenario s
$\delta_{pos,b,s}$	Binäre Entscheidungsvariable für die Erhöhung der Anzahl an Betriebsmitteln b beim Wandel zu Szenario s
$\varepsilon_{b,s}$	Binäre Entscheidungsvariable für die Verlagerung des Betriebsmittels b beim Wandel zu Szenario s
$\varepsilon_{stat,s}$	Binäre Entscheidungsvariable für die Beschaffung zusätzlicher Montagestationen beim Wandel zu Szenario s
ϑ^+	Utopia-Punkt
ϑ^-	Nadir-Punkt
ι	Entscheidungsalternative
κ	Zielkriterium
K^{ZK}	Menge der Zielkriterien der Kosten

K^{ZN}	Menge der Zielkriterien des Nutzens
μ	Erwartungswert einer Verteilung
σ	Standardabweichung einer Verteilung
σ^2	Varianz einer Verteilung
τ	Zeitpunkt
Z	Zufallsvariable

1 Einleitung

Die europäische CO₂-Gesetzgebung sieht eine Reduktion der durchschnittlichen CO₂-Emissionen neuzugelassener Personenkraftwagen (PKW) vor. Der Zielwert wurde bereits von 140 g/km im Jahr 2008 auf 120 g/km für das Jahr 2015 herabgestuft. Der angestrebte CO₂-Zielwert für das Jahr 2020 von 95 g/km (Europäische Union 2009) ist durch ausschließliche Verbrauchsoptimierung konventioneller Antriebe kaum zu erreichen. Elektrifizierte Antriebskonzepte stellen eine vielversprechende Alternative dar (Nationale Plattform Elektromobilität 2014) und können einen wertvollen Beitrag leisten, um die durchschnittlichen CO₂-Zielwerte zu erreichen. (Bertram & Bongard 2013) Zusätzlich zu den regulatorischen Rahmenbedingungen existieren staatliche Anreizsysteme, um die Marktdurchdringung der Elektromobilität zu fördern. So fördert die Regierung der Bundesrepublik Deutschland den Neukauf von elektrisch betriebenen oder unterstützten Fahrzeugen mit insgesamt einer Milliarde Euro bis in das Jahr 2019 (BMWi 2016).

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Prognose der Marktdurchdringung von elektrisch angetriebenen PKW ist aktueller Gegenstand der Forschung und unterliegt einer hohen Unsicherheit. Studien konstatieren hierzu einen breiten Korridor der möglichen zukünftigen Jahresabsatzzahlen (Schühle 2014; Adolf & Rommerskirchen 2014; BuW 2017). Den Studien ist gemein, dass die Prognosen der Fahrzeugabsatzzahlen von einem steigenden Verlauf mit geringen initialen Absatzzahlen ausgehen. Da der Aufbau und Betrieb von dedizierten Montagelinien für Fahrzeuge mit geringen Produktionsmengen kaum wirtschaftlich zu gestalten ist (Kampker et al. 2012), sind Hersteller von PKW mit der Herausforderung konfrontiert, Elektrofahrzeuge in bestehende Montagesysteme zu integrieren sowie auf Schwankungen im Variantenmix zu reagieren (Kampker 2014).

Die Montage in der Automobilindustrie erfolgt üblicherweise in getakteten Fließmontagesystemen (Swist 2014). Hierbei werden Montagevorgänge an verketteten Montagestationen innerhalb einer definierten Taktzeit durchgeführt (Milberg, Reinhart & Spath 1999). Der Planungsprozess zur Zuordnung der Montagevorgänge zu Montagestationen wird als Fließbandabstimmung bezeichnet (Boysen 2005; Dörmer 2013). Wesentliche Komplexitätstreiber bestehen hierbei in den unterschiedlichen Montageprozessen und Bearbeitungszeiten der einzelnen Produkte und Varianten (Scholl 1999). Im Rahmen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs begründen sich diese Treiber durch Veränderungen der Fahrzeugstruktur sowie den verbauten Komponenten, wie der Hochvoltbatterie oder Hochvoltleitungssätzen (Maschke 2010), was bei der Produktion von Elektrofahrzeugen zu berücksichtigen ist (Kampker 2014). Die Fließbandabstimmung variantenreicher Montagelinien wird typischerweise auf einen fixierten durchschnittlichen Variantenmix ausgelegt (Gans et al. 2011), sodass auf Veränderungen im Variantenmix nach Festlegung der Fließbandabstimmung nur unflexibel reagiert werden kann (Scholl 1999; Dombrowski & Medo 2006).

Hieraus ergibt sich das Spannungsfeld der vorliegenden Arbeit. Der operative Betrieb eines Montagesystems unter Anwendung der initial festgelegten Fließbandabstimmung ist unter der Prämisse einer hohen Wirtschaftlichkeit effizient auszulegen (Hu et al. 2011). Kapazitätsvorhalte in Form von zusätzlichen Montagestationen oder Taktzeitreserven zur präventiven Absicherung gegen Nachfrageschwankungen verringern dabei jedoch die Wirtschaftlichkeit des Montagesystems (Altemeier 2009). Die Anpassung an schwankende externe Einflussgrößen stellt allerdings eine zentrale Anforderung in der Umsetzung des Markthochlaufs der Elektromobilität dar. Abgeleitet ergibt sich die Problemstellung, die Bandbelegung von PKW-Montagelinien hocheffizient zu gestalten, jedoch auch Vorhalte zu schaffen um die Fließbandabstimmung an Veränderungen wie Schwankungen im Variantenmix oder neue Varianten anzupassen. Der Versuch die effiziente Gestaltung der Fließbandabstimmung sowie den Vorhalt von Kapazitäten zu vereinen, führt zu einem Mehrzielproblem mit konkurrierenden Zielen. Die Lösung dieses Problems unter Betrachtung der Unsicherheit des Variantenmix bildet die wissenschaftliche Problemstellung der vorliegenden Arbeit.

Forschungsleitende Fragestellungen

Aus den obigen Ausführungen leiten sich folgende forschungsleitenden Fragestellungen für die vorliegende Arbeit ab:

1. Wie kann auf Veränderungen im Variantenmix durch das gezielte Einbringen von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der Fließbandabstimmung reagiert werden?
2. Wie kann bei der Fließbandabstimmung die potentielle Integration weiterer Produktvarianten berücksichtigt werden?
3. Wie kann der Zielkonflikt einer hohen Effizienz bei gleichzeitiger Einbringung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit gelöst werden?
4. Welche Betriebsmittel sind auszuwählen, um die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der Montagelinie kostenoptimal zu unterstützen?

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Fließbandabstimmung von getakteten Fließmontagesystemen unter Unsicherheit des Produktionsprogramms. Diese Methodik soll dabei auf die Anwendung eines einheitlichen durchschnittlichen Variantenmix als Grundlage der Fließbandabstimmung verzichten. Vielmehr sollen Arbeitszeitvorhalte spezifisch dort eingebracht werden, wo die Zeitspreizung des Variantenmix erhöht ist und dementsprechend Schwankungen im Variantenmix die Einhaltung des Taktes besonders gefährden. Aufgrund der Integration neuer Produktvarianten oder weitreichenden Veränderungen im Variantenmix, die den Charakter einer Schwankung übersteigen, können Anpassungen der Fließbandabstimmung und damit eine örtliche Verlagerung von Montageumfängen erforderlich sein. Die zu entwickelnde Methodik berücksichtigt diesen Fall, indem eine zukunftsgerichtete Allokation von Montageumfängen zu Montagestationen vorgenommen wird. Hierdurch soll der Aufwand in Form von Verlagerungen von Montageumfängen zu anderen Montagestationen minimiert werden. Als Grundlage der Allokation von Montageumfängen sind Szenario-Analysen durchzuführen. Unter Berücksichtigung der identifizierten Szenarien sollen Fließbandabstimmungen erzeugt und durch quantitative Kennzahlen bewertet werden. Diese Bewertungen sollen abschließend in eine Gesamtbewertung überführt werden, die in einem Auswahlproblem der erzeugten Fließbandabstimmungen resultiert.

1.3 Aufbau der Arbeit

In diesem Kapitel wird der Aufbau der Arbeit beschrieben und somit das Vorgehen zur Erreichung der Zielsetzung und zur Beantwortung der forschungsleitenden Fragestellungen erläutert.

Nachdem in Kapitel 1 die Arbeit motiviert und hieraus die zu erreichende Zielstellung abgeleitet wurde, erfolgt in Kapitel 2 die Vorstellung der relevanten Grundlagen zum Verständnis der entwickelten Methodik. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Einordnung und Beschreibung der Fließbandabstimmung, den grundlegenden Eigenschaften von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit sowie relevanten Aspekten des Operation Research. Nachfolgend wird in Kapitel 3 der aktuelle Stand der Forschung dargelegt. Dieser umfasst sowohl Forschungsansätze zur Planung und Bewertung veränderungsfähiger Fabriken und Produktionssysteme als auch Forschungsansätze zur Gestaltung von Fließbandabstimmungen. Das identifizierte Forschungsdefizit wird hierbei aufgezeigt und im weiteren Verlauf der Arbeit adressiert. Aufbauend auf den beschriebenen Grundlagen sowie des abgeleiteten Forschungsdefizits erfolgt in Kapitel 4 die Vorstellung des grundlegenden Lösungsansatzes. Dieser wird in Kapitel 5 aufgegriffen und detailliert in drei Modulen beschrieben. Das Optimierungsmodul umfasst die Modellierung des Optimierungsproblems veränderungsfähiger Fließbandabstimmungen, die im nachfolgenden Bewertungsmodul über die Zielkriterien der Optimierung hinaus evaluiert werden. Im anschließenden Entscheidungsmodul erfolgt hieraus die Ableitung einer multikriteriellen Entscheidungsvorlage. Der methodische Lösungsansatz wird in Kapitel 6 am realen Beispiel einer veränderungsfähigen Fließbandabstimmung in der Automobilindustrie erprobt, wobei die Module des methodischen Vorgehens durchlaufen werden. Die hierbei erzielten Ergebnisse werden in Kapitel 7 diskutiert. Abschließend wird die Arbeit in Kapitel 8 zusammengefasst.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel widmet sich der Vermittlung von Begriffen und Konzepten, die zum Verständnis der entwickelten Methodik erforderlich sind. Zunächst erfolgt die Vorstellung der Grundlagen zur Montage und Fließbandabstimmung in der Automobilindustrie (Kapitel 2.1). Nachfolgend wird das Konzept der Veränderungsfähigkeit diskutiert, wobei eine Differenzierung der Begriffe Flexibilität und Wandlungsfähigkeit vorgenommen wird (Kapitel 2.2). Abschließend erfolgt die Beschreibung der Planungsunterstützung zur Fließbandabstimmung durch Methoden des Operations Research (Kapitel 2.3).

2.1 Montage und Fließbandabstimmung

Im Folgenden werden die wesentlichen Begriffe und Aufgaben der Montage und Fließbandabstimmung in der Automobilindustrie dargelegt. Dabei findet eine Fokussierung auf den Betrachtungsumfang der entwickelten Methodik statt.

2.1.1 Begriff der Montage

Die Montage stellt die letzte Stufe des industriellen Produktionsprozesses dar (Eversheim 1996; Wiendahl 2014) und beschreibt den „[...] Zusammenbau von Teilen und/oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen [...]“ (VDI 1978). Der Grundgedanke dieser Definition, durch den Zusammenbau von Teilen ein Erzeugnis einer höheren Ebene zu erzeugen, ist allgemein akzeptiert (u.a. Warnecke, Lühr & Kiener (1975) sowie Spur & Helwig (1986)).

Der beschriebene Zusammenbau von Teilen besteht im Kern aus Operationen des Fügens nach DIN 8593 (2003) sowie des Handhabens von Werkstücken nach VDI Richtlinie 2860 (1990) (Lotter 2012a). Der Montageprozess umfasst somit auch das Fügeverfahren ergänzende Nebenfunktionen wie Justieren und Kontrollieren (Westkämper 2006).

Aufgrund der späten Position im Produktionsprozess ist die Montage durch eine hohe Kundennähe und somit hohe Qualitätsverantwortung geprägt (Westkämper et al. 2001), da im vorherigen Produktionsprozess unentdeckte organisatorische, terminliche oder qualitative Fehler (Reinhart & Schneider 1996) oftmals erst in der Montage entdeckt werden (März & Langsdorff 2001).

2.1.2 Organisation und Funktionsweise der Montage

Im nachfolgenden Abschnitt werden die wesentlichen Organisationsformen der Montage sowie die Funktionsweise der Fließmontage beschrieben, auf welcher der Fokus der Arbeit liegt.

2.1.2.1 Organisationsformen der Montage

Die Organisationsform der Montage beschreibt die räumlichen und zeitlichen Zusammenhänge von Mitarbeitern und Betriebsmitteln (Milberg, Reinhart & Spath 1999). Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, können dabei fünf Organisationsformen unterschieden werden, die durch unterschiedliche Ausprägungen der Beweglichkeit von Montageobjekten und Arbeitsplätzen gekennzeichnet sind (Spur & Helwig 1986).

Liegen sowohl ein stationäres Montageobjekt als auch ein stationärer Arbeitsplatz vor, so wird die Organisationsform als Einzelplatzmontage bezeichnet. Typisch für diese Organisationsform sind kleine Produkte mit geringen Montageumfänge (Richter 2012). Können die Arbeitsplätze zur Montage eines stationären Montageobjekts jedoch bewegt werden, so wird dies als Baustellenmontage oder Gruppenmontage bezeichnet. Diese Organisationsform kommt insbesondere bei großvolumigen Montageobjekten zur Anwendung. (Lotter 2012b)

Hinsichtlich der Kategorisierung von Montageformen zur Bearbeitung beweglicher Montageobjekte ist zusätzlich die Verkettung von Arbeitsplätzen zu beachten. Liegen stationäre Arbeitsplätze ohne zeitliche Bindung vor, so wird dies als Reihenmontage bezeichnet, wobei aufgrund der nicht vorgegebenen Taktzeit eine Entkopplung in Form von Zwischenpuffern erforderlich ist (Milberg, Reinhart & Spath 1999). Ein wesentlicher Freiheitsgrad der Reihenmontage liegt in der Möglichkeit, einzelne Arbeitsstationen zu überspringen (Eversheim 2011). Werden bewegliche Montageobjekte jedoch zeitlich getaktet in starr verketteten Stationen und ohne Zwischenpuffer bearbeitet, so wird die vorliegende Montageform als Taktstraßenmontage bezeichnet. In der Fließmontage

sind die einzelnen Montagestationen ebenso ohne Zwischenpuffer miteinander verket- tet. Hierbei wird das Montageobjekt jedoch entweder vollständig kontinuierlich bewegt oder während der Bearbeitung angehalten, im Gegensatz zur Taktstraßenmontage al- lerdings unabhängig vom Gesamtsystem weitergeleitet. (Spur & Helwig 1986)

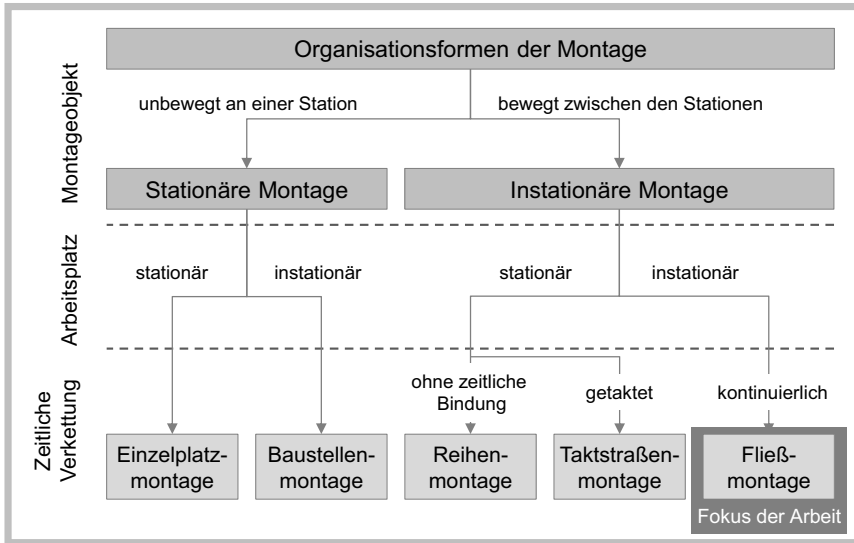


Abbildung 2.1: Organisationsformen der Montage (in Anlehnung an Spur & Helwig (1986) und Milberg, Reinhart & Spath (1999))

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Fließmontage unter kontinuierlicher Bewe- gung des Montageobjekts fokussiert, da diese eine hohe Eignung hinsichtlich der Montage komplexer Produkte mit hoher Variantenzahl aufweist (Prasch 2010) und aus die- sem Grund in der Automobilindustrie weit verbreitet ist (Freye 1997).

2.1.2.2 Funktionsweise der Fließmontage

Ist die Bewältigung des Gesamtmontageaufwands eines Montageobjekts nicht an einer Station möglich, so wird dieser in Elementartätigkeiten zerlegt (Warnecke 2013). Diese sind aus ökonomischen oder technischen Gründen nicht weiter teilbar und werden auch als Arbeitsgänge (Klenke 1977) oder Arbeitsvorgänge bezeichnet (Eversheim & Abels 2003), wobei im weiteren Verlauf der Arbeit die Bezeichnung **Arbeitsvorgänge** (AVOs) gewählt wird. Zur Montage in Fließmontagesystemen werden die Arbeitsvorgänge auf

mehrere verkettete Stationen mit vorgegebenem Zeitrahmen zur Durchführung aufgeteilt. Dieser Zeitrahmen wird als **Taktzeit** bezeichnet (Warnecke 2013). Hinsichtlich der Aufteilung der Arbeitsvorgänge ist zu beachten, dass deren Anordnung nicht im Widerspruch zu üblicherweise technisch oder organisatorisch begründeten Reihenfolgerestriktionen steht (Steffen 2013).

2.1.2.3 Berücksichtigung von Varianten in der Fließmontage

Dem Trend nach individuellen Produkten begegnen Unternehmen häufig mit einer Erhöhung der Produktvielfalt (Abele, Kuske & Lang 2011), die in der Automobilindustrie sowohl durch die Erweiterung von Modellreihen, Derivaten oder Fahrzeugvarianten erreicht werden kann. Eine Modellreihe beschreibt einen Fahrzeugtyp oder eine Typgruppe, die üblicherweise durch einen Schriftzug am Heck des Fahrzeuges gekennzeichnet ist (Kraffahrtbundesamt 2017). Beispielhaft können die Modellreihen 3er und 5er des Herstellers BMW oder die C-Klasse bzw. E-Klasse als Modellreihen des Herstellers Mercedes Benz genannt werden. Eine Modellreihe gliedert sich üblicherweise in mehrere Modellvarianten auf, die sich vor allem hinsichtlich des Gestaltungskriteriums der Karosserieform unterscheiden und auch als Derivate bezeichnet werden (Paul & Harms 2004). Exemplarische Derivate sind Limousine, Coupé, Sport Utility Vehicle (SUV) sowie Mischformen (Göpfert, Braun & Schulz 2013). Durch die Kombination von Karosserieformen mit unterschiedlichen Fahrwerken, Aggregaten und Ausstattungsvarianten werden die Fahrzeugvarianten erzeugt und somit die Produktvielfalt erhöht (Bartels 2009). Im Vergleich zu einem konventionellen Verbrennungsmotor entfallen bei einem rein batterieelektrischen Antrieb beispielsweise die Abgasanlage, Lichtmaschine und Kraftstoffversorgung, wobei jedoch im Gegenzug u.a. das Batteriesystem sowie die entsprechende Leistungselektronik zu integrieren sind (Burkert 2017).

Die zunehmende Anzahl an Fahrzeugvarianten ist im Rahmen der Montageplanung unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit zu beachten (Große-Heitmeyer 2013; Schuh et al. 2011). Nach Scholl (1999) werden Fließmontagesysteme hinsichtlich der Variantenbeherrschung in Einprodukt-, Mehrprodukt- und Variantenlinien unterscheiden. Wie in Abbildung 2.2 dargestellt, verdeutlicht Boysen (2005) diese Klassifikation durch die Spezifizierung des Begriffs der Mehrproduktlinie als serienweise Mehrproduktlinie. Eine Einproduktlinie liegt dann vor, wenn das Fließbandsystem zur Montage eines homogenen Produkts eingesetzt wird. Gilt es jedoch mehrere Produkte zu montieren, so kann hierfür eine serienweise Mehrproduktlinie oder eine Variantenlinie eingesetzt

werden. Die serienweise Mehrproduktlinie ist dadurch gekennzeichnet, dass die zu produzierenden Produkte signifikante Unterschiede aufweisen, die im Produktionsprozess zum variantenspezifischen Umrüsten oder Umbau führen. Im Gegensatz hierzu ermöglicht eine Variantenlinie eine wahlfreie Reihenfolge der Produkte in Losgröße 1, wodurch Umrüst- und Umbauvorgänge obsolet sind (Scholl 1999).

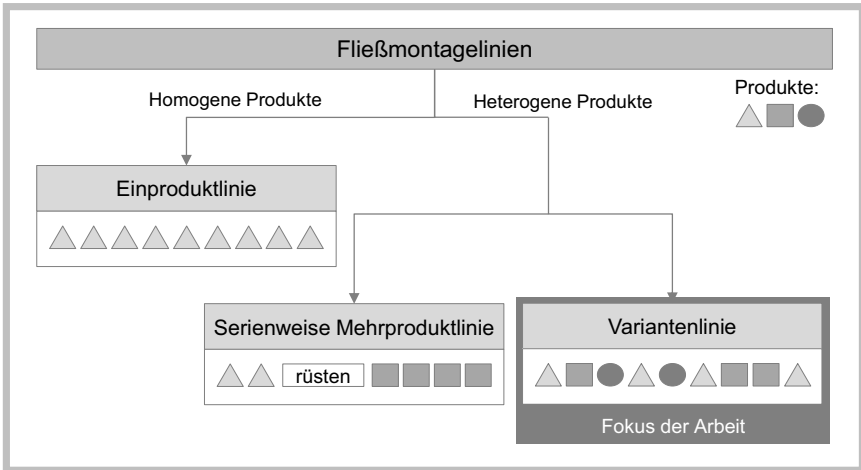


Abbildung 2.2: Klassifikation von Fließmontagelinien (in Anlehnung an Scholl (1999) und Boysen (2005))

Ein weiterer Vorteil von Variantenlinien ist der Ausgleich von Nachfrageschwankungen im Variantenmix, der als Stückzahlenausgleichseffekt bezeichnet wird (Roscher 2008). Dieser Effekt kann allerdings nur bei hinreichender Ähnlichkeit der Varianten ausgenutzt werden, da durch große Unterschiede der Varianten die Effizienz der Montage sinkt und somit wirtschaftliche Nachteile entstehen (Alden, Costy & Inman 2002). Die Variantenlinie, als in der Automobilindustrie weit verbreitete Ausprägung von Montagelinien (Dörmer 2013), steht im Fokus der vorliegenden Arbeit.

2.1.3 Montage in der Automobilproduktion

Nachdem die Variantenlinie als fokussierte Ausprägung der Fließmontage beschrieben ist, wird nun deren praktische Ausgestaltung in der Automobilproduktion dargelegt. Hierzu wird vorab eine Einordnung der Montage in den Produktionsprozess der Automobilfabrik vorgenommen.

Die Automobilfabrik ist typischerweise nach aufsteigender Produktionsstufe in die Gewerke Rohbau, Lack und Montage untergliedert (Roscher 2008). Andere Autoren bezeichnen zudem das Presswerk als eigenständiges Gewerk, das die Produktionsvorstufe des Rohbaus darstellt (Askar 2008; Kropik 2009). Die Gewerke sind untereinander durch Puffer entkoppelt. Hierdurch wird einerseits eine Störungs- und Schichtentkopplung ermöglicht, andererseits wird durch den Einsatz von Puffern eine Resequenzierung der Fahrzeuge und somit eine günstige Reihenfolge für die nachfolgende Produktionsstufe umsetzbar (Baumgärtel 1999).

Die Produktion eines Automobils beginnt mit dem Zuschnitt von Blech-Coils und der anschließenden Formgebung durch Pressvorgänge im Presswerk. Nachfolgend werden die erzeugten Blechteile im Rohbau mittels hochautomatisierter Roboter- und Fügetechnik zu Karosserien gefügt (Kropik 2009). In der Lackiererei werden anschließend die Farbgebung und die Korrosionsbeständigkeit der Rohbaukarosse umgesetzt (Wedeniowski 2015).

Der in Abbildung 2.3 exemplarisch abgebildete Montageprozess stellt die letzte Produktionsstufe der Automobilfabrik dar. In diesem Bereich wird zwischen dedizierten Modulmontagebereichen und der Hauptlinie unterschieden. Bei der Modulmontage werden Fahrzeugmodule, wie beispielsweise Cockpits, Achsen und Motoren, vormontiert und in geordneter Sequenz an die Hauptlinie geliefert (Roscher 2008). Zur Planung von Laufwegen und Arbeitsinhalten wird das Fahrzeug auf der Hauptlinie in ein Raster von Anbauorten, die sogenannten Karosserieansprachen, untergliedert (Motzer 2015). Die Hauptlinie ist in drei entkoppelte Abschnitte unterteilt: Der erste Abschnitt wird als Trim oder Inneneinbau bezeichnet. Hierbei werden die Interieurumfänge des Fahrzeuges, wie beispielsweise Scheiben oder das Cockpit, montiert. In der nachfolgenden Montage des Fahrwerks findet das Fügen der Karosserie mit dem vorbereiteten Unterboden und Antriebsstrang statt. (Roscher 2008) Dieser Prozessschritt wird auch als Hochzeit bezeichnet (Braess & Seiffert 2013). Der abschließende Bereich der Fahrzeugmontage wird als Fertigmontage oder Endmontage bezeichnet, wobei zusätzlich zur Komplettierung der Montageumfänge auch die Medienbefüllung sowie der anschließende Erststart des Fahrzeugs stattfinden. Nach Beendigung der Montage wird das assemblierte Fahrzeug an die abschließenden Qualitätsstationen, respektive den Nacharbeitsbereich transportiert. (Kropik 2009; Wedeniowski 2015)

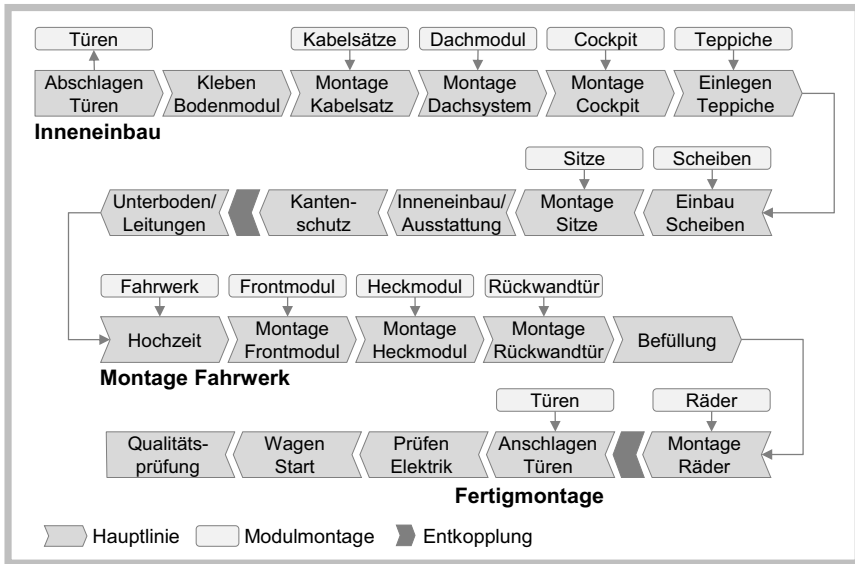


Abbildung 2.3: Exemplarischer Prozess der Automobilmontage (in Anlehnung an Roscher (2008))

2.1.4 Fließbandabstimmung variantenreicher Montagelinien

Nachdem der typische Montageprozess der Automobilfabrik beschrieben ist, wird die Planungsaufgabe der Fließbandabstimmung zunächst abgegrenzt und in den Planungsprozess der Variantenfließfertigung eingeordnet. Weiterhin werden die Wechselwirkungen mit weiteren Planungsaufgaben erläutert sowie die Bestandteile der Fließbandabstimmung beschrieben.

2.1.4.1 Einordnung in den Planungsprozess

Das Planungsproblem variantenreicher Montagelinien weist einen hohen Komplexitätsgrad auf, sodass eine Zerlegung in interdependente Teilprobleme angestrebt wird (Schneeweiß & Söhner 2013), die zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Planungshorizont zu bearbeiten sind (Domschke, Scholl & Voß 1997). So erfordert beispielsweise die Einstellung von Montagemitarbeitern einen längeren zeitlichen Vorlauf als deren Schichtzuordnung. Die zeitliche Fristigkeit stellt daher eine häufig angewandte Dimension zur Klassifizierung der Teilprobleme dar. Aufgrund der Fokussierung auf die Fließ-

bandabstimmung sowie der hiermit verknüpften Teilprobleme, wird der Planungsprozess variantenreicher Fließmontagelinien nachfolgend anhand der Strukturierung nach Boysen (2005) beschrieben¹ und in Abbildung 2.4 dargestellt.

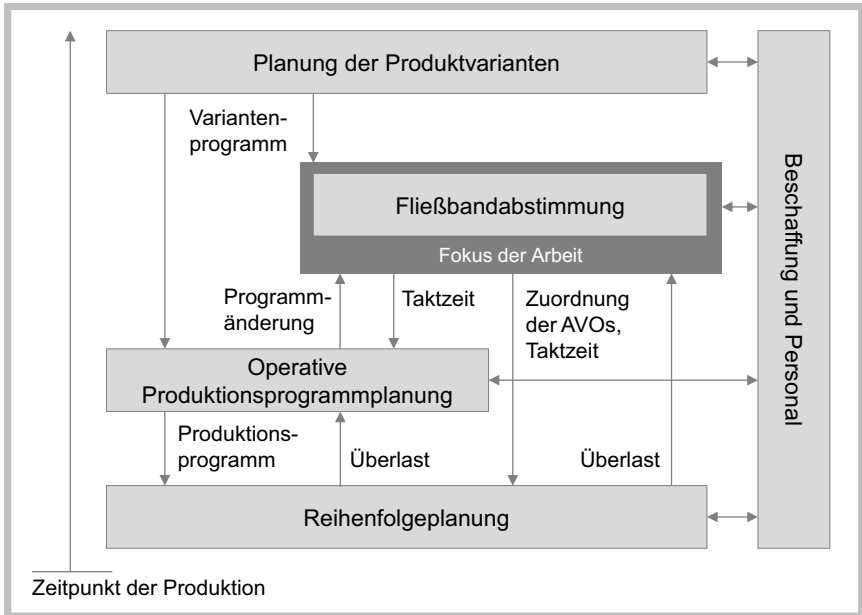


Abbildung 2.4: Planungssystem der Variantenfließfertigung (in Anlehnung an Boysen (2005))

Im ersten Schritt, der Planung der Produktvarianten, gilt es auf Grundlage der möglichen Ausstattungsoptionen die zu produzierenden Varianten festzulegen. Hinsichtlich der Bildung von Fahrzeugvarianten (vgl. Kapitel 2.1.2.3) können hier unter anderem unterschiedliche Motoren, Rechts- und Linkslenker oder Klimasysteme genannt werden (Meißner 2009).

Die nachfolgende Fließbandabstimmung entscheidet über die Konfiguration der Variantenfließmontagelinie und steht im Fokus der vorliegenden Arbeit. Hierbei werden alle Montageumfänge mit geeigneten Betriebsmitteln verknüpft und den Stationen des

¹ Ein Überblick weiterer Klassifizierungen der Teilprobleme findet sich unter anderem in Pröpster (2016) und Medo (2010).

Fließmontagesystems zugeordnet (Boysen 2005). Gilt es Veränderungen im Variantenmix vorzunehmen, ist die Fließbandabstimmung zu prüfen und gegebenenfalls für die entsprechenden Programmänderungen erneut durchzuführen (Scholl 1999). Der hieraus resultierende Rekonfigurationsaufwand wird in der vorliegenden Arbeit durch die Gestaltung veränderungsfähiger Fließbandabstimmungen adressiert.

Im Rahmen der operativen Produktionsprogrammplanung werden die Art und Menge der herzustellenden Produkte für die betreffende Planungsperiode bestimmt (Schneider, Buzacott & Rücker 2005). Durch die in der Fließbandabstimmung festgelegte Taktzeit ist die Produktionsmenge der Planungsperiode bei konstanter Nutzung determiniert, wodurch der Freiheitsgrad der operativen Produktionsprogrammplanung eingeschränkt ist (Boysen 2005).

Das Produktionsprogramm sowie die Stationskonfiguration und Taktzeit bilden die Eingangsgrößen der Reihenfolgeplanung (Merengo, Nava & Pozzetti 1999). In diesem Planungsschritt wird eine optimale Abfolge der zu montierenden Produkte fokussiert, wobei sich das Optimalitätskriterium² häufig auf die Minimierung der Taktzeitüberschreitung einer Station bezieht (März et al. 2010), die durch geeignete Maßnahmen (vgl. Kapitel 2.1.4.3) zu kompensieren ist.

Die Beschaffung von Betriebsmitteln und Material sowie die Personalplanung stellen weitere Teilprobleme der Planung dar, die jedoch kaum von den Eigenheiten der Variantenfließmontage betroffen sind. An dieser Stelle sei daher auf weiterführende Literatur verwiesen.³

2.1.4.2 Ablauf der Fließbandabstimmung

Der Begriff der Fließbandabstimmung wird in der Literatur nicht einheitlich verwendet. Neben der Bezeichnung als Fließbandabstimmung (Boysen 2005; Dörmer 2013) wird die Planungsaufgabe synonym auch als Austaktung (Pröpster 2016; Roscher 2008), Abtaktung (Kropik 2009; Dangelmaier 2017), Bandabgleich (Gehring & Schütz 1994; Schneeweiß & Söhner 2013), Leistungsabgleich (Hahn 1972; Swist 2014), Leistungsabstimmung (Kratzsch 2000; Deuse & Busch 2012) oder Kapazitätsabstimmung (Alte-

² Eine Übersicht weiterer Optimalitätskriterien findet sich in Boysen, Fliedner & Scholl (2009b).

³ Vorgehensbeschreibungen zur Beschaffung von Betriebsmitteln und Material finden sich unter anderem bei Hahn & Kaufmann (2013) und Hansmann (2006). Vertiefende Ausführungen zur Personalplanung liefern unter anderem Holtbrügge & Puck (2005) und Krüger (2004).

meier 2009; Krüger 2004) bezeichnet. In der englischsprachigen Literatur wird hingegen hauptsächlich der Begriff Line Balancing (Thomopoulos 1970; Battaïa & Dolgui 2013) verwendet. Nach der Einordnung des Planungsproblems sowie der Beschreibung der Wechselwirkungen werden nun die einzelnen Schritte zur Fließbandabstimmung in Anlehnung an Kuhn (2013) beschrieben. Dies sind die vorbereitende Arbeitsanalyse, die Fließbandabstimmung selbst sowie die nachfolgende Ausgestaltung.

Arbeitsanalyse

Die Arbeitsanalyse beinhaltet die Erzeugung und Aufbereitung der zur Fließbandabstimmung notwendigen Daten. Dies umfasst die variantenspezifische Zerlegung der gesamten Montageaufgabe in Arbeitsvorgänge sowie die Bestimmung der resultierenden Bearbeitungszeit je Arbeitsvorgang. Zur Bestimmung der Bearbeitungszeiten kann auf Methoden wie bspw. die Zeitermittlung nach REFA⁴ (REFA 1992) oder das Methods-Time Measurement (MTM) (Bokranz & Landau 2006) zurückgegriffen werden. Weiterhin sind die Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen der einzelnen Arbeitsvorgänge zu bestimmen. Diese beschreiben die Notwendigkeit einen Arbeitsvorgang abzuschließen (bspw. „Fläche reinigen“), bevor ein weiterer (bspw. „Kleber aufbringen“) begonnen werden kann. Dies ist besonders bei der Montage von Varianten von Bedeutung, da variantenspezifische Unterschiede der Reihenfolgerestriktionen in der Fließbandabstimmung zu berücksichtigen sind. (Roscher 2008)

Ein Montagevorranggraph beschreibt eine graphentheoretische Form von Reihenfolgerestriktionen und ist beispielhaft in Abbildung 2.5 dargestellt (Scholl 1999; Wiesbeck 2014). Diese verwendet einen Digraph, in dem Arbeitsvorgänge i durch einen Knoten und Vorrangsbeziehungen der Vorgänger VG_i durch Pfeile abgebildet werden. Ebenso wird im Vorranggraph die Bearbeitungszeit eines Arbeitsvorgangs t_i dargestellt. Eine wesentliche Voraussetzung, um die Arbeitsvorgänge in eine lineare Abfolge zu bringen, besteht in der Zyklusfreiheit⁵ der Vorrangbeziehungen. Es ist daher auszuschließen, dass ein Arbeitsvorgang i Nachfolger und zugleich Vorgänger eines von i verschiedenen Arbeitsvorgangs ist. (Ahmadi & Wurgaft 1994)

⁴ Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (früher: Reichsausschuß für Arbeitszeitermittlung)

⁵ Für Ansätze zur Auflösung bestehender Zyklen sei auf Ahmadi & Wurgaft (1994) sowie van Zante-de Fokkert, J. I. & Kok (1997) verwiesen.

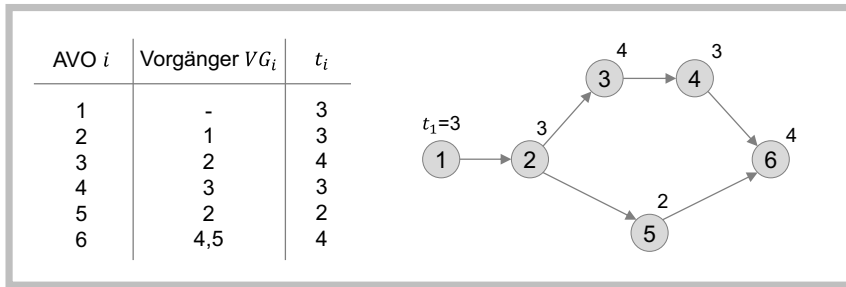


Abbildung 2.5: Beispielhafter Montagevorranggraph (in Anlehnung an Scholl (1999) und Wiesbeck (2014))

Ist die Fließbandabstimmung für mehrere Varianten vorzunehmen, so gilt es die variantenspezifischen Vorranggraphen zu einem Mischgraphen zu vereinigen (Decker 2013). Hierzu sind die Knoten- und Pfeilmenge des Mischgraphen zu bestimmen sowie die knotenspezifische Bearbeitungszeit festzulegen (Thomopoulos 1970). Da unterschiedliche Varianten, bspw. aufgrund zusätzlicher Montageumfänge, unterschiedliche Bearbeitungszeiten hinsichtlich desselben Arbeitsvorgangs erfordern können, gilt es eine hierfür repräsentative Bearbeitungszeit zu bestimmen (Becker & Scholl 2006). Typische Auslegungen zur Bestimmung dieser Bearbeitungszeit werden nachfolgend im Zusammenhang mit ihren Auswirkungen auf die Taktzeiteinhaltung erläutert.

Fließbandabstimmung

Die Aufgabe der Fließbandabstimmung liegt in der Zuordnung aller Arbeitsvorgänge zu Stationen unter Berücksichtigung des Montagevorranggraphen sowie gegebenenfalls weiterer Restriktionen, wobei unterschiedliche Zielstellungen verfolgt werden können. Grundlegende Zielstellungen bilden die Minimierung der Stationsanzahl bei gegebener Taktzeit, die Minimierung der Taktzeit bei gegebener Stationsanzahl sowie Mischformen (vgl. Kapitel 2.3.5). In der vorliegenden Arbeit stellt die Taktzeit eine Eingangsgröße des Planungsproblems dar. Sie beschreibt in getakteten Fließmontagelinien die Zeit, die zur Durchführung der einer Station zugeordneten Arbeitsvorgänge zur Verfügung steht (vgl. Kapitel 2.1.2.2) und gibt damit auch den zeitlichen Abstand der Einlassung und Fertigstellung von Produkten vor (Weiß 2000).

Wird durch Aufsummieren der Bearbeitungszeiten der einer Station zugeordneten Arbeitsvorgänge die Taktzeit überschritten, so wird dies als Überlast (Scholl 1999; Boysen

2005) oder Überlastung (Gottschalk 2006) bezeichnet. Die Unterschreitung der verfügbaren Taktzeit wird hingegen als Leerzeit (Pröpster 2016) oder Austaktungsverlust (Grundig 2014) bezeichnet. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Begriffe **Überlast** und **Leerzeit** verwendet. Wird die Fließbandabstimmung für eine einzelne Variante vorgenommen, so sind die Bearbeitungszeiten jedes Arbeitsvorgangs eindeutig bestimmt. Dadurch kann bei gegebener Taktzeit das Entstehen von Überlast ausgeschlossen werden. Erfolgt die Fließbandabstimmung jedoch auf Basis eines Mischgraphen, so stellt die hierbei ermittelte Bearbeitungszeit eine Repräsentanz der variantenspezifischen Bearbeitungszeiten dar. (Scholl 1999)

Zur Bildung dieser **repräsentativen Bearbeitungszeit** werden zwei typische Ansätze unterschieden: die Ermittlung der Durchschnittsvariante oder der Maximalvariante (Becker & Scholl 2006). Die Anwendung der Durchschnittsvariante bezeichnet die Auslegung des Fließmontagesystems auf eine imaginäre Variante, die alle Arbeitsvorgänge durchläuft. Hinsichtlich der Bearbeitungszeit der Arbeitsvorgänge werden die variantenspezifischen Bearbeitungszeiten mit der jeweiligen Verbraurate gewichtet (Thomopoulos 1970; Domschke, Scholl & Voß 1997), die den Anteil einer Variante am gesamten Auftragsvolumen beschreibt (Altmeier 2009). Die Auslegung auf die Durchschnittsvariante führt zum Zeitpunkt der Montage variantenspezifisch zu einer positiven oder negativen Abweichung von der repräsentativen Bearbeitungszeit, wodurch eine stationsbezogene Überlast oder Leerzeit entstehen kann (Boysen, Flidner & Scholl 2007). Eine exakte Bestimmung der Überlast kann somit erst nach der Reihenfolgeplanung erfolgen (Boysen 2005). Die Auslegung auf die Maximalvariante bedeutet, dass arbeitsvorgangsspezifisch die längste Bearbeitungszeit als repräsentative Bearbeitungszeit gewählt wird. Somit kann die Entstehung von Überlast auf Kosten einer durchschnittlich höheren Leerzeit ausgeschlossen werden. (Altmeier 2009) In Abbildung 2.6 wird dies dadurch ersichtlich, dass ceteris paribus eine höhere Taktzeit C bei Auslegung auf den Maximaltyp erforderlich ist, wodurch hinsichtlich der Variante V_0 , als gewichteter Durchschnitt der Varianten V_1 und V_2 und somit der repräsentativen Bearbeitungszeit, eine Leerzeit entsteht. Hierbei ist zu beachten, dass dieser Effekt mit einer Vergrößerung der **Zeitspreizung**, also der Differenz der maximalen und minimalen Bearbeitungszeit (Gans 2009) eines Arbeitsvorgangs, zunimmt. Aufgrund der vergleichsweise hohen Effizienzverluste wird die Auslegung basierend auf der Maximalvariante vor allem bei Produkten mit geringer Zeitspreizung angewendet (Altmeier 2009). Hinsicht-

lich der vorliegenden Arbeit wird daher die Auslegung nach der Maximalvariante abgelehnt. Um das Potential geringer Leerzeiten zu erschließen, wird ein überlastorientierter Ansatz entwickelt, der auf der Grundannahme einer Durchschnittsvariante aufbaut.

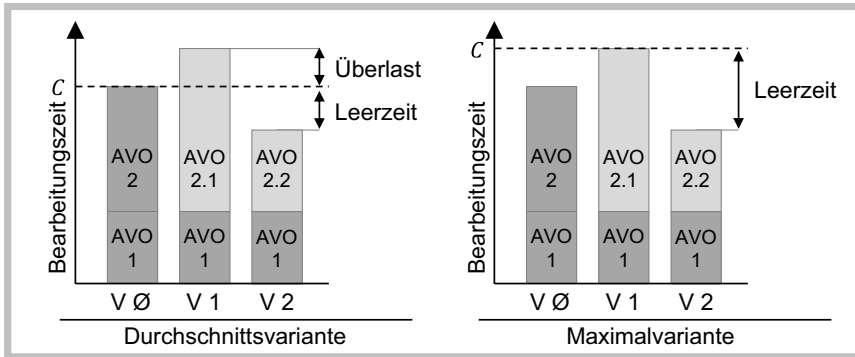


Abbildung 2.6: Ansätze zur Auslegung der repräsentativen Bearbeitungszeit bei der Bildung von Mischgraphen (in Anlehnung an Pröpster (2016) und Altemeier (2009))

Der auf die Durchschnittsvariante ausgerichtete Variantenmix ist den Schwankungen der Kundennachfrage unterworfen, woraus Veränderungen der durchschnittlichen Auslastung von Stationen resultieren können (Pröpster 2016; Pröpster & Reinhart 2013). Hiervon sind insbesondere Stationen mit einer hohen Zeitspreizung betroffen (Dombrowski & Medo 2006). In Abbildung 2.7 wird dieser Zusammenhang durch ein Beispiel verdeutlicht: Der Variantenmix eines Monats setzt sich zu den Zeitpunkten τ_1 und τ_2 aus unterschiedlichen Anteilen der Varianten A, B und C zusammen, woraus sich eine Veränderung der durchschnittlichen Bearbeitungszeiten an den Stationen 1, 2, 3 und 4 ergibt.

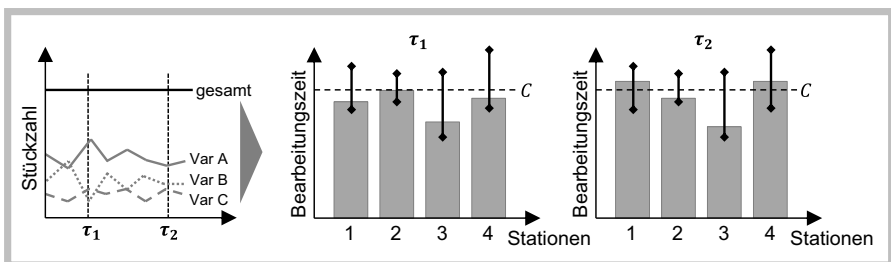


Abbildung 2.7: Einfluss von Schwankungen im Variantenmix auf die Auslastung von Montagestationen (in Anlehnung an Pröpster (2016) und Pröpster & Reinhart (2013))

Ausgestaltung

Nach Kuhn (2013) erfolgt abschließend die Ausgestaltung des Montagesystems, worunter unter anderem die Art des Transportsystems sowie die Dimensionierung von Puffern verstanden werden. Die Festlegung dieser Elemente steht nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit und wird daher nachfolgend nicht weiter betrachtet. Boysen (2005) bezieht die Ausgestaltungsphase verstärkt auf die Finalisierung der Fließbandabstimmung. Nachdem die Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Stationen erfolgt ist, gilt es nachfolgend auch eine stationsinterne Abfolge der Arbeitsvorgänge festzulegen. Analog zur Fließbandabstimmung ist auch hier auf die Einhaltung der Vorrangbeziehungen zu achten. (Boysen 2005)

2.1.4.3 Überlastausgleich

Erfolgt die Auslegung der repräsentativen Bearbeitungszeit nach der Durchschnittsvariante (vgl. Kapitel 2.1.4.2), so erzeugt die Montage von Varianten mit einer Bearbeitungszeit größer der Taktzeit (vgl. Variante 1 in Abbildung 2.6) eine Überlast an der entsprechenden Station. Diese Überlast gilt es im Montageprozess aufzulösen, wozu in der Literatur die Ansätze der offenen Stationsgrenzen, der dynamischen Kapazitätserweiterung durch Unterstützer sowie des Bandstopps beschrieben werden. Diese Ansätze werden nachfolgend vorgestellt.

Offene Stationsgrenzen

Ein Ansatz zur Reduktion von Überlast ist das Öffnen der Stationsgrenzen, wodurch die Bearbeitung des Montageobjekts außerhalb der Stationsgrenzen ermöglicht wird und somit die zur Verfügung stehende Bearbeitungszeit einer Station über die Taktzeit hinaus erhöht werden kann. Dieser Vorgang wird als **Driften** bezeichnet. (Gans 2009; Hu et al. 2011; Franz 2014) Die Stationsgrenzen können sowohl zur vorgelagerten („linker Driftbereich“) als auch zur nachgelagerten Station („rechter Driftbereich“)⁶ geöffnet werden und somit eine Bearbeitung des Montageobjekts bereits vor bzw. nach der eigentlichen Stationsgrenze ermöglichen (Altemeier 2009). Den Vorteilen des Driftens stehen mehrere Einschränkungen gegenüber: So ist es zu verhindern, dass sich Werker von vorherigen und nachfolgenden Stationen behindern. Ebenso ist zu beachten,

⁶ Der Driftbereich wird auch als Überlappungsbereich bezeichnet. Ebenso werden die Bezeichnungen Aufholbereich und Abschwimmbereich verwendet. (Kratzsch 2000)

dass prozess-, ressourcen- und stationsbedingte Grenzen den Driftbereich einschränken. (Claus, Herrmann & Manitz 2015) Weiterhin ist die Überschreitung der Taktzeit durch Leerzeiten nachfolgender Montageobjekte zu kompensieren, da sich ein Werker im Falle nicht kompensierter Überlast immer weiter von der ihm zugeordneten Station entfernt. Die Reihenfolgebildung von Montageaufträgen ist daher so vorzunehmen, dass ein maximaler Drift nicht überschritten wird. (Gans 2009)

Dynamische Kapazitätserweiterung durch Unterstützer

Als Unterstützer (auch: Springer) wird ein nicht stationsgebundener Werker bezeichnet, der für die Auflösung von Überlast in Fließmontagesystemen verantwortlich ist. Dieser ist für mehrere Montageaufgaben qualifiziert und kann daher flexibel zur Fertigstellung von taktzeitüberschreitenden Montageumfängen eingesetzt werden (Bullinger & Lung 1994). Nach Altemeier (2009) können zwei organisatorische Arten der Kapazitätserweiterung durch Unterstützer unterschieden werden: Der reaktive sowie der präventive Unterstützereinsatz. Im Falle eines reaktiven Unterstützereinsatzes übernimmt der Unterstützer die durchzuführenden Montageumfänge nach dem Stationsende und schließt diese ab. Der dem Arbeitsplatz zugeordnete Werker beginnt parallel hierzu mit den Montageumfängen des nächsten Fahrzeuges. Im präventiven Einsatz wird der Unterstützer antizipativ einer Station zugewiesen, wenn die Bearbeitungsdauer der durchzuführenden Montageumfänge die Taktzeit überschreiten würde. Im Gegensatz zum reaktiven Einsatz übernimmt der Unterstützer entweder alle Montageumfänge des kritischen Fahrzeuges (Altemeier 2009) oder lediglich ausgewählte Montageumfänge (März, Mayrhofer & Sihn 2012), um Überlast präventiv zu vermeiden. Die Abstimmung der Variantenlinie berücksichtigt die Einhaltung der Taktzeit hinsichtlich der repräsentativen Bearbeitungsdauern der einzelnen Varianten. Im Mittel wird somit eine Einhaltung der Taktzeit ermöglicht, insofern der tatsächliche Variantenmix nicht durch zusätzliche Überlast vom geplanten Variantenmix abweicht. Durch einen präventiven Einsatz von Unterstützern wird die Möglichkeit ausgeschlossen, dass sich die Durchführung aller Montageumfänge ohne zusätzliche Kapazität durch eine ausgeglichene Abfolge der Fahrzeuge im Rahmen der Reihenfolgebildung erreichen lässt. Weiterhin kann die präventive Unterstützung Wartezeiten des Stationswerkers verursachen, falls der Unterstützer ein Fahrzeug vollständig übernimmt und der Stationswerker noch nicht mit dem nächsten Fahrzeug beginnen kann (Swist 2014).

Bandstopp

Das Anhalten des Montagebandes wird als Bandstopp bezeichnet (Dörmer 2013). Die Zeit, in der das Band gestoppt ist, gibt einem Werker die Möglichkeit, die Überlast an der ihm zugeordneten Station aufzulösen. Allerdings wälzt sich dieser Effekt auf alle Stationen der starr verketteten Linie ab, sodass Wartezeiten der Werker an Stationen entstehen, die keine oder eine geringere Überlast aufweisen (Swist 2014). Der Einsatz eines Bandstopps erscheint daher nur dann sinnvoll⁷, wenn alle verfügbaren Mittel der dynamischen Kapazitätserweiterung ausgeschöpft sind (Franz 2014).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Öffnung von Stationsgrenzen als effektive Maßnahme zur Reduktion von Überlast erscheint. Nach März, Pröpster & Röser (2012) stellt sich der Einsatz von Unterstützern dann als geeignet dar, wenn die Möglichkeiten der offenen Stationsgrenzen ausgeschöpft sind. Aufgrund der erwarteten hohen Kosten eines Bandstopps wird diese Art des Überlastausgleichs nicht präferiert.

2.2 Veränderungsfähigkeit

Dieses Kapitel befasst sich mit der Veränderung von Produktionssystemen. Hierzu werden die Veränderungsfähigkeit sowie ihre Ausprägungen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit beschrieben und als Instrumente zur erfolgreichen Anpassung von Fließmontagesystemen eingeführt.

2.2.1 Veränderung und Veränderungsfähigkeit

Westkämper et al. (2000) beschreiben eine Veränderung in einer allgemeinen Form als den Wechsel einer Merkmalsausprägung eines Veränderungsobjekts im Vergleich zu einem früheren Zeitpunkt, wobei der Wechsel an einem definierten Veränderungsort stattfindet. In der Literatur, die sich mit der industriellen Produktion beschäftigt, wird anstelle von „Veränderung“ oder „verändern“ auch von „Wandel“ oder „wandeln“ gesprochen (Westkämper & Zahn 2009; Schenk, Wirth & Müller 2014).

Die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen ist unter anderem davon geprägt, wie effektiv sich ein Produktionssystem an veränderte Umweltbedingungen anpassen kann

⁷ Die Kosten eines Bandstopps sind aufgrund der heterogenen Ausgestaltung von Fließmontagesystemen in der Automobilindustrie nicht einheitlich zu bestimmen. Ormeci, Dai & Vate (2008) gehen davon aus, dass diese Kosten von \$1000 pro Minute übersteigen können.

(Volberda 1996; ElMaraghy 2009; Westkämper & Zahn 2009), wozu die Eigenschaft der **Veränderungsfähigkeit** einen wesentlichen Befähiger darstellt (Kaluzka & Behrens 2005). Der Begriff der Veränderungsfähigkeit ist in der Literatur nicht einheitlich definiert⁸. Das Grundverständnis ist dabei die Fähigkeit eines Systems, Veränderungsprozesse erfolgreich durchzuführen (Glaser, Schröder & Werder 1998; Wiendahl & Hernández 2002).

2.2.2 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit

Die Veränderungsfähigkeit fasst die Eigenschaften Flexibilität und Wandlungsfähigkeit zusammen (Kaluzka & Behrens 2005)⁹. In der vorliegenden Arbeit werden diese Eigenschaften auf das System der Variantenfließmontage angewendet, um bestehende Unsicherheiten der Umwelt bereits in der Planung zu berücksichtigen. Abbildung 2.8 veranschaulicht die Abgrenzung der Begriffe Flexibilität und Wandlungsfähigkeit anhand bestimmter Veränderungsdimensionen wie Stückzahl, Varianten, Kosten, Lieferzeit oder Prozessqualität (Wiendahl, Reichardt & Nyhuis 2014). Ein Veränderungsimpuls bezüglich einer Dimension wird, je nach Ausprägung, durch die Flexibilität oder Wandlungsfähigkeit des Systems aufgegriffen. Das Ausmaß des Veränderungsimpulses, das durch vorhandene Flexibilität aufgenommen werden kann, ist durch einen Flexibilitätskorridor gekennzeichnet (Nyhuis 2010). Alle Auswirkungen von Veränderungsimpulsen, die innerhalb des Flexibilitätskorridors verortet sind, lassen sich durch die systeminhärente Flexibilität in kurzer Zeit, mit wenig Aufwand (Abele, Liebeck & Wörn 2007) und ohne einen Umbau des Systems durchführen (Nyhuis 2010). Nach Stricker (2016) charakterisiert ein somit ermöglichtes stabiles Systemverhalten unter veränderter Systemumwelt ein robustes Produktionssystem. Die Entscheidung der Lage und Spannweite eines Flexibilitätskorridors wird bereits mit der Planung und Konstruktion des Systems determiniert (Zäh, Möller & Vogl 2005). Hinsichtlich der Dimensionierung von Flexibilitätskorridoren ist zu beachten, dass sowohl eine Unter- als auch Überdimensionierung zu negativen Effekten in Form unzureichender Veränderungsfähigkeit bzw.

⁸ Wiendahl (2002) verwendet zur englischen Übersetzung von „Veränderungsfähigkeit“ den Begriff „changeability“. Diesen Begriff nutzen andere Autoren wie Schuh, Wemhöner & Kampker (2004) oder Zäh et al. (2004) zur Übersetzung von „Wandlungsfähigkeit“. Im Englischen werden veränderungsfähige Produktionssysteme auch als „reconfigurable manufacturing systems“ (RMS) bezeichnet (Koren et al. 1999; ElMaraghy 2005).

⁹ Die Begriffe Flexibilität und Wandlungsfähigkeit werden ebenso verwendet um die Veränderungsfähigkeit hinsichtlich der Marktleistungs- sowie Produktionssystemebene zu klassifizieren. Diese Verwendung der Begriffe steht nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit. Für weitere Informationen hierzu sei auf Anhang A.1 verwiesen.

unnötiger Investitionen führen kann (Bertsch & Nyhuis 2012). Erzeugt ein Veränderungsimpuls Anforderungen, die außerhalb des definierten Flexibilitätskorridors liegen, so ist ein Wandel des Systems vorzunehmen. Der hierfür vorgedachte Lösungsraum wird als Wandlungskorridor bezeichnet (Nyhuis 2010) und durch die proaktive Planung potenzieller Wandlungsmaßnahmen ausgestaltet. Durch die Anwendung dieser Maßnahmen kann ein neuer Flexibilitätskorridor erreicht werden, wobei sich der Wandlungskorridor aus der Summe der erreichbaren Flexibilitätskorridore ergibt (Bertsch & Nyhuis 2012).

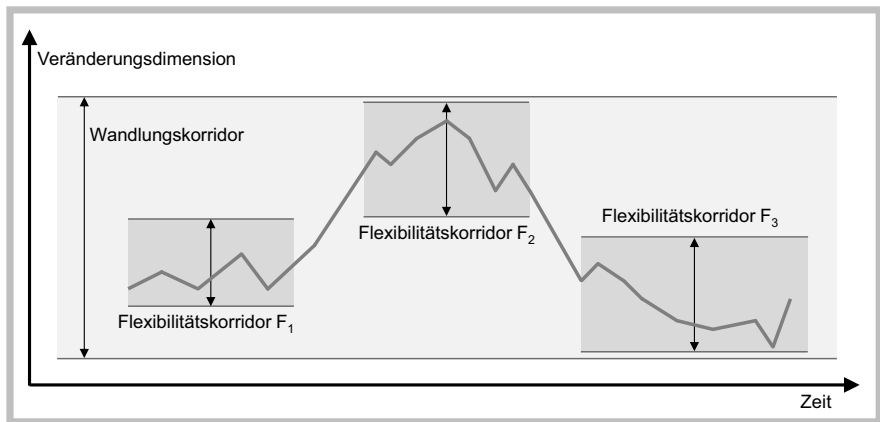


Abbildung 2.8: Abgrenzung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit (in Anlehnung an Wiendahl, Reichardt & Nyhuis (2014); Nyhuis (2010) und Zäh, Möller & Vogl (2005))

2.2.2.1 Flexibilität

Der Begriff der Flexibilität ist in der Produktionstechnik weit verbreitet. Bereits im Jahr 1990 konnten Sethi & Sethi (1990) über 50 verschiedene Benennungen unterschiedlicher Arten von Flexibilität in produktionstechnischer Literatur identifizieren. Im Rahmen einer Literaturstudie konstatieren Toni & Tonchia (1998), dass zwischen einer statischen und dynamischen Flexibilität zu unterscheiden ist. Erstere beschreibt die Fähigkeit, trotz veränderter Einflüsse stabil zu operieren, wohingegen Letztere die kurzfristige, reaktive Veränderung des Systemzustands zu geringen Kosten beschreibt. Eine einheitliche Zielstellung in der Anwendung von Flexibilität besteht in der Bewältigung unterschiedlicher Arten von Unsicherheit wie bspw. der Anlagenverfügbarkeit (Gerwin 1993). Im Einklang hiermit beschreiben Westkämper et al. (2000) ein System als flexibel, „[...] wenn es im Rahmen eines prinzipiell vorgedachten Umfangs von Merkmalen

sowie deren Ausprägungen an veränderte Gegebenheiten reversibel anpassbar ist“. Weitere Definitionen der Flexibilität betonen unterschiedliche Aspekte wie die Anpassbarkeit an unterschiedliche Arten von Veränderungen (Heger 2007) sowie die hohe Geschwindigkeit und geringe Kosten der Anpassung (Heinen, Rimpau & Wörn 2008). Der Grundgedanke einer strukturell beschränkten, reversiblen Anpassbarkeit eines Systems an sich verändernde Anforderungen wird von zahlreichen Autoren geteilt (Jansen 1997; Damisch 2013; Jacob 1990).

Nachdem die Einführung in den Flexibilitätsbegriff im Kontext der Veränderungsfähigkeit erfolgt ist, gilt es diesen hinsichtlich seiner unterschiedlichen Ausprägungen zu beschreiben. Angesichts der Vielzahl an Klassifikationsschemata von Flexibilität (u.a. nach Sethi & Sethi (1990) oder Koste & Malhotra (1999)) werden hier ausschließlich die montage- und arbeitsrelevanten Flexibilitätsarten unterschieden (Tidd 1997):

- **Volumenflexibilität:** Die Volumenflexibilität beschreibt die Eigenschaft eines Produktionssystems, bei unterschiedlichen Produktionsvolumina wirtschaftlich zu produzieren (Abele, Liebeck & Wörn 2007) und wird auch als Stückzahlflexibilität (Glaser, Schröder & Werder 1998) oder Mengenflexibilität (REFA 1990) bezeichnet.
- **Variantenmixflexibilität:** Die Variantenmixflexibilität ist von der Variantenflexibilität abzugrenzen, die die Fähigkeit beschreibt, verschiedene Varianten produzieren zu können (Narain et al. 2000). Unter dem Begriff der Variantenmixflexibilität wird hingegen die Fähigkeit verstanden das Variantenmixverhältnis zu variieren, ohne Beeinträchtigungen des Produktionsgewinns zu verursachen (Rogalski 2009). Anstelle von Varianten wird die Mixflexibilität auch auf herzustellende Produkte bezogen (Roscher 2008).
- **Routenflexibilität:** Als Routenflexibilität wird das Vorliegen unterschiedlicher Ausführungsmöglichkeiten eines Auftrags bezeichnet (Leisten & Krcal 2013). Hiermit verbunden ist die Zuweisung von Arbeitsvorgängen zu einer möglichst großen Anzahl an Maschinen (Bossert 2013).
- **Nachfolgeflexibilität:** Die Nachfolgeflexibilität beschreibt die Fähigkeit, das bestehende Produktionssystem für folgende Produkte unter minimalem Änderungsaufwand zu nutzen und somit Investitionen zu vermeiden (Kampker 2014).

Die Ausbringungsmenge einer Fließmontagelinie ist durch die Taktzeit determiniert (vgl. Kapitel 2.1.4.1), die in der Automobilmontage für eine Planungsperiode auf einem

unveränderten Niveau verharrt (Klug 2010). Anpassungen der Ausbringungsmenge werden typischerweise durch die Anpassungen des Schichtmodells realisiert (Wittek 2013), weshalb eine Volumenflexibilität der Fließbandabstimmung nicht betrachtet wird. Die Berücksichtigung von Schwankungen im Variantenmix steht im Zentrum der vorliegenden Planungsmethode, weshalb die Variantenmixflexibilität nachfolgend fokussiert wird. Eine Definition des Begriffs im Kontext der Arbeit wird in Kapitel 5.1.3.1 vorgenommen. Die Betrachtung der Routenflexibilität erweist sich in der Arbeit als ungeeignet, da sich das Planungsvorgehen auf eine Fließmontagelinie beschränkt und somit keine alternativen Montagerouten möglich sind. Der Begriff der Nachfolgeflexibilität bezieht sich auf Nachfolger des aktuellen Produkts, was im Kontext der vorliegenden Arbeit einer Integration oder Desintegration von Varianten entspricht. Diese Art der Veränderung wird durch das Konzept der Wandlungsfähigkeit adressiert.

2.2.2.2 Wandlungsfähigkeit

Im Gegensatz zu flexiblen Systemen sind wandlungsfähige Systeme dazu in der Lage, ihre Struktur zu verändern (Zäh, Möller & Vogl 2005). Nach Westkämper et al. (2000) wird ein System als wandlungsfähig bezeichnet, „[...] wenn seine räumliche Strukturierung sowie sein Verhaltensspektrum aufgrund einer Anpassung des Umfangs an Merkmale sowie deren Ausprägungen auch an zunächst unbekannte Gegebenheiten veränderbar sind“. Diese Anpassungen können sowohl reaktiv als auch antizipativ erfolgen. Hierzu ergänzt Wiendahl (2002), dass Veränderungen in wandlungsfähigen Fabriken dadurch gekennzeichnet sind, dass sie unter geringem Aufwand durchführbar sind. Reinhart & Zäh (2008) betonen den Aspekt der Unsicherheit, indem sie feststellen, dass Wandlungsfähigkeit „[...] eine schnelle, kostengünstige Anpassung des Systems auch an unvorhergesehene interne oder externe Veränderungen in Bezug auf Technik und Organisation“ ermöglicht.

Wandlungsbefähiger stellen individuelle und aktivierbare Eigenschaften eines Objektes dar (bspw. Austauschbarkeit von Modulen einer Montagestation), die ein Produktionssystem zu einem Wandel befähigen (Hernández Morales 2003). In der Literatur findet sich eine Vielzahl an Wandlungsbefähigern (Hernández Morales 2003; Koren 2005; Heger 2007), wobei Wiendahl et al. (2007) diese und weitere Wandlungsbefähiger den Ebenen der Teilefertigung, Montage, Fabrik, Prozessplanung sowie Produktionsplanung und Steuerung zuordnen. Hinsichtlich der Montageebene wird nach Wiendahl et al. (2007) folgenden Wandlungsbefähigern eine Schlüsselrolle zugewiesen:

- **Anpassbarkeit:** Der Begriff der Anpassbarkeit beschreibt die Auslegung eines Systems oder einer Maschine hinsichtlich einer ganzen Produktfamilie (Koren 2006).
- **Skalierbarkeit:** Die Fähigkeit zur Kapazitätsanpassung eines Systems durch Hinzufügen oder Entfernen von Ressourcen wird als Skalierbarkeit bezeichnet (Koren 2006; Wang & Koren 2012). Die skalierbare Automatisierung beschreibt speziell die Veränderung der Anteile manueller und automatisierter Arbeitsinhalte (Wiendahl et al. 2007).
- **Umrüstbarkeit:** Die Umrüstbarkeit bezieht sich sowohl auf Betriebsmittel im operativen Betrieb, die somit einen beschleunigten Wechsel des zu bearbeitenden Produkts ermöglicht (Koren 2006), als auch auf die Veränderung der Funktionalität von Betriebsmitteln und Systemen (Koren, Gu & Guo 2017).
- **Mobilität:** Die Mobilität von Objekten unterstützt ihre örtliche Beweglichkeit, sodass diese Eigenschaft die Verschiebung von Montagestationen, -modulen und -systemen erleichtert (Wiendahl et al. 2007).

Hinsichtlich der Wandlungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen steht insbesondere die Reallokation von Arbeitsvorgängen und infolgedessen die örtliche Verlagerung sowie die funktionale Anpassung von Betriebsmitteln im Fokus der Bewertung. Aus diesem Grund wird den Wandlungsbefähigern der Mobilität und Umrüstbarkeit eine besondere Bedeutung bezüglich der Wandlungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen beigemessen. Eine Definition der Wandlungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit findet sich in Kapitel 5.1.3.1.

2.2.3 Kosten der Veränderungsfähigkeit

In der Planung von Produktionssystemen können sowohl durch die Anwendung von Flexibilitäts- (Eppink 1978) als auch Wandlungsfähigkeitsmaßnahmen (Heger 2007) Kosten entstehen. So bietet beispielsweise eine numerisch gesteuerte Universalmaschine ein breiteres Bearbeitungsspektrum und somit eine höhere Produkt- bzw. Variantenflexibilität gegenüber einer Einzweckmaschine (Heisel et al. 2014), wobei jedoch von höheren Anschaffungskosten ausgegangen werden kann (Jacob 2013). Ebenso verursacht bspw. die Wandlungsfähigkeitsmaßnahme einen Flächenvorhalt zur späteren Nutzung zu bilden, Kosten hinsichtlich des gebundenen Kapitals (Denkena & Drabow 2005).

Die Beschreibung des Zeitpunktes der Kostenentstehung erfolgt anhand des Fabriklebenszyklus nach Heger (2007), der diesen in die Phasen Fabrikplanung, Fabrikumsetzung, Fabrikbetrieb und Fabrikrückbau aufgliedert und der in der vorliegenden Arbeit auf das Planungsobjekt der Fließmontage bezogen wird. Die Kosten zur Bereithaltung von Flexibilität können als Versicherungsprämie interpretiert werden, die im Bedarfsfall genutzt wird (Haller 1999). Sie werden daher den Phasen der Fabrikplanung und -umsetzung zugeschrieben, wobei die Rentabilität erst im Fabrikbetrieb ermittelt werden kann.

Die Kosten der Wandlungsfähigkeit setzen sich nach Wiendahl et al. (2002) aus dem Investment in bspw. Anlagen, den Wandlungskosten bei der Durchführung eines Wandels sowie den dabei entstehenden Produktionsverlusten zusammen. Heger (2007) greift diese Klassifizierung auf und erweitert sie u.a. um das Auftreten von Zusatzinvestitionen, wodurch sich die folgende Kostenstruktur ergibt:

- **Wandlungsobjektkosten:** Diesem Kostenfaktor werden Anfangs-, Erst- und Errichtungsinvestitionen sowie Ersatz- und Zusatzinvestitionen zugeordnet.
- **Wandlungsprozesskosten**
 - **Direkte Durchführungskosten:** Hierunter werden Kosten der Durchführung einer Veränderung wie bspw. Umbau, Installation oder auch Wiederherstellung der Prozessfähigkeit zusammengefasst.
 - **Indirekte Durchführungskosten:** Dieser Kostenfaktor entsteht durch die Durchführung und umfasst den entgangenen Gewinn durch den Ausfall der Produktion sowie die Kosten für Mehrarbeit und Bestand.

Alternativ zur Klassifizierung in Wandlungsobjekt- und Wandlungsprozesskosten verwenden weitere Autoren die Begriffe Initial- und Anpassungsinvestitionen (Schuh, Wemhöner & Kampker 2004), Anschaffungs- und Folgekosten (Sesterhenn 2003) oder Investitions- und Betriebskosten (Niemann & Westkämper 2004). Die Kosten der Wandlungsfähigkeit fallen demnach sowohl in den Phasen der Fabrikplanung und -umsetzung als auch in der Phase des Fabrikbetriebs an. Die Berücksichtigung des Zeitwerts von Kapital kann hierbei durch geeignete statische (u.a. Kostenvergleichsrechnung oder Gewinnvergleichsrechnung) oder dynamische Verfahren der Investitionsrechnung (u.a. Kapitalwertmethode oder Annuitätenmethode) erfolgen (A_Hellweg 2017)¹⁰.

¹⁰ Für weiterführende Literatur sei auf Kruschwitz (2014) und Götze (2014) verwiesen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Planung und Anwendung von Veränderungsfähigkeit, sowohl in ihrer Ausprägung als Flexibilität als auch als Wandlungsfähigkeit, mit der Entstehung von Kosten verbunden ist. Es gilt somit einen geeigneten Kompromiss aus Veränderungsfähigkeit und Kosten im Rahmen der Planung zu identifizieren. Aufgrund der unterschiedlichen Investitionsprofile ist hinsichtlich der Veränderungsfähigkeit auf ein angemessenes Verhältnis von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit zu achten (Heinen, Rimpau & Wörn 2008).

2.3 Methoden des Operations Research

In diesem Kapitel werden die Grundlagen multikriterieller Entscheidungsprobleme beschrieben sowie das Optimierungsproblem der Fließbandabstimmung vorgestellt.

2.3.1 Multikriterielle Entscheidungsprobleme

Der Begriff des Operations Research beschreibt „[...] die modellgestützte Vorbereitung von Entscheidungen zur Gestaltung und Lenkung von Mensch-Maschine-Systemen [...]“ (Müller-Merbach 1971). Die Entscheidungsunterstützung für Mehrzielsysteme stellt einen Teilbereich des Operations Research dar, dessen Methoden als MCDA-Methoden¹¹ bezeichnet werden (Greco, Figueira & Ehrgott 2005). Wie in Abbildung 2.9 ersichtlich, wird in diesem Teilbereich zwischen der Mehrzieloptimierung (MODM¹²) sowie dem multikriteriellen Auswahlproblem (MADM¹³) unterschieden. MODM-Methoden nutzen mathematische Verfahren, um aus einer durch Nebenbedingungen beschränkten Menge an Alternativen eine optimale Lösung zu ermitteln. Typische Verfahren sind die Vektoroptimierung (auch: multikriterielle Optimierung), die Zielprogrammierung oder Definition von Anspruchsniveaus. Im Gegensatz dazu vergleichen MADM-Methoden diskrete Alternativen anhand definierter Kriterien. Wie in Abbildung 2.9 dargestellt, werden die Verfahren in klassische Ansätze sowie Outranking-Ansätze eingeteilt. Das allgemeine Vorgehen der klassischen Ansätze besteht in der Bestimmung von Nutzwerten der Entscheidungsalternativen, wobei sich diese aus Teilnutzwerten zusammensetzen. Ein weit verbreiteter klassischer Ansatz ist hierbei das Verfahren der Nutzwertanalyse, in dem Nutzwerte beispielsweise auf einer Skala von 1-10 bestimmt werden.

¹¹ Akronym des englischen Begriffs „multi criteria decision analysis“

¹² Akronym des englischen Begriffs „multi objective decision making“

¹³ Akronym des englischen Begriffs „multi attribute decision making“

(Geldermann & Lerche 2014) Outranking-Verfahren basieren hingegen auf paarweisen Vergleichen sowie Präferenzfunktionen und ermöglichen somit die Entscheidungsfindung ohne Kenntnis der Nutzenfunktion. Typische Vertreter der Outranking-Verfahren sind PROMETHEE (Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations), ELECTRE (Elimination Et Choix Tradusaint la Réalité) und TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). (Huang, Keisler & Linkov 2011)

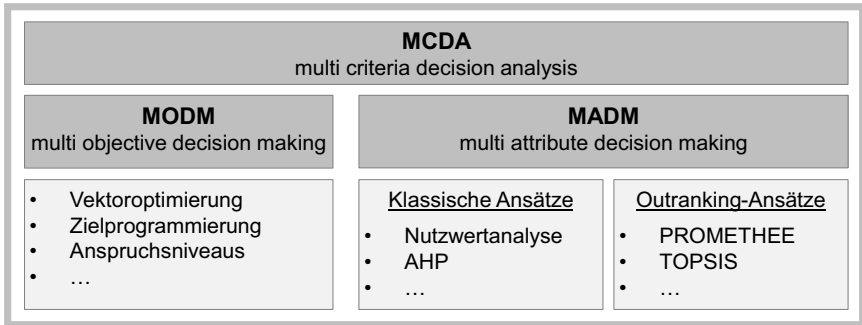


Abbildung 2.9: Schematische Klassifikation der MCDA-Methoden (in Anlehnung an Zimmermann & Gutsche (1991) und Geldermann & Lerche (2014))

2.3.2 Allgemeines Optimierungsproblem

Die Modellierung eines Optimierungsproblems folgt einem grundlegenden Aufbau. Dieser kann wie nachfolgend formuliert werden (Domschke et al. 2015):

Max. oder Min. einen Zielfunktionswert

$$z = F(\vec{x}) \quad (2.1)$$

Unter den Nebenbedingungen

$$g_i(\vec{x}) \begin{cases} \geq \\ = \\ \leq \end{cases} 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (2.2)$$

$$\vec{x} \in W_1 \times W_2 \times \dots \times W_n \quad W_j \in \{\mathbb{R}_+, \mathbb{Z}_+, \mathbb{B}\}, \forall j = 1, \dots, n \quad (2.3)$$

Die Zielstellung des Optimierungsmodells ist die Maximierung oder Minimierung des Zielfunktionswertes z der Zielfunktion $F(\vec{x})$ (siehe Formel 2.1) (Domschke et al. 2015). Der Vektor \vec{x} stellt dabei die zulässigen Lösungen dar, welche durch n Entscheidungsvariablen x_1, \dots, x_n beschrieben werden (Schwenkert & Stry 2015). Die Optimierung des

Zielfunktionswertes erfolgt unter Einhaltung von Nebenbedingungen in Formel 2.2 (auch: Restriktionen). Diese beschränken, wie auch die Wertebereiche der Entscheidungsvariablen W_j (siehe Formel 2.3), die Menge der zulässigen Lösungen und werden durch die Funktionen $g_i(\vec{x})$ repräsentiert (Klein & Scholl 2012).

2.3.3 Klassifikation von Problemstellungen

Je nach Problemstellungen ist eine spezifische Auslegung des allgemeinen Optimierungsmodells erforderlich. Daher wird nachfolgend eine Klassifizierung von Optimierungsmodellen in Anlehnung an (Domschke et al. 2015) vorgenommen und in Abbildung 2.10 tabellarisch zusammengefasst.

Informationsgrad	deterministisch	stochastisch		fuzzy
Linearität	linear		nicht-linear	
Zielkriterien	monokriteriell		multikriteriell	
Definitionsbereich	kontinuierlich	ganzzahlig		gemischt-ganzzahlig
Lösbarkeit	polynomial		exponentiell	

Abbildung 2.10: Klassifikation von Optimierungsmodellen (in Anlehnung an Domschke et al. (2015))

Der Informationsgrad beschreibt, mit welcher Sicherheit¹⁴ die Parameter des Optimierungsmodells vorliegen. Können die Parameter der Zielfunktion sowie der Nebenbedingungen als bekannt vorausgesetzt werden, so liegt ein deterministisches Modell vor (Klein & Scholl 2012). Liegt hingegen mindestens ein Parameter als Zufallszahl mit bekannten Wahrscheinlichkeiten vor, so wird das Modell als stochastischen Modell bezeichnet (Domschke et al. 2015). Können einem Parameter keine Wahrscheinlichkeiten seiner Ausprägung zugeordnet werden, so liegt Unschärfe vor und der Informationsgrad wird als fuzzy bezeichnet (Tang et al. 2004).

¹⁴ Eine Klassifikation der unterschiedlichen Arten von Sicherheit bzw. Unsicherheit findet sich bei Laux, Gillenkirch & Schenk-Mathes (2014).

Optimierungsmodelle können darüber hinaus hinsichtlich der vorliegenden Linearität der Zielfunktion sowie der Nebenbedingungen unterschieden werden. Ein Optimierungsproblem wird dann als linear bezeichnet wenn eine lineare Zielfunktion unter linearen Nebenbedingungen minimiert bzw. maximiert wird. Optimierungsprobleme, die Nichtlinearität in der Zielfunktion oder in mindestens einer Nebenbedingung aufweisen, werden als nichtlineare Optimierungsmodelle klassifiziert (Klein & Scholl 2012).

Besteht die Aufgabe eines Optimierungsproblems in der Minimierung oder Maximierung einzelner Zielkriterien, wird dies als monokriterielle Optimierung bezeichnet. Die simultane Betrachtung mehrerer Zielkriterien in MODM-Problemen wird hingegen als multikriterielle Optimierung (Deb 2001) oder Vektoroptimierung (Benker 2013) bezeichnet. Dabei können Ziele in komplementärer, konkurrierender oder neutraler Beziehung zueinander stehen (Domschke et al. 2015).

Der Definitionsbereich beschreibt, welche Werte die Entscheidungsvariablen eines Optimierungsproblems annehmen können. Können Entscheidungsvariablen unter Einhaltung aller Nebenbedingungen beliebige reelle Zahlen annehmen, so ist der Definitionsbereich kontinuierlich. Erfolgt eine Beschränkung der Entscheidungsvariablen auf ganzzahlige, natürliche oder binäre Werte, so wird der Definitionsbereich als ganzzahlig bezeichnet. Treten zusätzlich zu ganzzahligen auch kontinuierliche Variablen auf, gehören solche Optimierungsprobleme zur Klasse der gemischt-ganzzahligen Optimierung. (Nickel, Stein & Waldmann 2014)

Die Ausführung eines Algorithmus zur Lösung eines Optimierungsproblems benötigt einen gewissen Rechenaufwand zur Durchführung aller benötigten Rechenoperationen. Aussagen über diesen Aufwand und damit die Lösbarkeit beschreiben die Komplexität von Optimierungsproblemen. Ist die Funktion einer Problemgröße ein Polynom der Problemgröße, so bezeichnet man den Rechenaufwand als polynomial, da er mit ansteigender Problemgröße höchstens so stark wie das Polynom der Problemgröße ansteigt. Optimierungsprobleme, die auch im ungünstigsten Fall mit polynomialem Rechenaufwand gelöst werden können, werden der Klasse P zugeordnet. Kann kein Polynom identifiziert werden, so bezeichnet man den Rechenaufwand als exponentiell oder nicht-polynomial. Lassen sich für einen Typ von Optimierungsproblemen nur solche Algorithmen finden, so gehört dieser Typ zur Klasse der NP -schweren Probleme. (Domschke et al. 2015)

2.3.4 Lösungsverfahren im Überblick

Die Eignung eines Lösungsverfahrens ist von der jeweiligen Problemausprägung abhängig. In der vorliegenden Arbeit werden lineare, gemischt-ganzzahlige Probleme (MILP¹⁵) adressiert, weshalb nachfolgend ausschließlich auf ausgewählte, hierauf ausgerichtete exakte und heuristische Lösungsverfahren eingegangen wird¹⁶, die in Abbildung 2.11 zusammengefasst sind. Exakte Lösungsverfahren sind in der Lage, die Identifikation der optimalen Lösung in endlich vielen Schritten zu gewährleisten. Heuristische Verfahren erlauben es lediglich näherungsweise optimale Lösungen zu bestimmen, wobei diese jedoch Laufzeitvorteile bieten (Kallrath 2013; Domschke et al. 2015).

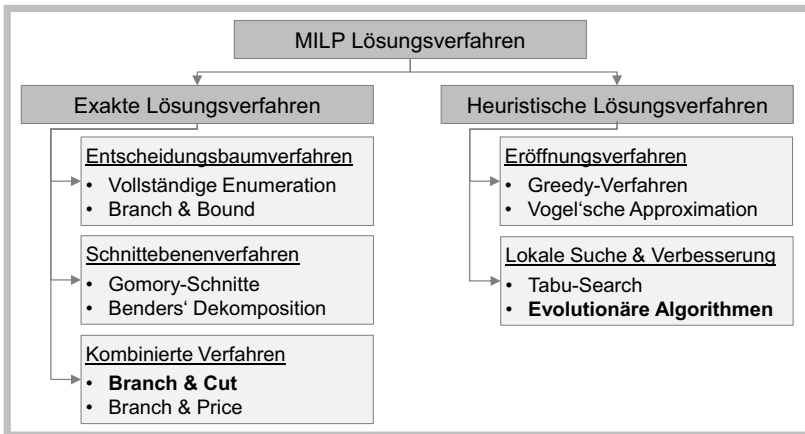


Abbildung 2.11: MILP-Lösungsverfahren mit Beispielen (in Anlehnung an Kallrath (2013) und Domschke et al. (2015))

Das Branch & Cut-Verfahren stellt eine Kombination aus dem Branch & Bound-Verfahren und der Schnittebenenverfahren dar. Basierend auf der Vorgehensweise des Branch & Bound-Verfahrens, den Lösungsraum in mehrere Äste zu zerteilen und durch Schranken suboptimale Bereiche auszuklammern, kann durch das Einbringen von Schnittebenen der Lösungsraum zusätzlich reduziert werden. Die Vorteile des Verfahrens liegen in der Kombination der hohen Konvergenzgeschwindigkeit (Branch & Bound) und gezielterer Lösungssuche (Schnittebenen) (Kallrath 2013).

¹⁵ Akronym des englischen Begriffs „mixed integer linear programming“

¹⁶ Weitere Lösungsverfahren finden sich in Stein (2018) (Nichtlineare Optimierung) und Zimmermann & Stache (2001) (Ganzzahlige Optimierung).

Evolutionäre Algorithmen übertragen die Prinzipien der biologischen Evolution auf die mathematische Optimierung, wobei besonders die Klasse der genetischen Algorithmen in der Anwendung weit verbreitet ist (Weicker 2015). Diese erzeugen ausgehend von einer definierten Population an Lösungen durch Mutation eine neue Population an Lösungen. Hierbei werden gezielt diejenigen Lösungen kombiniert, die einen vergleichsweise hohen Zielfunktionswert aufweisen. (Deb 2001) Der Vorteil genetischer Algorithmen besteht in der Vereinigung guter lokaler Sucheigenschaften und der Möglichkeit, große Sprünge im Suchraum durchzuführen, sodass sie in großen Suchräumen erfolgreich einsetzbar sind (Buttelmann & Lohmann 2004).

2.3.5 Die Fließbandabstimmung als Optimierungsproblem

Die Kernaufgabe der Fließbandabstimmung ist die Zuordnung von spezifischen Montagevorgängen und deren benötigten Ressourcen zu einer Station der Montagelinie (vgl. Kapitel 2.1.4.1), wobei typischerweise eine Minimierung der Taktzeit oder der Stationsanzahl angestrebt wird (Boysen 2005). Dieses Basisproblem wird als Simple Assembly Line Balancing Problem (SALBP) bezeichnet (Baybars 1986). Hinsichtlich der Zielfunktion kann das SALBP nach Boysen (2005) in vier Varianten eingeteilt werden. Eine Übersicht der Varianten ist in Abbildung 2.12 dargestellt.

- **SALBP-F:** In Anlehnung an den englischen Begriff „feasibility“ wird die Erweiterung des Akronyms um den Buchstaben F gewählt. Die Problemstellung dieser Variante liegt in der Ermittlung einer zulässigen Lösung unter sowohl gegebener Taktzeit als auch gegebener Stationsanzahl. Hierzu wird eine konstante Zielfunktion genutzt.
- **SALBP-1:** Die Zielstellung dieser Variante ist die Minimierung der benötigten Stationsanzahl zur Durchführung aller benötigten Montageaufgaben eines Produkts. Die Taktzeit des Montagesystems wird dabei als gegeben betrachtet.
- **SALBP-2:** Im Vergleich mit dem SALBP-1 ist der Status von Stationsanzahl und Taktzeit vertauscht. Bei einer gegebenen Anzahl an Stationen soll eine minimale Taktzeit gefunden werden.
- **SALBP-E:** Diese Variante zielt auf die Maximierung des Bandwirkungsgrads, was einer Minimierung des Produkts der Taktzeit und der Stationsanzahl entspricht. Die Bezeichnung E leitet sich vom englischen Begriff „efficiency“ ab.

		Taktzeit	
		gegeben	minimiere
Anzahl Stationen	gegeben	SALBP-F	SALBP-2
	minimiere	SALBP-1	SALBP-E

Abbildung 2.12: Arten des SALBP (in Anlehnung an Boysen (2005))

Die Einfachheit des SALBP ergibt sich aus den zugrundeliegenden Annahmen. So ist das hergestellte Produkt homogen und die Zeitbedarfe der hierzu notwendigen Montageumfänge sind deterministisch und ganzzahlig. Zuordnungsrestriktionen abseits der Berücksichtigung der Vorrangbeziehungen existieren nicht. Weiterhin muss die Zuordnung von Montageaufgaben zu Stationen derart erfolgen, dass die Taktzeit an allen Stationen eingehalten wird. Die Stationen selbst folgen einer linearen Anordnung, sind nicht parallelisierbar und in ihrer Grundausstattung homogen. (Domschke, Scholl & Voß 1997; Boysen, Fliedner & Scholl 2007)

Diese Annahmen schränken die Modellierung von Fließbandabstimmungsproblemen in einem Maß ein, als dass praxisrelevante Problemstellungen und Nebenbedingungen nicht formalisiert werden können. Infolgedessen werden im Forschungsbereich des General Assembly Line Balancing Problem (GALBP) allgemeinere Formen der Modellierung dargestellt. (Boysen, Fliedner & Scholl 2009a) Hierunter fallen Erweiterungen des Kernproblems um beispielsweise die Montage mehrerer Produkte (Thomopoulos 1970; Dörmer 2013), parallele Stationen (Boysen 2005) oder dynamische (Boucher 1987; Chakravarty 1988) und stochastische Prozesszeiten (Tempelmeier 2003). In der vorliegenden Arbeit wird eine Erweiterung des Kernproblems zur Berücksichtigung der Veränderungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen vorgenommen. Grundlegende Nebenbedingungen wie die Berücksichtigung der Vorrangrestriktionen (vgl. Kapitel 2.1.4.2) sind dabei stets zu beachten. Das Problem der Fließbandabstimmung wird als GALBP formuliert und ist aufgrund der probleminhärenten Kombinatorik in der Klasse der NP-schweren Probleme verortet und daher vermutlich nicht effizient lösbar (Karp 1972).

3 Stand der Forschung

Mit Bezug zu den in Kapitel 1.1 beschriebenen forschungsleitenden Fragestellungen werden in diesem Kapitel zunächst die Anforderungen an ein Vorgehen zur Gestaltung veränderungsfähiger Fließbandabstimmungen formuliert (Kapitel 3.1). Anschließend werden sowohl Forschungsansätze diskutiert, die vorrangig die Planung und Bewertung veränderungsfähiger Produktionssysteme behandeln, als auch Forschungsansätze, die gezielt die Gestaltung der Fließbandabstimmung fokussieren. Somit werden sowohl die methodische Herangehensweise der Fließbandabstimmung als auch deren Einbindung in einen übergeordneten Planungsprozess hinsichtlich einer veränderungsfähigen Auslegung untersucht (Kapitel 3.2). Das Kapitel schließt mit der Diskussion der Zielerfüllung der eingangs definierten Anforderungen und dem hieraus abgeleiteten Forschungsdefizit (Kapitel 3.3).

3.1 Anforderungen an die Planungsmethodik

Die Eignung bestehender Forschungsansätze zur Beantwortung der forschungsleitenden Fragestellungen wird anhand der nachfolgend definierten Kriterien überprüft. Diese werden in die Kategorien Systemgrenze, Fließbandabstimmung, Planungsfälle, Bewertung sowie Entscheidungsunterstützung untergliedert.

Kriterien der Systemgrenze

1. **Produktvarianten:** Eine Anforderung an die Methodik ist die Berücksichtigung der Montage unterschiedlicher Produktvarianten auf dem betrachteten Montageband. Dies wirkt sich wesentlich auf die mathematische Formulierung der Fließbandabstimmung aus, da sich die Optimierungsprobleme von Einprodukt- und Variantenlinien in der Zielfunktion und den Nebenbedingungen unterscheiden (Boysen, Fliedner & Scholl 2008).

2. **Betriebsmittel:** Um eine Veränderung der Fließbandabstimmung realisieren zu können, gilt es abseits der Arbeitsvorgänge auch die notwendigen Betriebsmittel zu berücksichtigen, um diese in eine monetäre Bewertung einschließen zu können.
3. **Reihenfolgeplanung:** Des Weiteren sollen überlastorientierte Planungsansätze berücksichtigt werden, da diese eine Planung anhand von Durchschnittswerten begünstigen (vgl. Kapitel 2.1.4.2). Um hierbei eine ganzheitliche Kostenbewertung durch Maßnahmen zur Auflösung von Überlast zu ermöglichen, soll diese im Rahmen der Reihenfolgebildung für definierte Produktionsprogramme ermittelt werden.

Kriterien der Fließbandabstimmung

4. **Mathematische Optimierung:** Die mathematische Optimierung der Fließbandabstimmung ist erforderlich, um die Auswahl von Lösungen nicht auf einzelne manuell geplante Alternativen zu beschränken, sondern den gesamten Lösungsraum zu prüfen.
5. **Mehrzielsystem:** Um dem Entscheider die Möglichkeit der Gewichtung unterschiedlicher Aspekte des Zielsystems zu ermöglichen, gilt es diese in separaten Zielfunktionen zu beschreiben.
6. **Flexible Fließbandabstimmung:** Werden der fokussierten Montagelinie mehrere Produktvarianten zugeordnet, so werden die variantenspezifischen Bearbeitungszeiten häufig gewichtet und gemittelt (Boysen 2005). Um Schwankungen im Variantenmix und somit der Verletzung von Taktzeitrestriktionen entgegenzuwirken (vgl. Abbildung 2.7), soll die Fließbandabstimmung von Variantenlinien flexibel gestaltet werden.
7. **Wandlungsfähige Fließbandabstimmung:** Die technologischen und organisatorischen Restriktionen der Abfolge von Arbeitsvorgängen werden bei der Planung von Fließbandabstimmungen berücksichtigt (Scholl & Becker 2006). Zusätzlich zu integrierende Produktvarianten können weitere Restriktionen in die Planung einbringen, die eine Verschiebung von Arbeitsinhalten und Betriebsmitteln zu anderen Stationen erfordern. Eine geeignete Methode berücksichtigt daher die Reallokationen von Arbeitsvorgängen und Betriebsmitteln.

Kriterien der Planungsfälle

8. **Neuplanung:** Die Veränderungsfähigkeit von Montagesystemen kann im Rahmen einer Neuplanung durch vorhandene Freiheitsgrade ausgestaltet werden und ist hierbei durch eine geeignete Planungsmethode zu berücksichtigen.
9. **Umplanung:** Im Rahmen einer Umplanung gilt es zur Anpassung des Montagesystems auf die geschaffene Veränderungsfähigkeit zurückzugreifen. Eine geeignete Planungsmethodik berücksichtigt daher auch potentielle Umplanungen des Montagesystems.

Kriterien der Bewertung

10. **Monetäre Bewertung:** Bezüglich der Auswahl einer geeigneten Fließbandabstimmung gilt es, eine monetäre Bewertung durchzuführen, um die wirtschaftliche Vergleichbarkeit der Lösungsalternativen zu gewährleisten.
11. **Bewertung der Veränderungsfähigkeit:** Ebenso soll eine Bewertung der Veränderungsfähigkeit erfolgen, da deren Güte eine wesentliche Grundlage der Planung veränderungsfähiger Fließbandabstimmungen darstellt.
12. **Trade-off von Kosten und Veränderungsfähigkeit:** Der Vorhalt von Veränderungsfähigkeit verursacht Kosten, da sich bspw. ungenutzte Taktzeit, Freiflächen oder überdimensionierte Betriebsmittel auf die Investitionskosten auswirken, jedoch nachfolgende Anpassungen erleichtern (vgl. Kapitel 2.2.3). Diese Austauschbeziehung ist daher in der Planung zu beachten, um eine anforderungsgerechte Fließbandabstimmung identifizieren zu können.

Kriterien der Entscheidungsunterstützung

13. **Strategische Unterstützung:** Hinsichtlich der Auswahl einer Lösung gilt es Entscheidungskriterien zu formulieren und Alternativen hinsichtlich dieser zu bewerten sowie übersichtlich darzustellen.
14. **Berücksichtigung der Unsicherheit:** Hierbei sind mögliche Entwicklungsrichtungen durch Szenarien zu antizipieren, um die Unsicherheit der zukünftigen Entwicklung zu berücksichtigen.

Die aufgestellten Kriterien werden nachfolgend zur Bewertung der identifizierten Forschungsansätze verwendet.

3.2 Vorstellung und Diskussion bestehender Ansätze

In diesem Kapitel werden sowohl Ansätze zur Planung und Bewertung veränderungsfähiger Fabriken und Produktionssysteme als auch zur Fließbandabstimmung von Montagesystemen vorgestellt und diskutiert.

3.2.1 Ansätze zur Planung und Bewertung veränderungsfähiger Fabriken und Produktionssysteme

Die nachfolgend vorgestellten Ansätze fokussieren Planungs- und Bewertungsvorgehen mit der Zielstellung, Fabriken und Produktionssysteme veränderungsfähig zu gestalten. Vorgehen, die Veränderungsfähigkeit durch zielgerichtetes Zusammenwirken von Fabriken eines Netzwerkverbundes fokussieren (z.B. Löffler (2011), Hartkopf (2013), Moser (2014), Moser (2018), (Bürgin 2018)), entsprechen nicht der Zielstellung der vorliegenden Arbeit und werden daher von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Kratzsch (2000) beschreibt eine Systematik zur organisatorischen Planungsunterstützung von Fließmontagesystemen, die sich in einen Planungsteil und einen Bewertungsteil untergliedert. Im Fokus der Planung steht die Prozess- und Arbeitsorganisation von Fließmontagesystemen zur Erzeugung unterschiedlicher Gestaltungsalternativen, wohingegen die Bewertung auf ein vergleichendes Verfahren zur Lösung eines multikriteriellen Auswahlproblems abzielt. Diesem Auswahlproblem ist die Bewertung der systeminhärenten Flexibilität des Fließmontagesystems zugeordnet, wobei diese wiederum aus Einzelbewertungen unterschiedlicher Flexibilitätsarten aggregiert wird und damit eine Vorarbeit zur Bewertung von Flexibilitätsstrategien nach Roscher (2008) darstellt.

Hinsichtlich der strukturierten Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Implementierung von Veränderungsfähigkeit wählt Gagsch (2002) einen Portfolioansatz, durch den Veränderungsbedarfe mit der systeminhärenten Veränderungsfähigkeit abgeglichen werden. Um einen Wandel erfolgreich durchführen zu können, werden mit der Wandlungskompetenz, der Wandlungsbereitschaft sowie der Wandlungsmöglichkeit drei notwendige Vorbedingungen eingeführt. Liegen diese vor, so kann ein Wandel durch eine veränderte Ausgestaltung der Gestaltungsfelder Mitarbeiter, technische Ressourcen, Unternehmensstruktur sowie Geschäftsstrategien erfolgen.

Hernández Morales (2003) beschreibt einen Ansatz zur Definition, Klassifizierung und Planbarkeit der Wandlungsfähigkeit im Rahmen der Fabrikplanung durch einen systemtheoretischen Ansatz. Die Durchführbarkeit eines Wandels beruht auf dem Vorliegen von Wandlungsbefähigern, die als technisch, organisatorisch oder räumlich klassifiziert werden können. Durch die Zuordnung von Wandlungsbefähigern zu Objekten unterschiedlicher Systemebenen werden diese zu einem Wandel befähigt. Die Bewertung einer geeigneten Implementierung von Wandlungsfähigkeit erfolgt anhand quantitativer und qualitativer Merkmale im Rahmen von Anwendungsszenarien, die durch die Methode des Szenario-Managements systematisch erzeugt werden.

Die Gestaltung und Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Betriebsmitteln steht im Fokus der Arbeit von Denkena & Drabow (2005). Dabei orientiert sich die Gestaltung wandlungsfähiger Betriebsmittel am Grundsatz der Modularität, wobei physisch und funktional unabhängige Subsysteme entworfen werden. Mithilfe des Ansatzes kann die Wandlungsfähigkeit von Betriebsmitteln abseits dieser technischen Wandlungsfähigkeit auch durch die Wandlungsfähigkeit der organisatorischen Einbindung in das Gesamtsystem erzielt werden. Der Bedarf an Wandlungsfähigkeit wird dabei in Abhängigkeit des Fertigungssegments erhoben, dass sich aus der Produkt-Markt-Kombination eines Unternehmens ergibt und in Reife-Segment, Wachstums-Segment und Pionier-Segment unterteilt ist. Zur abschließenden Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Betriebsmitteln setzen Denkena & Drabow ein Zielbaumverfahren ein.

Azab & ElMaraghy (2007) fokussieren die Veränderungsfähigkeit der Prozessplanung in der Teilefertigung durch die gezielte parallele Veränderungen einer Produktfamilie sowie des Produktionssystems. Hierzu erfolgt die Anpassung bestehender Prozessabfolgen bei der Integration neuer Produkteigenschaften durch einen Optimierungsansatz unter Berücksichtigung der Abhängigkeiten zwischen Produkteigenschaften. Die Zielstellung des Optimierungsansatzes besteht in der Identifikation der bestmöglichen Position zur Realisierung der neuen Produkteigenschaften im Prozessablauf der Fertigung. Eine Kostenbewertung erfolgt dabei anhand von Strafkosten für Restriktionsverletzungen, Anpassungskosten von Anlagen sowie Umrüstkosten im Produktionsprozess.

Die Beschreibung von Wandlungsobjekten nach Hernández Morales (2003) wird von Heger (2007) erweitert, indem einem Wandlungsobjekt ein Wandlungspotential als quantitative Größe zur Beschreibung der Wandlungsfähigkeit zugeordnet wird. Zur Bestimmung des Wandlungspotentials werden Wandlungspotentialmerkmale durch das

Aufspannen objektspezifischer Suchräume identifiziert. Eingebettet in einen mehrphasigen Prozess werden durch einen szenariobasierten Soll-Ist-Abgleich des Wandlungspotentials Handlungsalternativen erzeugt, die durch eine Gegenüberstellung der Kapitalwerte relativ bewertet werden. Die hierdurch erzeugte Handlungsempfehlung wird durch eine systematische Sensitivitätsanalyse ergänzt.

Möller (2008) bietet einen Ansatz zur Bewertung von Investitionsentscheidungen in die Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. In Abgrenzung zu typischen Investitionsrechnungsverfahren beschreibt Möller die Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems als Bündel von Realloptionen, die mit Verfahren der Finanztheorie bewertet werden. Eine Realloption repräsentiert dabei einen zukünftigen Handlungsspielraum sowie eine Investitionsmöglichkeit in Verbindung mit der Fähigkeit, operative Entscheidungen an veränderte Umweltbedingungen anzupassen. Durch die monetäre Bewertung mehrerer technischer Alternativen werden hierdurch der Wert und der Nutzen von Wandlungsfähigkeit quantifiziert.

Die von Roscher (2008) entwickelte Methodik zur Bewertung von Flexibilitätsstrategien der Automobilmontage stellt den Kosten der Systemflexibilität einen Flexibilitätsnutzen entgegen. Die Quantifizierung der Systemflexibilitätskosten wird durch funktionale Zusammenhänge der Anpassungsmöglichkeiten sowie der resultierenden Betriebskosten ermittelt. Zur Bestimmung des Nutzens werden unterschiedliche Flexibilitätsstrategien hinsichtlich der zu fertigenden Produkte sowie der standortspezifischen Kostenstruktur und Personalflexibilität bewertet und mit der Antizipation des zukünftigen Montagebetriebs abgeglichen. Hierzu werden die drei Kernmodelle der Montage, Lernkurven und Optimierung gebildet und in einem Vorgehensmodell verknüpft.

Koren & Shpitalni (2010) beschreiben Prinzipien zur Gestaltung und Organisation wandlungsfähiger Fertigungssysteme¹⁷. Hierzu definieren Koren & Shpitalni Charakteristika wandlungsfähiger Fertigungssysteme, die Überschneidungen mit den von Hernández Morales (2003) und Heger (2007) definierten Wandlungsbefähigern aufweisen. Hinsichtlich der Gestaltung von Flexibilität weisen Koren & Shpitalni darauf hin, dass diese auf die Herstellung einer Produktfamilie auszulegen ist. Die präferierte Organisationsform wandlungsfähiger Fertigungssysteme beschreibt eine Auslegung nach

¹⁷ Die Autoren verwenden den Begriff „reconfigurable manufacturing systems“ (vgl. Kapitel 2.2.1)

parallel angeordneten Linien, die Verzweigungen nach jeder Fertigungsstufe vorsieht, wobei jede Fertigungsstufe im Idealfall die identische Anzahl an Operationen aufweist.

Koch (2011) erläutert eine ganzheitliche Methodik zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit von Fabriken. Das methodische Vorgehen zielt auf die Identifikation soziotechnischer Wandlungsbefähiger und bezieht sich auf die Arbeiten von Hernández Morales (2003) und Heger (2007), die das systemtheoretische soziotechnische Subsystem der Fabrik vernachlässigen. Durch die Methode des Szenario-Managements wird ein Zielzustand der Wandlungsfähigkeit definiert, der durch die Auswahl und Umsetzung geeigneter Handlungsempfehlungen erreicht werden soll.

Pachow-Frauenhofer (2012) beschreibt eine Methodik zur Planung veränderungsfähiger Montagesysteme, wobei ein geeignetes Niveau der Veränderungsfähigkeit bereits in der frühen Planungsphase fokussiert wird. Das Vorgehen ist in die Zieldefinitions-, Analyse-, Gestaltungs- sowie Bewertungsphase untergliedert. Durch die Untersuchung von Veränderungstreibern in der Analysephase wird deren Auswirkung auf die Veränderungsdimensionen (vgl. Klemke (2014)) abgeleitet und die hieraus resultierende, notwendige Veränderungsfähigkeit bestimmt. Weiterhin wird durch die Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit der Veränderungstreiber eine Abschätzung des geeigneten Verhältnisses von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit vorgenommen. In der nachfolgenden Gestaltungsphase gilt es alternative Konfigurationen des Montagesystems zu generieren, wobei sich diese hinsichtlich der Implementierung von Wandlungsbefähigern voneinander unterscheiden. Die ermittelten Alternativen werden abschließend anhand des Kapitalwerts sowie einer Sensitivitätsanalyse bewertet.

Klemke (2014) fokussiert die Planung systematischer Wandlungsfähigkeit von Fabriken. Die Zielstellung der beschriebenen Methodik liegt in der Bewertung der Wandlungsfähigkeit in den Veränderungsdimensionen Stückzahl, Kosten, Zeit, und Qualität unter Berücksichtigung der technologischen, logistischen, organisatorischen und personellen Elemente der Fabrik. Klemke beschreibt ein Vorgehen bestehend aus der vorgelagerten Stufe des Wandlungsmonitorings und der nachgelagerten Stufe der Wandlungsfähigkeitsbewertung, die in jeweils fünf Phasen unterteilt sind. Als Ergebnis des Vorgehens liegen bewertete Potentiale zur systematischen Steigerung der Wandlungsfähigkeit vor.

Landherr (2014) erläutert eine Methodik zur abgestimmten Adaption von Produkt- und Montagesystem in der variantenreichen Fließmontage. Das zentrale Element ist hierbei

die Modellierung der Wechselwirkungen und Abhängigkeiten von Produkt und Montage in einem integrierten System. Dieses wird in Schleifen kontinuierlich durchlaufen, wobei die Detektion eines Veränderungsbedarfes den Auslöser für ein Planungsvorgehen zur Anpassung des Montagesystems darstellt. Mögliche Maßnahmen zur Anpassung des Montagesystems sind den Klassen Produkt, Montage sowie Struktur zugeordnet und werden anhand des Erfüllungsgrades von Kriterien bewertet. Die Bewertung des Kriteriums der Wandlungsfähigkeit basiert auf der Evaluation der Wandlungsbefähiger nach Heger (2007).

Die Auswahl einer Montagelinie aus der Menge bereits bestehender Montagelinien zur Einführung einer neuen Produktvariante wird von Lafou et al. (2015) verfolgt. Hierzu erläutern Lafou et al. eine Heuristik, die auf die Bewertung der Flexibilität von Montagelinien anhand von drei Kriterien abzielt. Bewertet wird die Integration zusätzlicher Stationen, bereits vorhandene freie Kapazität sowie die Anzahl zu verschiebender Stationen.

Benkamoun (2016) beschreibt ein ganzheitliches Framework zur Gestaltung veränderungsfähiger Produktionssysteme, das in zwei Bestandteile gegliedert ist. Der erste Bestandteil ist ein systemtheoretischer Ansatz zur Modellierung von Veränderungsfähigkeit, wobei diese sowohl hinsichtlich physischer Systemelemente als auch der Systemarchitektur beschrieben wird. Als zweiten Bestandteil beschreibt Benkamoun eine Methodik um die Veränderungsfähigkeit durch eine Lebenszyklusbetrachtung des Produktionssystems zu managen. Hierbei wird der Lebenszyklus in Abhängigkeit einer Szenariobetrachtung in die Phasen der Gestaltung und Nutzung von Veränderungsfähigkeit unterteilt.

Sauer (2017) baut zur Bewertung der Wandlungsfähigkeit von unreifen Produkttechnologien auf die Vorarbeiten von Denkena & Drabow (2005) und Heger (2007) auf. Analytierte Wandlungspotentiale werden hierbei in einem Kennzahlensystem zusammengefasst und durch eine Quantifizierung ihrer Wechselwirkungen auf eine zielgerichtete Anwendbarkeit untersucht. Weiterhin erfolgt eine gesonderte Bewertung der Weiter- und Mehrfachverwendung von Montagemodulen zur Auswahl der modulinternen Technologie.

3.2.2 Ansätze zur Fließbandabstimmung von Montagesystemen

In diesem Kapitel werden Ansätze und Methoden mit dem Fokus auf Verfahren zur Bestimmung einer veränderungsfähigen Fließbandabstimmung vorgestellt. Abseits der nachfolgenden Ansätze existieren weitere Modelle und Methoden, die die spezifischen Charakteristika von Fließmontagesystemen mathematisch beschreiben. So fokussieren beispielsweise Hazır & Dolgui (2013) sowie Reeve & Thomas (1973) die Glättung von Bearbeitungszeiten, Becker & Scholl (2009) die Parallelisierung von Arbeitsvorgängen und Bukchin & Tzur (2000) die Synergien von Betriebsmitteln. Da diese Ansätze lediglich spezifische Fokussierungen der Fließbandabstimmung, jedoch kein ganzheitliches Vorgehen, darstellen, werden diese von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Ausführungen zu weiteren Ergänzungen des Basisproblems der Fließbandabstimmung finden sich in Kapitel 2.3.5. Ferner werden derartige Ansätze nicht berücksichtigt, die gezielt von der Fließmontage verschiedene Organisationsformen betreffen. Exemplarisch können hierzu Kluge (2011), Foith-Förster & Bauernhansl (2015) sowie Kern, Rusitschka & Bauernhansl (2016) angeführt werden.

Der dominierende Ansatz in der Fließbandabstimmung besteht in der Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Stationen und der nachfolgenden Erstellung einer stationsinternen linearen Abfolge. Boysen (2005) kehrt diesen Ansatz in einem zweiphasigen Verfahren um und etabliert somit eine weitere Vorgehensweise im Rahmen der Fließbandabstimmung. So bestimmt Boysen eingangs eine lineare Abfolge von Arbeitsvorgängen zwar unter Berücksichtigung von Reihenfolgebeziehungen, jedoch ohne hierbei eine Zuordnung zu Stationen vorzunehmen. Im zweiten Schritt wird die Stationszuordnung, unter Berücksichtigung der im ersten Schritt ermittelten linearen Abfolge von Arbeitsvorgängen, durchgeführt. Hinsichtlich der Fließbandabstimmung von Variantenlinien stellt Boysen einen Zusammenhang zwischen der Bildung von Variantenmischgraphen und der Planungsaufgabe der Reihenfolgebildung her, ohne diesen jedoch in die Bewertung von Fließbandabstimmungen zu integrieren.

Becker (2007) beschreibt einen Optimierungsansatz zur flexiblen Ausgestaltung der Fließbandabstimmung. Während im Standardmodell SALBP (vgl. Kapitel 2.3.5) nur ein Werker je Station verfügbar ist, erweitert Becker die Fließbandabstimmung auf eine variable Anzahl an Arbeitsplätzen. Dabei wird ein hierarchischer Ansatz verfolgt, der die Zuordnung von Arbeitsvorgängen zwischen Stationen und die stationsinterne Zu-

ordnung trennt und somit eine Kapselung der Problemstellungen darstellt. Die Implementierung des Lösungsprogramms erfolgt durch ein Branch & Bound-Verfahren, das für große Problemgrößen in eine heuristische Verfahrensvariante transformiert werden kann (vgl. Kapitel 2.3.4).

Alteimeier (2009) erläutert eine Methodik zur Kapazitätsabstimmung getakteter Variantenfließlinien mit Fokus auf dem kostenoptimalen Einsatz von Unterstützern. Der adressierte Planungsfall ist hierbei die Rekonfiguration der Fließbandabstimmung hinsichtlich eines veränderten Produktionsprogramms für die jeweils nächste Planungsperiode, wobei der wesentliche Freiheitsgrad in der Reallokation von Arbeitsvorgängen besteht. Die Verringerung von Überlastsituationen wird dabei auf Basis negativer Korrelationen der variantenbedingt unterschiedlich ausgeprägten Arbeitsvorgänge angestrebt. Im Rahmen der an die Fließbandabstimmung anschließenden Reihenfolgebildung wird durch eine simulationsunterstützte Heuristik die minimale Unterstützeranzahl bestimmt.

Gamberini, Grassi & Rimini (2006) und Gamberini et al. (2009) präsentieren einen Optimierungsansatz zur Anpassung bestehender Fließbandabstimmungen durch die Reallokation von Arbeitsvorgängen. Ein Zielkriterium des beschriebenen Ansatzes besteht in der Maximierung der Ähnlichkeit der Fließbandabstimmung vor und nach einer Veränderung. Zur Bewertung dieser Ähnlichkeit führen Gamberini et al. einen Ähnlichkeitsfaktor ein, der die Menge aller Arbeitsvorgänge, deren Stationszuordnung durch den Wandel nicht verändert wird, beschreibt.

Gans (2009) beschreibt einen Ansatz zur kostenoptimalen Neu- und Anpassungsplanung der Struktur von getakteten Fließmontagesystemen, wobei die Zuordnung von Kundenaufträgen zu Montagelinien hervorgehoben betrachtet wird. In Abhängigkeit des Vorliegens von geschlossenen oder offenen Stationsgrenzen erläutert Gans dabei zwei unterschiedliche Vorgehensweisen. Geschlossene Stationsgrenzen werden im Fall der Neuplanung betrachtet und durch eine Aufteilung von Produkten auf zu installierende Montagelinien adressiert. Dieses Vorgehen folgt der Zielstellung, Effizienzverluste und Produktionskosten zu minimieren, wobei die Fließbandabstimmung nicht berücksichtigt wird. Hinsichtlich offener Stationsgrenzen zielt die Allokation von Kundenaufträgen zudem auf eine Minimierung der Varianz an einzelnen Arbeitsstationen ab, um entstehende Überlast zu verringern und somit einen Kostenvorteil zu erzielen.

Die Variantenbeherrschung im Rahmen der Fließbandabstimmung etabliert Medo (2010) durch die Definition von fünf Leitlinien. Initial erfolgt hierbei die Differenzierung von variantenabhängiger und variantenunabhängiger Arbeitsinhalte. Stationen, denen variantenunabhängige Arbeitsinhalten alloziert werden, weisen aufgrund ihrer Unabhängigkeit eine geringe Varianz auf und eignen sich für eine konstant hohe Auslastung. Stationen mit variantenabhängigen Arbeitsinhalten sind im Gegensatz dazu durch eine höhere Varianz gekennzeichnet, die über die Personaleinsatzplanung beherrscht wird. Die Methodik kann sowohl dazu verwendet werden, unter fixierter Taktzeit und Austaktung den notwendigen Personalbedarf zu bestimmen, als auch unter fixierter Austaktung und Personalausstattung die optimale Taktzeit zu ermitteln.

Weyand (2010) präsentiert einen variantenorientierten Planungsansatz für die Auslegung von Montagesystemen der Automobilfabrik mit der Zielstellung, kostenintensive Änderungsschleifen im Planungsverlauf zu reduzieren. Hierzu führt Weyand Prozess- und Ressourcengraphen ein. In Prozessgraphen werden Informationen des Zusammenhangs von Prozessplanung und Fließbandabstimmung dokumentiert, die nachfolgend die Allokation von Montageaufgaben zu Stationen unterstützen. Ressourcengraphen werden auf Basis von Prozessgraphen erstellt und enthalten Prozess-Ressource-Verknüpfungen, womit die Wiederverwendbarkeitsplanung von Ressourcen unterstützt wird. Die Reduktion der Änderungsschleifen führt Weyand auf das verbesserte Zusammenspiel der Prozessplanung und Fließbandabstimmung zurück.

Die Rekonfiguration von Fließbandabstimmungen wird von Yang, Gao & Sun (2013) durch eine multikriterielle Optimierung adressiert. Dabei bewerten Yang, Gao & Sun die Güte der Neuzuweisung von Arbeitsvorgängen zu Stationen anhand der Summe der verlagerten Arbeitsvorgänge sowie deren Komplexität. Weiterhin präsentieren Yang, Gao & Sun die Minimierung der varianteninduzierten Arbeitslastvariation an Stationen als Maßnahme zur Erhöhung der Flexibilität von Fließbandabstimmungen im Rahmen der Rekonfiguration.

Keckl, Abou-Haydar & Westkämper (2016) und Keckl et al. (2016) beschreiben einen Ansatz zur Komplexitätsbeherrschung von Fließmontagesystemen durch eine dynamische Anpassung der Fließbandabstimmung. Hierzu wird ein fünf-phasiger Zyklus eingeführt, mithilfe dessen die Fließbandabstimmung kontinuierlich evaluiert und angepasst wird. Die Evaluierung basiert auf einer Komplexitätskennzahl, die sich aus kontinuierlich und diskret auftretenden Veränderungen sowie den notwendigen Montageprozessen zur Bearbeitung aller Varianten im Produktionsprogramm zusammensetzt. Aus

der Evaluierung abgeleitete Anpassungsstrategien fokussieren die Reduktion von Leerzeiten unter Berücksichtigung von Effizienz und Flexibilitätsanforderungen.

Pröpster (2016) erläutert eine Methodik zur kurzfristigen Abstimmung variantenreicher Fließmontagesysteme, um eine effiziente Abstimmung des Montagebands im Fall von Stückzahl- und Variantenmixschwankungen zu ermöglichen. Hinsichtlich der Veränderung von Stückzahlschwankungen werden Fließbandabstimmungsalternativen für unterschiedliche Taktzeiten definiert, die durch Variation der Werkerdichte realisiert werden. Schwankungen im Variantenmix werden, in Anlehnung an die von Medo (2010) entwickelten Leitlinien, berücksichtigt, wobei eine Integration zusätzlicher Varianten nicht im Fokus der Methodik steht. Es erfolgt hierbei eine Trennung von variantenabhängigen und variantenunabhängigen Montageschritten, um diese gesondert auf dem Fließband zu allozieren. Die durch die Anwendung der Regeln erzeugten Austaktungsergebnisse werden mithilfe eines Simulationswerkzeugs umgesetzt und abschließend anhand eines Kennzahlensystems evaluiert.

Die systematische Nutzung von Freiheitsgraden in der Anordnung von Montagemodulen nutzen Küber et al. (2016) und Küber (2017) zur Entwicklung produktflexibler Montagekonfigurationen im Rahmen der variantenreichen Serienmontage. Hierzu erfolgt einleitend die Modularisierung von Montageprozessen mit der Zielstellung fixe sowie flexible Montagemodule zu erzeugen. Die Definition von Freiheitsgraden zwischen Montagemodulen wird mittels Adjazenzmatrizen bestimmt und umfasst mögliche Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen der Montagemodule. Durch Überlagerung der modulübergreifenden Freiheitsgrade und produktspezifischen Vorranggraphen wird ein produktspezifischer Mischgraph erzeugt, von dem mögliche gültige Montagekonfigurationen abgeleitet werden. Zur Verbesserung der identifizierten Konfigurationen werden Verblockung, Vertauschung und Parallelisierung von Montagemodulen als geeignete Maßnahmen definiert.

3.3 Forschungsdefizit

Nachdem die relevanten Forschungsansätze beschrieben sind, erfolgt die Diskussion der in Kapitel 3.1 definierten Anforderungen sowie die Ableitung des Forschungsdefizits. Abbildung 3.1 stellt den Erfüllungsgrad der bestehenden Forschungsansätze hinsichtlich der definierten Anforderungen vergleichend gegenüber.

Anforderungen <input type="radio"/> nicht erfüllt <input type="radio"/> teilweise erfüllt <input checked="" type="radio"/> voll erfüllt	Systemgrenze			Fließbandabstimmung			Planungsfälle		Bewertung		Entscheidungsunters.			
	Produktvarianten	Betriebsmittel	Reihenfolgebildung	Mathematische Optimierung	Mehrzelsystem	Flexible Fließbandabstimmung	Wandlungsfähige Fließbandabstimmung	Neuplanung	Umplanung	Monetäre Bewertung	Bewertung der Veränderungsfähigkeit	Trade-off von Kosten und Veränderungsfähigkeit	Strategische Unterstützung	Berücksichtigung der Unsicherheit
Planung und Bewertung veränderungsfähiger Produktionssysteme														
Kratzsch (2000)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Gagsch (2002)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Hernández Morales (2003)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Denkena & Drabow (2005)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Azab & ElMaraghy (2007)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Heger (2007)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Möller (2008)	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Roscher (2008)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Koren & Shpitalni (2010)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Koch (2011)	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Pachow-Frauenhofer (2012)	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Klemke (2014)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Landherr (2014)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Lafou et al. (2015)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Benkamoun (2016)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Sauer (2017)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Fließbandabstimmung von Montagesystemen														
Boysen (2005)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Becker (2007)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Altmeier (2009)	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Gamberini et al. (2009) ^a	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gans (2009)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Medo (2010)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Weyand (2010)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Yang et al. (2013)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Keckl et al. (2016) ^b	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Pröpster (2016)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Küber (2017) ^c	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abbildung 3.1: Übersicht bestehender Ansätze zur Gestaltung veränderungsfähiger Fließbandabstimmungen

Kriterien der Systemgrenze

Die Betrachtung von Produktvarianten wird insbesondere von Ansätzen eingeschlossen, die sich mit einer vergleichsweise detaillierten Produktionsplanung (Roscher 2008; Landherr 2014) sowie der Fließbandabstimmung beschäftigen. Betriebsmittel stellen eine vielbeachtete Möglichkeit zur Gestaltung von Veränderungsfähigkeit dar. Bestehende Ansätze fokussieren hierbei einerseits die Gestaltung von Betriebsmittel (Denkena & Drabow 2005; Koren & Shpitalni 2010) sowie deren Bewertung und Auswahl (Boysen 2005; Heger 2007; Küber 2017). Hinsichtlich der Reihenfolgeplanung kann

festgestellt werden, dass diese vereinzelt berücksichtigt wird, um durch die Fließbandabstimmung induzierte Überlast aufzulösen (Boysen 2005; Altemeier 2009; Gans 2009; Keckl et al. 2016). Eine Rückführung der hierdurch verursachten Kosten in die Bewertung einer Fließbandabstimmung erfolgt jedoch durch keinen der identifizierten Ansätze.

Kriterien der Fließbandabstimmung

Die mathematische Optimierung von veränderungsfähigen Fließbandabstimmungen wird nur in wenigen Planungsansätzen aufgegriffen (Boysen 2005; Becker 2007; Altemeier 2009; Gans 2009; Yang, Gao & Sun 2013). Abseits der Fokussierung auf die Veränderungsfähigkeit bestehen vielfältige spezifische Erweiterungen des mathematischen Basisproblems der Fließbandabstimmung (vgl. Kapitel 2.3.5). Ansätze, die eine mathematische Optimierung beschreiben, nutzen häufig ein Mehrzielsystem, um sowohl eine Optimierung hinsichtlich der entstehenden Kosten als auch Aspekte der Veränderungsfähigkeit vornehmen zu können. Der Ansatz nach Gans (2009) stellt hiervon eine Ausnahme dar, da alle Bewertungskriterien monetarisiert vorliegen. Die Flexibilität von Fließbandabstimmungen zur Beherrschung von Schwankungen im Variantenmix wird vielfältig aufgegriffen. So stellen beispielsweise Medo (2010) und Pröpster (2016) der Fließbandabstimmung eine Trennung von variantenabhängigen und variantenunabhängigen Arbeitsvorgängen voran, Weyand (2010) fokussiert die Auswahl geeigneter Betriebsmittel, Lafou et al. (2015) erläutern die Einplanung einer ausreichenden Anzahl an Stationen, Küber (2017) beschreibt die Erhöhung der Werkerdichte und Boysen (2005) präsentiert einen Aufschlag auf die durchschnittliche Bearbeitungszeit von Montagevorgängen. Die Wandlungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen wird im Gegensatz zur Betrachtung der Flexibilität nur von wenigen Ansätzen aufgegriffen, wobei hier vorrangig die Kosten der Reallokation von Arbeitsvorgängen Gegenstand der Optimierung sind. Yang, Gao & Sun (2013) bestimmen diese anhand der Anzahl der zu verschiebenden Arbeitsvorgänge sowie der anfallenden Kosten zur Requalifizierung von Mitarbeitern, wohingegen Altemeier (2009) und Küber (2017) Konfigurationsszenarien mit nachfolgender Kostenschätzung durch Experten erzeugen. Zusätzlich der Kosten bewerten Gamberini et al. (2009) zudem die Reallokation von Arbeitsvorgängen durch einen Ähnlichkeitsindex, der die Menge der unverändert allozierten Arbeitsvorgänge repräsentiert. Hinsichtlich der Wandlungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen ist festzustellen, dass kein Ansatz identifiziert werden konnte,

der die Kosten einer Reallokation von Betriebsmitteln bereits in der Optimierung berücksichtigt. Weiterhin werden die beschriebenen Ansätze reaktiv, unter Vorliegen eines Veränderungsbedarfs, angewendet. Eine Berücksichtigung der Reallokationsmöglichkeiten von Arbeitsvorgängen und Betriebsmitteln in der initialen Ausgestaltung der Fließbandabstimmung findet nicht statt.

Kriterien der Planungsfälle

Hinsichtlich der Planungsfälle konnten sowohl Ansätze identifiziert werden, die eine Neuplanung (Kratzsch 2000; Becker 2007; Medo 2010; Küber et al. 2016) oder Umplanung (Klemke 2014; Gamberini et al. 2009; Yang, Gao & Sun 2013) fokussieren, als auch Ansätze, welche beide Planungsfälle berücksichtigen (Roscher 2008; Gans 2009; Pröpster 2016).

Kriterien der Bewertung

Die monetäre Bewertung von Handlungs- und Gestaltungsalternativen stellt einen verbreiteten Ansatz zur Evaluation der Lösungsgüte dar. Im Hinblick auf zukünftige Veränderungen werden hierbei Verfahren der Investitionsrechnung wie das Kapitalwertverfahren (Heger 2007; Koch 2011; Gans 2009), Realooptionen (Möller 2008) oder Lebenszykluskosten (Pachow-Frauenhofer 2012) angewendet. Im Rahmen der mathematischen Optimierung zur Ermittlung optimaler Fließbandabstimmungen stellt die Minimierung der Kosten ein typisches Zielkriterium dar (Altemeier 2009; Yang, Gao & Sun 2013; Pröpster 2016), wobei die Integration, Desintegration sowie Reallokation von Betriebsmitteln hierbei bisher unberücksichtigt ist. Um die Entscheidungsgrundlage zur Auswahl von Handlungs- und Gestaltungsalternativen weiter zu präzieren, bieten einige Ansätze Instrumente zur Bewertung der Veränderungsfähigkeit. So beschreiben u.a. Hernández Morales (2003), Denkena & Drabow (2005), Heger (2007) und Koch (2011) Indizes zur Ermittlung von Wandlungsfähigkeit. Gagsch (2002) verwendet ein Portfolio-Instrument, um die Wandlungsfähigkeit im Verhältnis zum Wandlungsbedarf abzubilden. Einen weiteren Ansatz bietet Landherr (2014), der das Vorliegen von Wandlungsfähigkeit und Flexibilität durch einen Kriterienkatalog prüft. Pachow-Frauenhofer (2012) definiert ein Veränderungsfähigkeitslevel, bestehend aus Flexibilitäts- und Wandlungsfähigkeitslevel, und gleicht dieses mit einem auf ein Montagesystem wirkenden Anpassungsdruck ab. Optimierungsansätze verwenden häufig Anpassungskosten zur Beschreibung der Veränderungsfähigkeit von erzeugten Lösungen (Altemeier 2009; Gans 2009; Küber 2017). Gesondert auszuweisen ist hierbei der Ansatz nach Gamberini et

al. (2009), der mit dem Ähnlichkeitsindex ein weiteres Maß zur Evaluierung der Veränderungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen aufweist. Der Trade-off von Veränderungsfähigkeit und Kosten wird nur vereinzelt aufgegriffen. Möller (2008) berücksichtigt diesen Trade-off in der Bewertung einer Realloption, die sich neben den erwarteten Zahlungsströmen auch aus der realloptionsinhärenten Wandlungsfähigkeit ergibt. Pachow-Frauenhofer (2012) erläutert den Trade-off im Auswahlprozess geeigneter Wandlungsbefähiger, der einen Vergleich der resultierenden Kosten und des entstehenden Veränderungsfähigkeitslevels des Montagesystems umfasst. Der Trade-off von Veränderungsfähigkeit und Kosten in Bezug auf die Ausgestaltung von Fließbandabstimmungen wird lediglich von Yang, Gao & Sun (2013) fokussiert. Im Rahmen einer multikriteriellen Bewertung entwickeln Yang, Gao & Sun konkurrierende Zielkriterien der Veränderungsfähigkeit und Kosten.

Kriterien der Entscheidungsunterstützung

Hinsichtlich der strategischen Entscheidungsunterstützung kann festgestellt werden, dass eine Vielzahl von Ansätzen die Durchführung einer Nutzwertanalyse beschreibt (Kratzsch 2000; Heger 2007; Landherr 2014; Küber 2017). Der rein monetäre Vergleich von Entscheidungsalternativen wird von Möller (2008) und Pachow-Frauenhofer (2012) angewendet. Portfolioansätze stellen eine weitere Methode zur strategischen Entscheidungsunterstützung dar und werden von Klemke (2014) und Gagsch (2002) fokussiert. Die Entscheidungsfindung in der Anwendung von optimierungsbezogenen Ansätzen erfolgt meist anhand der Zielfunktionswerte von Alternativen (Boysen 2005; Becker 2007; Altemeier 2009). Aufgrund der multikriteriellen Optimierung im Ansatz von Yang, Gao & Sun (2013) werden multiple Zielfunktionswerte erzeugt, die als Entscheidungsgrundlage herangezogen werden. Die Entscheidungsauswahl anhand errechneter Ergebnisse findet sich in der Gruppe der Planungs- und Bewertungsansätze auch bei Roscher (2008) und Koren & Shpitalni (2010). Die Anwendung eines Outranking-Verfahrens (vgl. Kapitel 2.3.1) wurde von keinem der identifizierten Ansätze vorgeschlagen. Eine Berücksichtigung der Unsicherheit von Entscheidungsalternativen wird von Ansätzen, die eine Investitionsrechnung anwenden, durch Sensitivitätsanalysen oder der Berechnung der Standardabweichung des erwarteten Kapitalwerts dargestellt (Heger 2007; Koch 2011; Pachow-Frauenhofer 2012). Ebenso wird das Szenario-Management von einigen Ansätzen angewandt, um den möglichen zukünftigen Entwicklungen geeignete Reaktionsmöglichkeiten gegenüberzustellen (Roscher 2008; Gans 2009;

Pröpster 2016). Möller (2008) unterscheidet Unsicherheit primärer und sekundärer Art und evaluiert durch eine Baumstruktur das kombinierte Auftreten von Risikoursachen.

Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass kein bestehender Ansatz die definierten Anforderungen vollumfänglich erfüllt. Die mathematische Optimierung von Fließbandabstimmungen wird zwar vielschichtig beleuchtet, wobei jedoch kein Ansatz identifiziert werden konnte, der die Veränderungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen im Trade-off mit entstehenden Kosten unter Berücksichtigung möglicher Szenarien integriert optimiert. Hinsichtlich der Wandlungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen fokussieren bestehende Ansätze den Vorgang der Reallokation bei gegebener Fließbandabstimmung. Die Anwendung der Wandlungsfähigkeit als Zielkriterium der initialen Fließbandabstimmung ist nach wie vor Gegenstand der Forschung. Ergänzend hierzu konnte kein Ansatz identifiziert werden, der im Rahmen der Reallokation von Arbeitsvorgängen eine monetäre Bewertung der Reallokation der zugehörigen Betriebsmittel beschreibt. Ferner kann festgestellt werden, dass die Kosten zur Auflösung von Überlast im Rahmen der Reihenfolgebildung lediglich von Altemeier (2009) monetär bewertet werden. Es findet hierbei jedoch keine Integration der Kosten in die Bewertung und Auswahl von Fließbandabstimmungen statt.

4 Lösungsansatz

Ausgehend von dem in Kapitel 1 motivierten und in forschungsleitende Fragestellungen überführten Handlungsbedarf, wird, im Einklang mit dem in Kapitel 3.3 beschriebenen Forschungsdefizit, nachfolgend der in Abbildung 4.1 dargestellte Lösungsansatz der vorliegenden Arbeit skizziert.

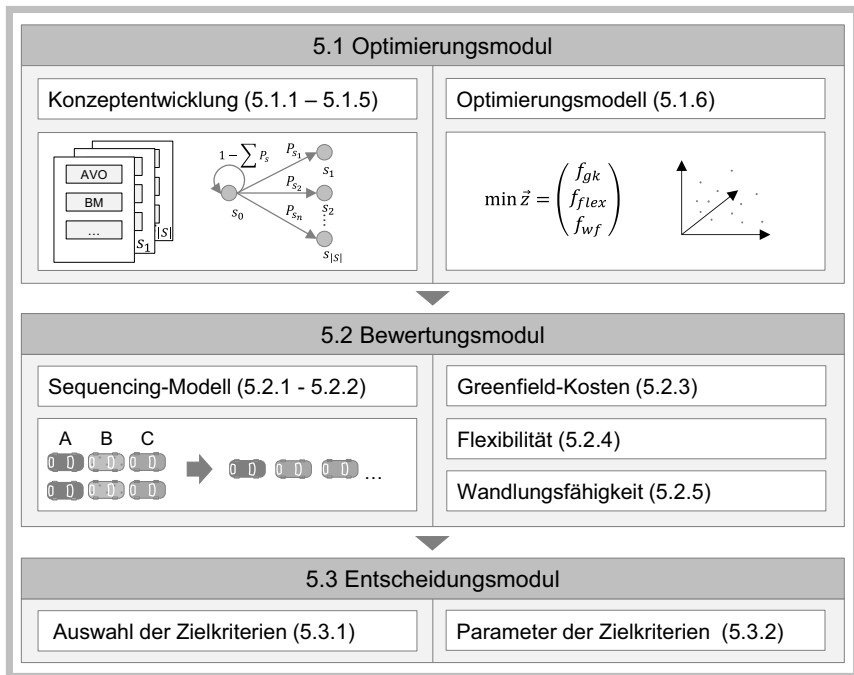


Abbildung 4.1: Übersicht des Lösungsansatzes

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Entwicklung einer Methodik zur Fließbandabstimmung, die sowohl Flexibilität und Wandlungsfähigkeitsanforderungen aufgrund von Veränderungen im Variantenmix berücksichtigt, als auch eine Bewertung der

resultierenden Kosten ermöglicht. Im Stand der Forschung hat sich zur Durchführung von Fließbandabstimmungen die mathematische Optimierung als geeignetes Werkzeug herausgestellt. Es erfolgt daher der Aufbau eines multikriteriellen Optimierungsmodells, das in Abhängigkeit möglicher zukünftiger Szenarien veränderungsfähige Fließbandabstimmungen erzeugt. Da Flexibilitätsuntersuchungen und die monetäre Bewertung zur Auflösung von Überlast erst nach erfolgter Reihenfolgeplanung durchzuführen sind, ist eine der Optimierung nachgelagerte Bewertung der Fließbandabstimmungen erforderlich. Aufgrund der konkurrierenden Zielkriterien von Kosten, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit schließt die Methodik mit einer multikriteriellen Auswahlentscheidung alternativer Fließbandabstimmungen. Für die Methodik zur Gestaltung veränderungsfähiger getakteter Fließmontagesysteme ergeben sich die folgenden drei Module:

1. **Optimierungsmodul** – zur mathematischen Optimierung der Fließbandabstimmung unter Berücksichtigung der Veränderungsfähigkeit
2. **Bewertungsmodul** – zur Bewertung der Flexibilität sowie der Kosten zur Kompensation von Überlast im Kontext der Reihenfolgebildung
3. **Entscheidungsmodul** – zur Erzeugung einer Entscheidungsvorlage des multikriteriellen Auswahlproblems alternativer Fließbandabstimmungen

Die Zielstellung des **Optimierungsmoduls** liegt in der Formalisierung eines Optimierungsproblems zur Erzeugung von veränderungsfähigen Fließbandabstimmungen. Hierzu gilt es in einem ersten Schritt die Systemgrenze der Fließbandabstimmung durch eine geeignete Modellierung des Fließmontagesystems zu definieren. Darauf aufbauend wird der Begriff der Veränderungsfähigkeit im Rahmen der Fließbandabstimmung interpretiert und eine Abgrenzung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der Fließbandabstimmung vorgenommen. Hieran schließt die Konzeptbeschreibung der Erzeugung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der Fließbandabstimmung an, die nachfolgend im Rahmen der Modellbildung formalisiert wird. Das Basisproblem der Fließbandabstimmung zur Minimierung der Stationsanzahl (vgl. Kapitel 2.3.5) bzw. der Kosten der Greenfield-Fließbandabstimmung wird hierbei um Zielkriterien der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit ergänzt, so dass ein multikriterielles Optimierungsproblem vorliegt. Zur Evaluierung der Wandlungsfähigkeit erfolgt die Definition von Zukunftssze-

narien mit Bewertung des Wandlungsvorgangs hin zu einer jeweils geeigneten Fließbandabstimmung. Um einen erhöhten Praxisbezug zu ermöglichen, wird das Optimierungsproblem um Nebenbedingungen erweitert, die charakteristische Merkmale der Automobilmontage beschreiben. Das Optimierungsmodul schließt mit einer Diskussion geeigneter algorithmischer Lösungsverfahren. Als Ergebnis des Optimierungsmoduls liegt ein formalisiertes Optimierungsproblem vor, mithilfe dessen eine Fließbandabstimmung unter Berücksichtigung der Veränderungsfähigkeit vorgenommen werden kann. Durch die Lösung des Optimierungsproblems mit einem Optimierungsverfahren kann eine Menge von Fließbandabstimmungen erzeugt werden, die jeweils eine Zuordnung von Arbeitsvorgängen und Betriebsmitteln zu Arbeitsplätzen an Montagestationen beinhalten.

Da eine exakte Bestimmung der Überlast erst nach erfolgter Reihenfolgeplanung vorgenommen werden kann (vgl. Kapitel 2.1.4.2), gilt es diese, sowie die hiermit verbundenen Auswirkungen, im Rahmen des **Bewertungsmoduls** zu evaluieren. Die Grundlage des Moduls bildet die Entwicklung eines Algorithmus zur Reihenfolgebildung, der auf die ermittelten Fließbandabstimmungen ausgerichtet ist. Nachfolgend gilt es die Produktionsprogramme zu erzeugen, hinsichtlich derer eine Optimierung der Reihenfolge zu ermitteln ist. Hierzu werden durch systematische Variation des Variantenmix sowie der verfügbaren Ausstattungsoptionen Szenarien gebildet und entsprechende Produktionsprogramme abgeleitet. Die ermittelte Überlast eines Produktionsprogramms stellt das planungsrelevante Ergebnis der Reihenfolgebildung dar. Die Anpassung der Zielkriterien (der Greenfield-Kosten sowie der Wandlungsfähigkeit) erfolgt durch einen Kostenaufschlag zur Kompensation von Überlast. Der hierzu zu ermittelnde Aufschlag wird durch eine Monetarisierungsfunktion der Überlast spezifisch je Lösung des Fließbandabstimmungsproblems bestimmt. Das Flexibilitätszielkriterium im Optimierungsmodul stellt eine mathematische Größe dar, die keine Interpretation hinsichtlich des Flexibilitätskorridors einer Fließbandabstimmung erlaubt und daher durch eine Flexibilitätskennzahl ersetzt wird. Zur Ermittlung der Flexibilitätskennzahl einer Fließbandabstimmung wird geprüft, für welche Variationen des Variantenmix zulässige Auftragsreihenfolgen erzeugt werden können. Je stärker der Variantenmix dabei variiert werden kann, desto höher ist die Flexibilität der Fließbandabstimmung zu bewerten. Das Ergebnis dieser Prüfungen wird durch die Bewertung definierter Kriterien in eine Flexibilitätskenn-

zahl überführt. Als Ergebnis des Bewertungsmoduls liegen die um die Kosten der Überlastkompensation ergänzten Bewertungen der Greenfield-Kosten und Wandlungsfähigkeit sowie die Flexibilitätskennzahl als überarbeitete Zielkriterien vor.

Das **Entscheidungsmodul** bildet den abschließenden Baustein der Methodik und dient der Auswahl von durch das Optimierungsmodul generierten und das Bewertungsmodul evaluierten Fließbandabstimmungen. Die Greenfield-Kosten sowie die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit bilden die Entscheidungskriterien des Auswahlproblems. Dieses wird durch das Multi-Attribute-Decision-Model TOPSIS aufbereitet und gelöst. Als Ergebnis des Entscheidungsmoduls liegt ein parametrisiertes Auswahlproblem vor, durch das je nach Präferenzfunktion des Entscheiders eine geeignete veränderungsfähige Fließbandabstimmung identifiziert werden kann.

5 Gestaltung veränderungsfähiger getakteter Fließmontagesysteme

Nachfolgend der zusammenfassenden Darstellung des Lösungsansatzes in Kapitel 4 erfolgt nun dessen detaillierte Vorstellung in drei Teilmodulen. Im Optimierungsmodul (Kapitel 5.1) erfolgt die Konzepterstellung und Formulierung der Zielfunktionen und Nebenbedingungen des Optimierungsproblems einer veränderungsfähigen Fließbandabstimmung. Im darauffolgenden Bewertungsmodul (Kapitel 5.2) wird ein Konzept erläutert, um die Ausprägung von Veränderungsfähigkeit der in Kapitel 5.1 identifizierten Lösungen hinsichtlich Kosten, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit zu evaluieren. Abschließend wird im Rahmen des Entscheidungsmoduls (Kapitel 5.3) die Parametrisierung eines Mehrzielauswahlmodells zur Identifikation einer präferierten Lösung beschrieben.

5.1 Optimierungsmodul

Im Rahmen des Optimierungsmoduls wird das Konzept der Veränderungsfähigkeit in den Kontext der Fließbandabstimmung übertragen und in die Formulierung des Optimierungsproblems integriert.

5.1.1 Annahmen

Zur Formulierung des Optimierungsmodells einer veränderungsfähigen Fließbandabstimmung werden folgende Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

1. **Zyklenfreie und konvergierende Montagevorrangbeziehungen:** Zyklische oder divergierende Montagevorrangbeziehungen werden von der Betrachtung ausgeschlossen.
2. **Diskrete Bearbeitungszeit:** Die Bearbeitungszeit eines Arbeitsvorgangs wird durch einen diskreten Wert beschrieben. Lerneffekte in der frühen Phase nach Produktionsanlauf werden als vernachlässigbar betrachtet.

3. **Betriebsmittel:** Die eingesetzten Betriebsmittel unterscheiden sich durch ihren Funktionsumfang. Vereinfachend werden die Bearbeitungszeiten von Arbeitsvorgängen als unabhängig von der Betriebsmittelauswahl ausgenommen. Zudem weisen alle Betriebsmittel eine einhundertprozentige Verfügbarkeit auf und die physische Reallokation von Betriebsmitteln erfolgt gleichzeitig.
4. **Bandvorlauf:** Der Bandvorlauf beschreibt eine Erhöhung der Fließbandgeschwindigkeit um voraussichtliche Störungsdauern auszugleichen (Kratzsch 2000). Aufgrund der einhundertprozentigen Verfügbarkeit der Betriebsmittel wird kein Bandvorlauf benötigt und die Taktzeit aller Stationen konstant gehalten.
5. **Fließband:** Die Fließbandabstimmung umfasst ausschließlich Montagestationen. Technikstationen zur Umlagerung des Fahrzeugs sowie Pufferstationen werden von der Betrachtung ausgeschlossen.
6. **Ausbringungsmenge:** Die Ausbringungsmenge des Montagesystems pro Zeit ist konstant. Eine etwaige Stückzahlanpassung ist über die Betriebsnutzungszeit zu realisieren.
7. **Werker-Laufgeschwindigkeit:** Die Zeit, die ein Werker nach Abschluss der Montagetätigkeit an einem Fahrzeug zum Stationsanfang zurück benötigt, wird als vernachlässigbar betrachtet. Werker bewegen sich daher mit unendlicher Geschwindigkeit.

5.1.2 Modellierung des Fließmontagesystems

Der organisatorische Aufbau des Fließmontagesystems erfolgt in einer hierarchischen Struktur (vgl. Abbildung 5.1). Die oberste Hierarchieebene bildet die Montagestation $k \in K$, innerhalb der die Taktzeit C zur Bearbeitung der zugewiesenen Arbeitsvorgänge $i \in I$ zur Verfügung steht. Der Station untergeordnet ist die Ebene der Arbeitsplätze $j \in J$. Die maximale Anzahl der Arbeitsplätze pro Station wird über alle Stationen als konstant beschrieben. Dabei ist zu beachten, dass kein Zwang zur Nutzung aller Arbeitsplätze besteht, wobei ungenutzte Arbeitsplätze in der Kostenbewertung entsprechend berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 5.1.6.1). Wird für die Anzahl der Arbeitsplätze ein Wert größer als 1 definiert, so wird hierdurch die parallele Durchführung von Montagetätigkeiten ermöglicht. Dabei ist zu beachten, dass die Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu unterschiedlichen Arbeitsplätzen einer Montagestation, die zeitgleich bei identischer Karosserieansprache oder bei Bestehen einer Reihenfolgerestriktion durchgeführt werden, zur Unzulässigkeit der Fließbandabstimmung führt.

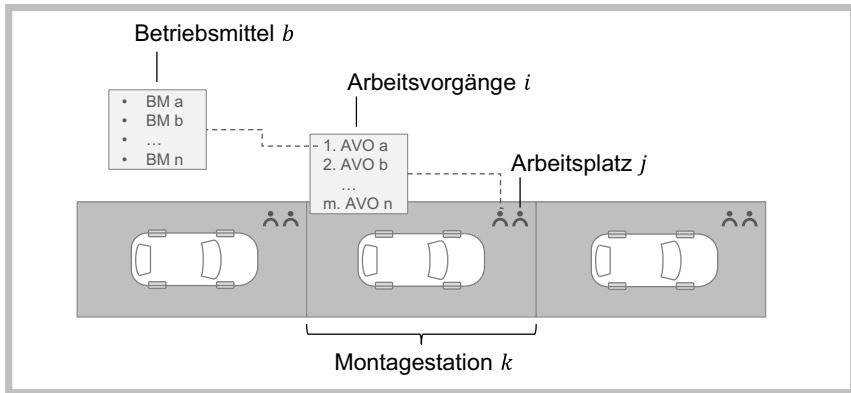


Abbildung 5.1: Übersicht der Struktur des Fließmontagesystems

Jedem Arbeitsplatz wird eine geordnete Menge an Arbeitsvorgängen zugewiesen, welche innerhalb der definierten Taktzeit durchzuführen sind. Ist eine Parallelisierung von Montagetätigkeiten an einer Station nicht möglich, so existieren an dieser Station keine parallelen Arbeitsplätze und entsprechende Arbeitsvorgänge werden der darauffolgenden Station zugeordnet. Zur Durchführung von Arbeitsvorgängen können Betriebsmittel $b \in B$ erforderlich sein. Diese werden über einen Arbeitsvorgang einem Arbeitsplatz zugewiesen. Werden Arbeitsvorgänge im Rahmen der Änderung der Fließbandabstimmung neu alloziert, so kann hierdurch implizit sichergestellt werden, dass die Betriebsmittel ebenfalls in der Neuallokation berücksichtigt werden.

5.1.3 Einführung der Veränderungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen

Nachdem die Modellierung des Fließmontagesystems abgeschlossen ist, gilt es die Veränderungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen dieser Montagesysteme zu beschreiben. Dies stellt die Basis zur Umsetzung der Veränderungsfähigkeit als Zielfunktion in der mathematischen Optimierung von Fließbandabstimmungen dar.

5.1.3.1 Übersicht

Die Aufgabe des Automobilmontagesystems ist die vollständige Bearbeitung des Produktionsprogramms im dafür vorgesehenen Zeithorizont. Wirkt ein Veränderungsimpuls (vgl. Kapitel 2.2.2) auf ein Unternehmen, so kann hierauf mit einer Anpassung des

Produktionsprogramms reagiert werden. Werden dabei Veränderungen im Variantenmix vorgenommen, neue Varianten integriert oder Veränderungen der Betriebsmittel erforderlich, so entsteht das Risiko, diese Veränderungen nicht mit der installierten Fließbandabstimmung umsetzen zu können. Dieses Risiko wird nachfolgend als Montagerisiko bezeichnet. Der vorliegende Ansatz verfolgt die Zielstellung, das Montagerisiko durch eine veränderungsfähige Fließbandabstimmung zu verringern. Hierbei werden die Konzepte der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit als Bestandteile der Veränderungs-fähigkeit (vgl. Kapitel 2.2.2) separat fokussiert.

Die Entstehung von Montagerisiko wird im vorliegenden Ansatz auf zwei Ursachen zurückgeführt: Schwankungen im Variantenmix und Veränderung der Produktionsprogrammbreite. Schwankungen im Variantenmix können durch einen Zeitpuffer der Bearbeitungszeit kompensiert werden. Je größer der Zeitpuffer, desto größere Schwankungen können dabei kompensiert werden. Entspricht der Zeitpuffer einer Auslegung auf den Maximaltyp, so erlaubt die Fließbandabstimmung die erfolgreiche Montage aller möglichen Variantenmischverhältnisse (vgl. Kapitel 2.1.4.2). Die Eigenschaft multiple Variantenmischverhältnisse ohne entstehende Wandlungsaufwände montieren zu können, entspricht dem Flexibilitätsbegriff nach Zäh, Möller & Vogl (2005), nachdem Flexibilität die Eigenschaft eines Systems beschreibt, seinen Output zu verändern ohne sich selbst zu verändern und wird nachfolgend als **Flexibilität der Fließbandabstimmung** bezeichnet. Werden Änderungen der Produktionsprogrammbreite des Montagesystems vorgenommen, so entspricht dies einer Abnahme oder Zunahme der Variantenanzahl und der zugehörigen Arbeitsvorgängen. Eine Abnahme der Variantenanzahl beeinträchtigt das Montagerisiko nicht, da lediglich Anforderungen an das Montagesystem aufgelöst werden. Die Zunahme von Varianten kann sich jedoch auf das Montagerisiko auswirken, indem zusätzliche Arbeitsvorgänge durchzuführen sind oder bestehende Arbeitsvorgänge variantenspezifische Betriebsmittel oder zusätzliche Montagezeit erfordern. Die zusätzliche Montagezeit für bestehende Arbeitsvorgänge kann durch entsprechende Flexibilität vorgehalten werden. Hinsichtlich zusätzlicher Arbeitsvorgänge oder Betriebsmittel ist die Flexibilität jedoch nicht ausreichend. Es ist ein Umbau des Montagesystems erforderlich, der möglichst kostengünstig durchzuführen ist. Die Eigenschaft, die Fließbandabstimmung zu möglichst geringen Kosten anzupassen, wird nachfolgend als **Wandlungsfähigkeit der Fließbandabstimmung** bezeichnet.

Zur Verdeutlichung des Zusammenhangs von Montagerisiko und Flexibilität sowie der Wandlungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen wird das Montagerisiko entsprechend Abbildung 5.2 in zwei Klassen eingeteilt. Das unsystematische Risiko beschreibt den Teil des Montagerisikos, der durch eine höhere Flexibilität, also die Beherrschung einer steigenden Anzahl an Variantenmischverhältnissen, eliminiert werden kann. Dementgegen kann die Anforderung, neue Arbeitsvorgänge oder Betriebsmittel zu integrieren, nicht durch Flexibilität erfüllt werden, womit dieser Teil als systematisches Risiko bezeichnet wird. Eine wandlungsfähige Ausgestaltung des Montagesystems unterstützt jedoch den Aufwand zur Anpassung des Montagesystems bei Eintreten des systematisch induzierten Risikos ebenso wie bei Eintreten des unsystematischen Risikos. Im Gegensatz zum Konzept der Flexibilität wirkt die Wandlungsfähigkeit somit a posteriori.

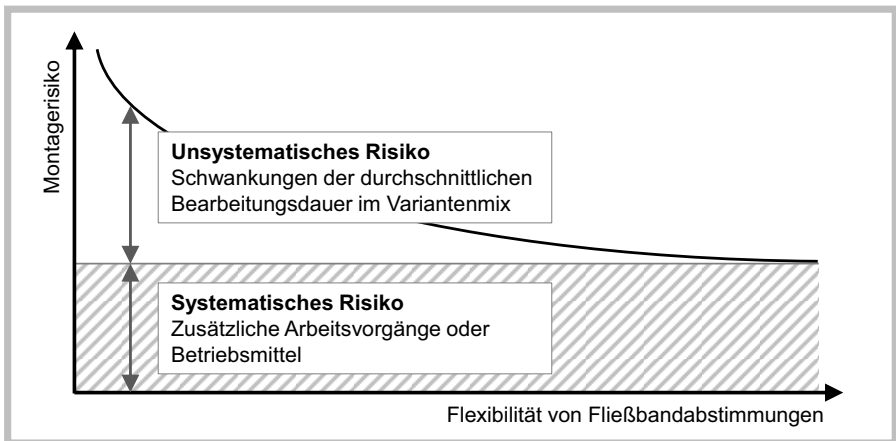


Abbildung 5.2: Systematischer und unsystematischer Teil des Montagerisikos

5.1.3.2 Lösungsraum veränderungsfähiger Fließbandabstimmungen

Die Veränderungsfähigkeit des modellierten Montagesystems entsteht durch eine geeignete Allokation von Arbeitsvorgängen zu Arbeitsplätzen sowie der entsprechenden Auswahl von Betriebsmitteln.

Um Flexibilität auf der Ebene der Arbeitsvorgänge herzustellen, lassen sich zwei Ansätze unterscheiden, die beide die Zielstellung verfolgen, einen Zeitpuffer der Bearbei-

tungszeit herzustellen. Zum einen kann davon ausgegangen werden, dass bei der Allokation von Arbeitsvorgängen Taktzeitverluste entstehen, falls die zur Verfügung stehende Taktzeit nicht vollständig ausgenutzt wird. Es gilt daher, entsprechende Zeitpuffer in Form von Taktzeitverlusten den Arbeitsplätzen mit hoher Zeitspreizung zuzuordnen. Zum anderen kann ein Zeitpuffer bei der Erzeugung des Variantenmischgraphen auf die gemittelte Bearbeitungszeit aufgeschlagen werden. Die Wandlungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen beschreibt den Aufwand zur Reallokation aller Arbeitsvorgänge, der zur Anpassung an eine Veränderung im Produktionsprogramm erforderlich ist. Hierunter fällt neben der organisatorischen Planung auch die physische Anpassung der Betriebsmittelallokation am Montageband.

Eine hohe Flexibilität von Betriebsmitteln wird durch die Überdimensionierung in Funktion, Leistung oder Genauigkeit beschrieben, um somit eine Veränderung von Anforderungen a priori zu berücksichtigen (Denkena & Drabow 2005). Wird die Wandlungsfähigkeit von Betriebsmitteln fokussiert, so ist diese einerseits funktionell erweiterbar zu gestalten (Foith-Förster & Bauernhansl 2015) und andererseits durch einen geeigneten Algorithmus im Bedarfsfall aufwandsminimal zu reallozieren (Yang, Gao & Sun 2013).

Die flexible und wandlungsfähige Ausgestaltung der Allokation von Arbeitsvorgängen und die geeignete Auswahl von Betriebsmitteln stellen somit den Lösungsraum veränderungsfähiger Fließbandabstimmungen dar und werden nachfolgend beschrieben.

5.1.4 Flexibilität von Fließbandabstimmungen

Das methodische Vorgehen zur Ausgestaltung einer angemessenen Flexibilität des Montagesystems gliedert sich in zwei Schritte. Die Zielsetzung des ersten Schritts (Kapitel 5.1.4.1) besteht in der Identifikation eines geeigneten Bearbeitungszeitpuffers bei der Bildung des Variantenmischgraphen. Im zweiten Schritt (Kapitel 5.1.4.2) gilt es das Optimierungsproblem der Fließbandabstimmung derart zu gestalten, als dass Taktzeitverluste als Zeitpuffer für zeitvolatile Arbeitsvorgänge dienen. Die Flexibilität von Betriebsmitteln liegt in der Überdimensionierung von Eigenschaften und entscheidet im Wandlungsfall über zusätzliche Investitionen. Daher wird hierfür auf die Systematik der Wandlungskosten in Kapitel 5.1.5.2 verwiesen.

5.1.4.1 Zeitaufschlag der Bearbeitungszeit

Da die Bearbeitungszeiten von Arbeitsvorgängen durch diskrete Werte beschrieben sind, besteht hinsichtlich der Bildung von Mischgraphen eine diskrete Verteilung von

Bearbeitungszeiten. Die Vereinigung von Montagevorranggraphen erfordert einen repräsentativen Durchschnittswert dieser Verteilung. Dieses Vorgehen erweist sich jedoch dann als nachteilig, wenn die tatsächliche Ausprägung des Produktionsprogramms gegenüber dem geplanten Produktionsprogramm einen größeren Anteil überdurchschnittlicher Bearbeitungszeiten aufweist und somit ungeplante Überlast entsteht. Wird der durchschnittlichen Bearbeitungszeit eines Arbeitsvorgangs eine zusätzliche Pufferzeit aufgeschlagen, so erhöht sich damit die Wahrscheinlichkeit der Vermeidung von Überlast und somit der vollständigen Herstellbarkeit des Produktionsprogramms. Nachfolgend gilt es daher ein geeignetes Maß des Zeitaufschlags zu definieren.

Diskussion bestehender Ansätze

Im Stand der Forschung werden explizit Ansätze zu spezifischen Teilproblemen ausklammert. Ansätze, die sich mit Zeitpuffern beschäftigen, werden daher an dieser Stelle diskutiert.

Einheitlicher Zeitpuffer: Zur Bildung von Mischgraphen wird typischerweise eine durchschnittliche Bearbeitungszeit von Arbeitsvorgängen gebildet. Zur Vermeidung von Überlast kann ein hierbei einheitlicher Zeitpuffer aufgeschlagen werden (Roscher 2008). Dieses Vorgehen vernachlässigt die spezifische Zeitspreizung von Arbeitsvorgängen und wird daher nicht weiter verfolgt.

Bandvorlauf: Einen ähnlichen Ansatz stellt der Bandvorlauf dar. Hierbei wird mit einer erhöhten Bandgeschwindigkeit geplant, um eventuelle Störzeiten ausgleichen zu können (Kratzsch 2000). Dieser Ansatz entspricht einer Reduktion der verfügbaren Taktzeit und kann somit ebenfalls zur Vermeidung von Überlast dienen. Analog dem einheitlichen Zeitpuffer vernachlässigt jedoch auch der Bandvorlauf die spezifische Zeitspreizung von Arbeitsvorgängen und wird daher nicht weiter berücksichtigt.

Min-Max: Eine Möglichkeit die Herstellbarkeit des Produktionsprogramms abzusichern ist die Anwendung von min-max-Ansätzen (auch: absolute Robustheit). Diese Ansätze verfolgen die Zielstellung, die beste Lösung für das nachteiligste Szenario zu identifizieren. Eine Übersicht exemplarischer Anwendungen liefern hierzu Aissi, Bazgan & Vanderpooten (2009). Entspricht die Ausprägung des nachteiligsten Szenarios einer vollständigen Fokussierung auf die Variante der höchsten Bearbeitungszeit, so entspricht dies einer vollständigen Eliminierung der Entstehung von Überlast. Somit können keine Vorteile durch Vermeidung von ungenutzter Taktzeit entstehen. Die Anwendung eines min-max-Ansatzes wird daher abgelehnt.

Erwartungswert: Der Ansatz nach Boysen (2005) erweitert diese Grundidee und zielt darauf ab, die Einhaltung der Taktzeit für ein zu definierendes Wahrscheinlichkeitsniveau sicherzustellen. Der Zeitaufschlag errechnet sich hierbei auf Grundlage der szenariobasierten Erwartungswerte der Anteile im Variantenmix, wobei die Unsicherheit der prognostizierten Anteile jedoch nicht berücksichtigt wird. Die Qualität der prognostizierten Erwartungswerte ist allerdings von wesentlicher Bedeutung für die Fließbandabstimmung (Halubek 2012).

Um die Unsicherheit des zukünftigen Variantenmix angemessen zu berücksichtigen, wird daher ein Vorgehen entwickelt, das sowohl den Erwartungswert als auch die Varianz der Anteile im Variantenmix einbezieht.

Vorgehen zur Bestimmung einer repräsentativen Bearbeitungszeit

Die Ausgestaltung der Fließbandabstimmung richtet sich wesentlich nach dem zu produzierenden Produktionsprogramm, welches den prognostizierten zukünftigen Variantenmix enthält (Kern, Rusitschka & Bauernhansl 2016). Im Rahmen der Entwicklung von Szenarien wird eine konkrete Ausprägung des Variantenmix als Betriebspunkt bezeichnet. Durch strategische Entscheidungen, wie bspw. der Aufteilung des Produktionsprogramms auf mehrere Linien oder Werke, kann ein Betriebspunkt auch unter Veränderung der Kundennachfrage konstant gehalten werden (Fisel et al. 2018). Hierdurch wird die Forderung nach Flexibilität des Produktionssystems eingeschränkt. Liegen keine strategischen Entscheidungen vor, die eine Fixierung des Produktionsprogramms ermöglichen, so ist die Fließbandabstimmung hinsichtlich eines unsicheren Produktionsprogramms vorzunehmen. Besonders in Variantenmontagesystemen, in denen sich die Varianten in unterschiedlichen Produktlebenszyklen befinden, sind Veränderungen im Variantenmix zu berücksichtigen (Krüger 2004). Hierzu kann durch eine Szenarioanalyse¹⁸ eine Möglichkeit zur Orientierung geschaffen werden (Scholl 2001).

Zur Beschreibung von Betriebspunkten in Szenarien werden folgende Anforderungen definiert: Der Betriebspunkt beschreibt die Anteile der Varianten am Variantenmix mit einem Erwartungswert. Weiterhin ist die Unsicherheit von Prognosen des Betriebspunktes zu berücksichtigen sowie die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine Entwicklung

¹⁸ Die Szenarioanalyse steht nicht im Fokus des Ansatzes. Für weitere Informationen zu Methoden und Werkzeugen zur Szenarioanalyse sei auf Gausemeier, Fink & Schlake (1995) verwiesen.

hin zu diesem Betriebspunkt zu definieren. Hierzu ist anwendungsfallbezogen eine geeignete Verteilungsfunktion zu wählen. So eignen sich beispielsweise links- bzw. rechtsschiefe Verteilungen um asymmetrische Unsicherheit abzubilden (Rosenkranz & Missler-Behr 2005). Nachfolgend wird aus Gründen der Einfachheit von einer Normalverteilung der Unsicherheit ausgegangen, wobei ein Betriebspunkt durch einen Erwartungswert $EW(Z) = \mu$ und dessen Varianz $Var(Z) = \sigma^2$ einer Zufallsvariablen Z beschrieben wird (Bleymüller et al. 2015). Der Erwartungswert bezeichnet hierbei den wahrscheinlichsten Anteil einer Variante im Variantenmix, wohingegen die Varianz die Streuung der Wahrscheinlichkeitsdichte des Anteils kennzeichnet. Somit kann der Betriebspunkt stochastisch modelliert werden, wobei Unsicherheit durch die Normalverteilung symmetrisch berücksichtigt wird. Die Dichtefunktion des Betriebspunktes einer Variante ergibt sich damit nach Formel 5.1 (Bleymüller et al. 2015).

$$S_V(Z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \forall Z \in \mathbb{R}; \mu \in \mathbb{R}; \sigma > 0 \quad (5.1)$$

Im Rahmen der Erzeugung von Szenarien ist darauf zu achten, dass die Erwartungswerte der Variantenanteile in Summe einhundert Prozent ergeben. Abbildung 5.3 stellt exemplarische, durch eine Szenarioanalyse ermittelte Dichtefunktionen unter normalverteilter Modellierung eines Produktionsprogramms mit drei Varianten dar.

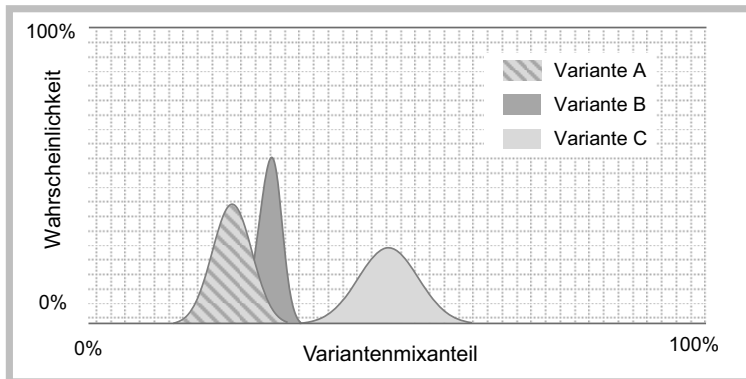


Abbildung 5.3: Exemplarische Dichtefunktionen normalverteilter Variantenmixanteile

Nachdem die Modellierung der Vorausschau des Variantenmix abgeschlossen ist, kann auf dieser Basis die Bearbeitungszeit inklusive des Zeitaufschlags t_{robust} bei der Bildung des Variantenmischgraphen bestimmt werden. Die hierzu notwendigen Schritte

abseits der Bestimmung des Zeitaufschlags können Kapitel 2.1.4.2 entnommen werden. Der Ansatz zur Bestimmung von t_{robust} zielt darauf ab, Unsicherheit über den Betriebspunkt zum ungünstigsten Fall, also des höchsten Anteils der Variante mit der längsten Bearbeitungszeit, umzuverteilen. Das hierzu entwickelte Vorgehen ist in Anlehnung an Fisel et al. (2018) als Pseudocode in Abbildung 5.4 dargestellt und wird nachfolgend für einen Variantenmix von Antriebskonzepten $dc \in DC$ beschrieben.

```

initialize all parameters
(1) repeat
    lower bounddc = max(expected sharedc - Variancedc, 0)
    upper bounddc = min(expected sharedc + Variancedc, 100)
    slackdc = upper bounddc - lower bounddc
    sharedc = lower bounddc
until all variants processed
(2) build list of variants by descending assembly times
(3) slacktotal =  $\sum$  slackdc
(4) repeat
    select variant with highest rank
    if (slacktotal < slackdc) then
        slackdc = slacktotal
    end if
    sharedc = sharedc + slackdc
    trobust,dc = sharedc * assembly timedc
    slacktotal = slacktotal - slackdc
    remove variant from list
until all variants removed
(5) trobust =  $\sum$  trobust,dc

```

Abbildung 5.4: Algorithmus zur szenariospezifischen Anpassung der Bearbeitungszeit von Arbeitsvorgängen (in Anlehnung an Fisel et al. (2018))

(1) Der erste Schritt dient zur Bestimmung der Initialwerte der Hilfsvariablen. Für jedes Antriebskonzept dc wird der Mindestanteil im Modellmix *lower bound* festgelegt, der zur Gewichtung der spezifischen Bearbeitungszeit des Arbeitsvorganges dient. Dieser wird durch den Erwartungswert definiert, von dem der Wert der Varianz als Maß der Unsicherheit subtrahiert wird. Weiterhin wird analog dem beschriebenen Vorgehen der Maximalanteil im Modellmix *upper bound* festgelegt. Die Differenz aus Maximal- und Minimalanteil je Antriebskonzept stellt den Schlupf im Modellmix *slack* dar. Abschließend wird der Anteil des betreffenden Antriebskonzepts auf den Minimalanteil gesetzt. Hierbei ist zu beachten, dass die Summe der Anteile $share_{dc}$ kleiner als 100% ist.

(2) Um eine Worst-Case-Bestimmung durchführen zu können, gilt es nachfolgend eine geordnete Liste zu erstellen, die alle Antriebskonzepte in absteigender Reihenfolge ihrer Bearbeitungszeiten des betreffenden Arbeitsvorgangs darstellt.

(3) Die Summe der Schlupfanteile über alle Antriebskonzepte $slack_{total}$ wird gebildet.

(4) Nachfolgend wird der Schlupf anhand der geordneten Liste verteilt. Dabei wird der Anteil des Antriebskonzepts mit der höchsten Bearbeitungszeit bis zum Maximalanteil aufgefüllt. Der verbleibende Gesamtschlupf reduziert sich daher um den spezifischen Schlupf und der antriebskonzeptsspezifische Anteil an der Taktzeit kann durch Multiplikation der spezifischen Bearbeitungszeit mit dem spezifischen Anteil als Gewichtungsfaktor errechnet werden. Dieses Vorgehen wird für alle Antriebskonzepte der geordneten Liste in absteigender Reihenfolge durchgeführt bis der Gesamtschlupf aufgebraucht ist. Die antriebskonzeptsspezifischen Anteile ergeben in Summe nun 100 %.

(5) Abschließend kann die repräsentative Bearbeitungszeit t_{robust} durch Aufsummieren der antriebskonzeptsspezifischen Bearbeitungszeiteile bestimmt werden. Mit der Identifikation des arbeitsvorgangsspezifischen Zeitaufschlags ist die Bildung des Mischgraphen und somit der erste Schritt der Flexibilitätsgestaltung abgeschlossen.

5.1.4.2 Gestaltung des Optimierungsproblems

Nachfolgend wird der zweite Schritt der Flexibilitätsgestaltung beschrieben. Die Fließbandabstimmung unter Anwendung planungsunterstützender Operations Research-Methoden erfolgt durch Maximierung oder Minimierung des Funktionswertes einer oder mehrerer Zielfunktionen (vgl. Kapitel 2.3.2). Daher wird die Anforderung der Flexibilität in ein geeignetes Zielkriterium transformiert. Wird die Anforderung der Flexibilität auf die Allokation von Arbeitsvorgängen zu Stationen übertragen, so kann dies als Vermeidung von Überlast interpretiert werden. Da diese jedoch nur im Rahmen der Reihenfolgeplanung exakt zu bestimmen ist (vgl. Kapitel 2.1.4.2), stellt ein Flexibilitätszielkriterium eine Repräsentanz der Überlast dar, die maximiert oder minimiert werden kann. Die Kernursache von Überlast sind variantenspezifische Bearbeitungszeiten. Werden einem Arbeitsplatz mehrere Arbeitsvorgänge mit variantenspezifischer Bearbeitungszeit alloziert, stellt sich die Frage nach der Auswirkung auf die aggregierte Bearbeitungszeit des Arbeitsplatzes. Gilt die Annahme, dass die Bearbeitungszeit eines Arbeitsvorgangs nicht von der Bearbeitungszeit weiterer Arbeitsvorgänge desselben Arbeitsplatzes abhängig ist, so entspricht dies stochastischer Unabhängigkeit der Arbeits-

vorgänge. Diese Annahme wird jedoch abgelehnt, da die Abhängigkeit zwischen Arbeitsvorgängen in der Automobilindustrie, bspw. durch die Bildung von Ausstattungspaketen¹⁹, gegeben ist. Es gilt daher, Arbeitsvorgänge durch eine entsprechende Zuordnung derart den Arbeitsplätzen zu allozieren, als dass der Einfluss von Schwankungen im Variantenmix auf die Einhaltung der Taktzeit minimiert wird.

Diskussion bestehender Ansätze

In der Literatur sind Ansätze zur Gestaltung flexibilitätsbezogener Zielkriterien bekannt, die nachfolgend auf deren Eignung geprüft werden.

Gleichmäßige Variantenverteilung: Nach Thomopoulos (1970) kann Überlast reduziert werden, indem die gesamte Bearbeitungszeit jeder Variante möglichst gleichmäßig auf die Montagestationen verteilt wird. Dieser Ansatz berücksichtigt die arbeitsvorgangsspezifische Zeitspreizung nur indirekt und vernachlässigt die stochastische Abhängigkeit von Arbeitsvorgängen.

Gleichmäßige Auslastung: Ein vergleichsweise einfacher Ansatz besteht in der Forderung nach variantenübergreifender, gleichmäßiger Auslastung der Montagestationen (Rachamadugu & Talbot 1991). Dieser Ansatz wird von Yang, Gao & Sun (2013) auf eine quadratische Bestrafung der Leerzeit je Montagestation erweitert. Der hierdurch erzielte Glättungseffekt beruht dabei jedoch auf durchschnittlichen Bearbeitungszeiten.

Vermeidung variantenbedingter Schwankungen: Je Montagestation soll die varianteninduzierte Abweichung der Bearbeitungszeit von einem Durchschnittswert minimiert werden (Matanachai & Yano 2001). Dieser Ansatz berücksichtigt variantenspezifische Bearbeitungszeiten, jedoch nicht die stochastische Abhängigkeit der Arbeitsvorgänge.

Trennung korrelierter Arbeitsvorgänge: Altemeier (2009) verfolgt den Ansatz, Arbeitsvorgänge, die häufig zusammen auftreten, unterschiedlichen Stationen zuzuordnen. Hierdurch wird eine Glättung angestrebt, da sich die Bearbeitung von Werkstücken somit auf mehrere Stationen verteilt. Andererseits sind sich gegenseitig ausschließende Arbeitsvorgänge derselben Station zuzuordnen, um ebenfalls eine Glättung zu ermöglichen. Das Auflösen des Auslastungsgefälles wird jedoch nicht im Rahmen einer ma-

¹⁹ Ausstattungspakete bezeichnen ein Bündel von Produktzugaben die gemeinsam angeboten werden und sich meist auf einen spezifischen Bereich des Automobils beziehen. Typische Beispiele sind nach Zerres & Hünerberg (2011) Unterhaltungs- oder Sicherheitspakete.

thematischen Optimierung, sondern in einem nachgelagerten Prozessschritt durchgeführt. Hierzu ist festzustellen, dass die individuelle Höhe der Bearbeitungszeitspreizung unberücksichtigt bleibt. Die Information der arbeitsvorgangsspezifischen Varianz wird somit nicht in die Modellbildung einbezogen.

Absolute Obergrenze: Die maximale absolute Anzahl von Arbeitsvorgängen mit Zeitspreizung je Montagestation ist ein einheitlicher Wert für alle Montagestationen (Hazır & Dolgui 2013). Dieser Wert ist durch eine mathematische Optimierung zu minimieren. Aufgrund der Vernachlässigung der arbeitsvorgangsspezifischen Zeitspreizung wird dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

Relative Obergrenze: Hazır & Dolgui (2013) präsentieren einen weiteren Ansatz, der eine maximale relative Anzahl von Arbeitsvorgängen mit Zeitspreizung je Montagestation fokussiert. Die relative Anzahl wird in der Zielfunktion der mathematischen Optimierung als Bestrafungsterm verwendet. Die Kritik des Ansatzes entspricht der Kritik des Ansatzes mit absoluter Obergrenze.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass vielfältige Ansätze zur Gestaltung flexibilitätsbezogener Zielkriterien existieren. Wird jedoch die Abhängigkeit der Arbeitsvorgänge fokussiert, so konnte hierzu nur der Ansatz nach Altemeier (2009) identifiziert werden. Hierbei ist anzumerken, dass die Auswirkungen der stochastischen Abhängigkeit von Arbeitsvorgängen auf die aggregierte Bearbeitungszeit eines Arbeitsplatzes durch keinen Ansatz explizit modelliert wurden. Eine mögliche Ursache hierfür wird darin vermutet, dass sich die Varianz auf Ebene der Arbeitsplätze erst durch die Allokation von Arbeitsvorgängen ergibt. Somit ist die Varianz jedes Arbeitsplatzes entweder im Rahmen der mathematischen Optimierung zur Laufzeit zu errechnen oder aus einer verfügbaren Datenbasis zu beziehen. Dies setzt die a priori Berechnung der Varianz jeder möglichen Zuordnungskombination der Arbeitsvorgänge voraus und erscheint daher, speziell für große Probleminstanzen, ungeeignet.

Um die arbeitsvorgangsspezifische Zeitspreizung sowie die stochastische Abhängigkeit der Arbeitsvorgänge adäquat zu berücksichtigen, wird daher die Varianz der aggregierten Bearbeitungszeit eines Arbeitsplatzes als Zielkriterium verwendet. Durch eine geeignete Formulierung soll die hierfür benötigte Berechnung der Varianz zur Laufzeit geleistet werden.

5.1.5 Wandlungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen

Nachdem in den Kapiteln 5.1.3.1 und 5.1.3.2 die konzeptionelle Grundlage der Wandlungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen gelegt wurde, wird diese nun ausdetailliert. Hierzu wird einleitend der Betrachtungsumfang einer wandlungsfähigen Fließbandabstimmung beschrieben.

5.1.5.1 Betrachtungsumfang wandlungsfähiger Fließbandabstimmungen

Voneinander verschiedene Fließbandabstimmungen sind durch nicht identische Allokationen von Arbeitsvorgängen zu Stationen gekennzeichnet. Der Übergang von einer Fließbandabstimmung f_{a_A} zu einer hiervon verschiedenen Fließbandabstimmung f_{a_B} wird im Rahmen der Modellierung als Wandel bezeichnet. Dieser umfasst die Menge aller notwendigen Reallokationsvorgänge von Arbeitsvorgängen und Betriebsmitteln sowie die hieraus resultierenden Aufwände. Eine wandlungsfähige Gestaltung der Fließbandabstimmung verfolgt die Zielstellung diese Aufwände zu minimieren.

Diskussion bestehender Ansätze

Die Gestaltung einer wandlungsfähigen Fließbandabstimmung kann somit auf das Problem der Reallokation von Arbeitsvorgängen zurückgeführt werden. Daher werden nachfolgend Ansätze, die sich mit dieser Problemstellung beschäftigen auf ihre Eignung geprüft.

Multikriterielle Kennzahlenoptimierung: Bukchin & Tzur (2000) präsentieren einen Ansatz zur Auswahl möglichst kostengünstiger Betriebsmittel. Die monokriterielle Zielfunktion des Ansatzes beschreibt die kostenminimale Auswahl von Betriebsmitteln, welche konkurrierende Eigenschaften der Dimensionen Kosten, Flexibilität und Geschwindigkeit aufweisen. Hierbei ist zu beachten, dass Flexibilität die Eigenschaft bezeichnet für mehrere Arbeitsvorgänge geeignet zu sein. Das Konzept, eine mehrfache Verwendung von Betriebsmitteln zu erlauben wird aufgrund des hohen Realitätsbezugs als vorteilhaft bewertet. Der Ansatz bezieht sich jedoch ausschließlich auf die Allokation und nicht die Reallokation von Arbeitsvorgängen, wodurch hieraus resultierende Aufwände vernachlässigt werden.

Ähnlichkeitsindex: Die Gesamtheit der Reallokation von Arbeitsvorgängen kann durch einen Ähnlichkeitsindex bewertet werden, der die Menge der unveränderten Arbeitsvorgänge als Schnittmenge der Fließbandabstimmung vor und nach einem Wandel re-

präsentiert (Gamberini, Grassi & Rimini 2006; Gamberini et al. 2009). Da eine allgemeine Bewertung spezifischer Reallokationen im Rahmen einer Mengendarstellung nicht sinnvoll erscheint, bietet dieses Vorgehen keine Ansatzpunkte zur Entwicklung eines Bewertungsansatzes.

Expertenschätzung: Altemeier (2009) beschreibt ein zweistufiges Verfahren zur Bestimmung der Kosten einer Reallokation von Arbeitsvorgängen. Im Zuge eines Wandels wird die Fließbandabstimmung erneut für das anvisierte Szenario durchgeführt. Im Abgleich mit der ursprünglichen Fließbandabstimmung werden hieraus unterschiedliche Möglichkeiten zur Reallokation ermittelt. Nachfolgend gilt es, die hierdurch erzeugten Möglichkeiten mit den geringsten Verschiebevorgängen durch eine Expertenschätzung monetär bewerten zu lassen und somit ein Reallokationsvorgehen auszuwählen. Die erneute Fließbandabstimmung unterliegt der Restriktion, dass Betriebsmittel ortsfest sind, wodurch der Lösungsraum der Reallokation (vgl. Kapitel 5.1.3.2) eingeschränkt wird und somit potentielle Optima a priori ausgeschlossen werden.

Anzahl an Reallokationsvorgängen: Eine weitere Möglichkeit zur Bewertung eines Wandels besteht in der Minimierung der Anzahl an Reallokationsvorgängen (Maksoud, Battaia & Dolgui 2013). Diese sind uniform modelliert, wodurch Reallokationskosten nicht detailliert bewertet werden können. Eine Erweiterung dieses Ansatzes um eine individuelle Bewertung von Reallokationsvorgängen erlaubt die Bestimmung minimaler Reallokationskosten anstelle minimaler Reallokationsvorgänge.

Bearbeitungszeiten und Requalifizierungsaufwand: Die Kosten der Reallokation können durch die Summe der verlagerten Bearbeitungszeiten bewertet werden. Weiterhin können zudem die aggregierten Kosten zur gegebenenfalls notwendigen Requalifizierung der Mitarbeiter angewandt werden (Yang, Gao & Sun 2013). Die Summe der verlagerten Bearbeitungszeiten als Maß der Reallokationskosten heranzuziehen, impliziert das Vorliegen von identischen Reallokationskosten der Arbeitsvorgänge. Werden heterogene Betriebsmittel in den Prozess der Reallokation miteinbezogen, so ist dieser Ansatz nicht zielführend. Die Kosten der Requalifizierung sind nicht ausreichend um einen Wandel zu bewerten, da wesentliche Kostenfaktoren wie Kosten für Planung und Umbau nicht berücksichtigt werden.

Abschließend kann festgestellt werden, dass hinsichtlich der Reallokation von Arbeitsvorgängen und Betriebsmitteln problemspezifische Ansätze existieren. Hierbei ist fest-

zuhalten, dass die Bewertung der Reallokationskosten in keinem Ansatz detailliert modelliert wird. Daher werden diese nachfolgend modelliert und zur Implementierung in der Zielfunktion formalisiert.

5.1.5.2 Systematik der Kostenbewertung

Zur Klassifizierung der Kosten von Wandlungsvorgängen kann auf wissenschaftliche Vorarbeiten aufgebaut werden. Die Reallokation von Arbeitsvorgängen entspricht der Verlagerung von Wandlungsobjekten (vgl. Kapitel 2.2.3), sodass die Klassifizierung der Wandlungskosten in Anlehnung an Wiendahl & Heger (2004) in Wandlungsobjektkosten sowie in direkte und indirekte Wandlungsprozesskosten erfolgt. Die modulare Systematik zur Kostenbewertung wird in Abbildung 5.5 anhand der Reallokation des Arbeitsvorgangs i von Arbeitsplatz (AP) A zu Arbeitsplatz B visualisiert. Die geklammerten Werte 0 und 1 kennzeichnen dabei den Zustand vor (0) und nach dem Wandel (1).

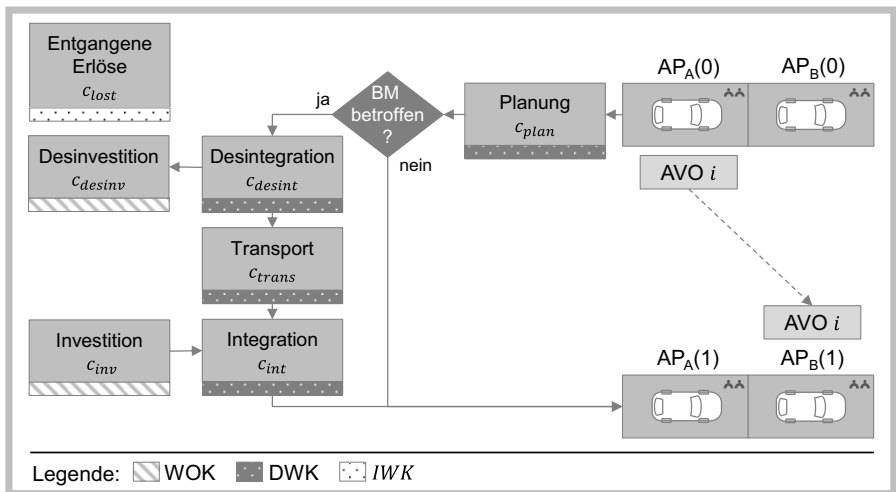


Abbildung 5.5: Modulare Systematik der Kosten eines Wandlungsvorgangs

Den Wandlungsobjektkosten (WOK) werden die Kosten der Investition c_{inv} und Desinvestition c_{desinv} in Betriebsmittel (BM) zugeordnet, wobei hinsichtlich Desinvestitionen in Abhängigkeit des Restwerts sowohl positive als auch negative Zahlungsströme entstehen können. Die direkten Wandlungsprozesskosten (DWK) beschreiben die unmittelbar mit dem Wandlungsprozess verbundenen Kosten. Diese werden durch die Kosten der Integration c_{int} , Desintegration c_{desint} , des Transports c_{trans} sowie der Planung

c_{plan} repräsentiert. Die Desintegration beschreibt das Herauslösen des Betriebsmittels aus dem Fließmontagesystem, wohingegen die Integration das Einfügen eines Betriebsmittels beschreibt. Ist ein herausgelöstes Betriebsmittel zu verschieben, so fallen hierbei die Kosten des Transports an. Durch die organisatorische Planung der Reallokation eines Arbeitsvorgangs fallen betriebsmittelunabhängige Kosten an, die unter den Kosten der Planung zusammengefasst werden. Die indirekten Wandlungsprozesskosten (IWK) umfassen die Kosten, die mittelbar durch den Wandlungsprozess entstehen. Diese Kosten werden unter den Kosten entgenerer Erlöse c_{lost} zusammengefasst.

5.1.5.3 Formalisierung der Wandlungskosten

Die identifizierten Kosten eines Wandlungsvorgangs werden nachfolgend aufgegliedert und formalisiert, um eine detaillierte Betrachtung der Wandlungskosten zu ermöglichen.

Wandlungsobjektkosten

Investition

Die Kosten der *Investition* c_{inv} beschreiben Zahlungen, die anfallen, um ein Wandlungsobjekt in den Besitz des Unternehmens zu überführen. Dies betrifft insbesondere den zu bezahlenden *Kaufpreis* c_p . Fallen Zuschläge für *Transport und Verpackung* c_{si} des Betriebsmittels an, so sind diese zusätzlich zu berücksichtigen. Weiterhin sind die Kosten der innerbetrieblichen Aufwände des *Beschaffungsprozesses* c_{or} abzubilden. Diese Kosten werden maßgeblich durch das beteiligte Personal beeinflusst. Durch die beschriebene Kostenstruktur können auch Wandlungsobjekte beschrieben werden, die in Eigenfertigung erstellt wurde. Die hierbei entstehenden Zahlungen an verantwortliche Bereiche zu Planung, Forschung und Entwicklung sowie Produktion können durch den Kaufpreis repräsentiert werden. Tabelle 5.1 fasst die beschriebenen Elemente der Wandlungsobjektkosten zusammen. (A_Hellweg 2017)

Tabelle 5.1: Wandlungsobjektkosten der Investition

Formelzeichen	Kostenart
c_{inv}	Investition
c_p	Kaufpreis
c_{si}	Transport und Verpackung
c_{or}	Beschaffungsprozess

Die Kosten der Investition in ein Betriebsmittel $c_{inv,b}$ ergeben sich nach Formel 5.2 aus der Summe der Kostenelemente und werden nach Formel 5.3 zu den Investitionskosten aufsummiert. Die Beschaffung von Betriebsmitteln $b \in B_{inv}$ unterliegt der Annahme, dass Beschaffungsvorgänge unabhängig sind und dementsprechend keine kostenseitige Interaktion der Beschaffungsvorgänge stattfindet.

$$c_{inv,b} = c_{p,b} + c_{si,b} + c_{or,b} \quad \forall b \in B_{inv} \quad (5.2)$$

$$c_{inv} = \sum c_{inv,b} \quad \forall b \in B_{inv} \quad (5.3)$$

Desinvestition

Desinvestition beschreibt den Vorgang, ein Wandlungsobjekt $b \in B_{desinv}$ zu veräußern (vgl. Tabelle 5.2). Hierbei ist festzustellen, dass sowohl ein positiver Zahlungsstrom durch einen vorliegenden Restwert c_r des Wandlungsobjekts, als auch ein negativer Zahlungsstrom durch die Entsorgung des Wandlungsobjekts, realisiert werden kann. Die anfallenden Kosten für den Abtransport und die Verpackung c_{sd} sowie die Aufwände des Entsorgungsprozesses c_{od} werden separat ausgewiesen (A_Hellweg 2017).

Tabelle 5.2: Wandlungsobjektkosten der Desinvestition

Formelzeichen	Kostenart
c_{desinv}	Desinvestition
c_r	Restwert
c_{sd}	Abtransport und Verpackung
c_{od}	Entsorgungsprozess

Die Kosten der Desinvestition c_{desinv} ergeben sich formal in Anlehnung an die Kosten der Investition nach den Formeln 5.4 und 5.5.

$$c_{desinv,b} = c_{r,b} + c_{sd,b} + c_{od,b} \quad \forall b \in B_{desinv} \quad (5.4)$$

$$c_{desinv} = \sum c_{desinv,b} \quad \forall b \in B_{desinv} \quad (5.5)$$

Direkte Wandlungsprozesskosten

Für die Beschreibung der Wandlungsprozesskosten wird ein modularer Ansatz gewählt, um unterschiedliche Ausgestaltungen von Wandlungsvorgängen abbilden zu können. Die Wandlungsprozesskosten werden hierzu in vier Kostenarten aufgeteilt: Integration, Desintegration, Verschiebung und Planung.

Integration

Die Kosten der Integration c_{int} beschreiben alle Zahlungen, die entstehen, um die Produktionsfähigkeit des Wandlungsobjekts herzustellen und es somit in das Fließmontagesystem zu integrieren (vgl. Tabelle 5.3). Hierbei fallen Kosten für die physische Integration c_{build} des Wandlungsobjekts an, die den ordnungsgemäßen Aufbau sowie die Medienanbindung umfassen. Weiterhin fallen Kosten der Inbetriebnahme c_{set} für die Einrichtung von Software und die Begleitung des Hochlaufs an. Zudem entstehen Kosten der Mitarbeiterqualifikation c_{mq} , um den ordnungsgemäßen Betrieb des Betriebsmittels mit der erforderlichen Geschwindigkeit sicherzustellen. (A_Hellweg 2017)

Tabelle 5.3: Direkte Wandlungsprozesskosten der Integration

Formelzeichen	Kostenart
c_{int}	Integration
c_{build}	Physische Integration
c_{set}	Inbetriebnahme
c_{mq}	Mitarbeiterqualifikation

Die formale Beschreibung der Integrationskosten c_{int} für alle zu integrierenden Betriebsmittel $b \in B_{int}$ findet sich in Formeln 5.6 und 5.7.

$$c_{int,b} = c_{build,b} + c_{set,b} + c_{mq,b} \quad \forall b \in B_{int} \quad (5.6)$$

$$c_{int} = \sum c_{int,b} \quad \forall b \in B_{int} \quad (5.7)$$

Desintegration

Die Kosten der Desintegration c_{desint} beschreiben das Herauslösen von Wandlungsobjekten aus dem Fließmontagesystem und bilden damit das Gegenstück der Integration (vgl. Tabelle 5.4). (A_Hellweg 2017)

Tabelle 5.4: Direkte Wandlungsprozesskosten der Desintegration

Formelzeichen	Kostenart
c_{desint}	Desintegration

Die Formel 5.8 stellt die Beschreibung der Desintegrationskosten c_{desint} aller herauszulösenden Betriebsmittel $b \in B_{desint}$ dar.

$$c_{desint} = \sum c_{desint,b} \quad \forall b \in B_{desint} \quad (5.8)$$

Transport

Die Transportkosten c_{trans} beschreiben die Kosten der örtlichen Verlagerung von Wandlungsobjekten (vgl. Tabelle 5.5). Um hierbei die physischen Merkmale von Wandlungsobjekten zu berücksichtigen, werden die Transportkosten wandlungsobjektspezifisch festgelegt. Aufgrund der vergleichsweise kurzen Verlagerungsstrecken in Fließmontagesystemen wird auf eine Modellierung der Transportkosten als Funktion der Verlagerungsstrecke verzichtet. (A_Hellweg 2017)

Tabelle 5.5: Direkte Wandlungsprozesskosten des Transports

Formelzeichen	Kostenart
c_{trans}	Transport

Die Transportkosten c_{trans} der zu verlagernden Betriebsmittel $b \in B_{trans}$ werden nach Formel 5.9 ermittelt.

$$c_{trans} = \sum c_{trans,b} \quad \forall b \in B_{trans} \quad (5.9)$$

Planung

Die Kosten der Planung c_{plan} (vgl. Tabelle 5.6) stellen eine Besonderheit dar, als dass sie auf die Reallokation von Arbeitsvorgängen anstelle von Betriebsmitteln bezogen sind (vgl. Abbildung 5.5). Sie fallen bspw. für die Planung der Schnittstellen zur Medienversorgung, zum IT-System oder zur Logistik an. Den Planungskosten ist gemein, dass sie wesentlich durch den Einsatz von Personal getrieben sind. (A_Hellweg 2017)

Tabelle 5.6: Direkte Wandlungsprozesskosten der Planung

Formelzeichen	Kostenart
c_{plan}	Planung

Die Planungskosten eines Wandels c_{plan} werden nach Formel 5.10 aus der Summe der Planungskosten $c_{plan,i}$ der neu zu allozierenden Arbeitsvorgänge $i \in I_{plan}$ bestimmt.

$$c_{plan} = \sum c_{plan,i} \quad \forall i \in I_{plan} \quad (5.10)$$

Indirekte Wandlungsprozesskosten

Entgangene Erlöse

Im Zeitraum des Wandels kann das Fließmontagesystem nicht betrieben werden, so dass keine Produkte montiert werden können. Die heraus entstehenden Opportunitätskosten c_{lost} (vgl. Tabelle 5.7) ergeben sich in Abhängigkeit der strategischen Organisation des Wandels und sind daher im Einzelfall herzuleiten. (A_Hellweg 2017)

Tabelle 5.7: Indirekte Wandlungsprozesskosten der entgangenen Erlöse

Formelzeichen	Kostenart
c_{lost}	Entgangene Erlöse

5.1.5.4 Bewertung multipler Reallokationen von Betriebsmitteln

Die Wirtschaftlichkeit der Reallokation von Betriebsmitteln ist von mehreren Faktoren abhängig. So kann bspw. das Betriebsmittel am ursprünglichen Arbeitsplatz weiterverwendet werden oder am Zielarbeitsplatz bereits vorhanden sein. Da alle Betriebsmittelbedarfe der Arbeitsplätze zu befriedigen sind, ergibt sich somit eine Interaktion multipler Reallokationen. Um die Kosten der Reallokation von Betriebsmitteln zu bestimmen, wird die Zuordnung eines geeigneten Betriebsmittels zu einem Arbeitsplatz vor und nach einem Wandlungsvorgang beschrieben. Dieser Zustand wird nachfolgend anhand der Verlagerung eines Betriebsmittels von einem Arbeitsplatz A zu einem Arbeitsplatz B untersucht (vgl. Abbildung 5.5).

Liegt eine Allokation des Betriebsmittels zu einem Arbeitsplatz vor, so ist der Status der Zuordnung wahr, ansonsten falsch. Von der näheren Betrachtung werden vorab alle Kombinationen von Zuordnungen ausgeschlossen, die einerseits kein geeignetes Betriebsmittel vor dem Wandel Arbeitsplatz A zuordnen oder kein geeignetes Betriebsmittel nach dem Wandel Arbeitsplatz B zuordnen, da hierdurch die Durchführung des Arbeitsvorgangs vor bzw. nach dem Wandel nicht möglich ist. Die verbleibenden Wandlungsfälle sind in Tabelle 5.8 dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass dies eine bilaterale Reallokation darstellt. Die Zustandsbeschreibung der Zuordnung von Betriebsmitteln vor und nach einem Wandel erlaubt einem Lösungsalgorithmus beliebige Kombinationen bilateraler Reallokation zu prüfen und ermöglicht somit die Bewertung mehrerer Reallokation.

Tabelle 5.8: Alternative Zuordnungen eines geeigneten Betriebsmittels

Vor Wandel		Nach Wandel	
A ₀	B ₀	A ₁	B ₁
wahr	wahr	wahr	wahr
wahr	wahr	falsch	wahr
wahr	falsch	wahr	wahr
wahr	falsch	falsch	wahr

Wird die Zuordnung eines geeigneten Betriebsmittels des abgebenden Arbeitsplatzes A sowohl vor als auch nach dem Wandel mit wahr gekennzeichnet, also $(A_0 \wedge A_1) = \text{wahr}$, so kann dies auf mehrere mögliche Ursachen zurückgeführt werden. Einerseits kann das Betriebsmittel am entsprechenden Arbeitsplatz verbleiben und wird nach dem Wandel zur Durchführung eines anderen Arbeitsvorganges genutzt, wobei keine Wandlungskosten entstehen. Andererseits kann eine Desintegration des Betriebsmittels mit anschließender Desinvestition oder anschließendem Transport erfolgen. Daraufhin erfolgt die Integration eines Betriebsmittels des gleichen Typs.

Kann der Wandel des abgebenden Arbeitsplatzes A durch $(A_0 = \text{wahr}) \wedge (A_1 = \text{falsch})$ beschrieben werden, so findet eine Desintegration des Betriebsmittels statt. Nachfolgend wird entweder der Transport zu einer anderen Station oder die Desinvestition des Betriebsmittels vorgenommen.

Gilt $(B_0 \wedge B_1) = \text{wahr}$ für den aufnehmenden Arbeitsplatz B, ist dies ebenfalls auf mehrere mögliche Ursachen zurückzuführen. So kann ein geeignetes Betriebsmittel vor dem Wandlungsvorgang schon am Arbeitsplatz vorhanden sein und weiterverwendet werden. Ebenso kann das Betriebsmittel durch Desintegration und anschließender Desinvestition oder anschließendem Transport nicht verfügbar sein. Ein Betriebsmittel des gleichen Typs kann infolgedessen durch Investition mit anschließender Integration in das Fließmontagesystem bereitgestellt werden.

Ist das Betriebsmittel an der aufnehmenden Station ausschließlich nach dem Wandel verfügbar, so gilt $(B_0 = \text{falsch}) \wedge (B_1 = \text{wahr})$. Das benötigte Betriebsmittel wird durch Investition oder Transport mit anschließender Integration in das Fließmontagesystem bereitgestellt.

5.1.6 Optimierungsmodell veränderungsfähiger Fließbandabstimmungen

In den Kapiteln 5.1.2 bis 5.1.5 wurden Konzepte und Modellierungsansätze von veränderungsfähigen Fließbandssystemen eingeführt. Diese werden nachfolgend in ein Optimierungsproblem überführt. Entsprechende Zielfunktionen und Nebenbedingungen werden hierzu formal beschrieben und Empfehlungen zur Implementierung ausgesprochen.

5.1.6.1 Zielfunktionen

Nachdem das Grundproblem der Fließbandabstimmung (vgl. Kapitel 2.3.5) sowie die Ansätze zur Erweiterung des Problems um die Gestaltung von Flexibilität (vgl. Kapitel 5.1.4) und Wandlungsfähigkeit (vgl. Kapitel 5.1.5) aufgezeigt wurden, wird hieraus nachfolgend das Zielsystem einer veränderungsfähigen Fließbandabstimmung entwickelt. Aufgrund der Erweiterung des Fließbandabstimmungsproblems wird der vorliegende Ansatz der Klasse GALPB (vgl. Kapitel 2.3.5) zugeordnet.

Die Zielstellung der Flexibilität liegt in der Minimierung der Varianz aller Arbeitsvorgänge, die einem Arbeitsplatz zugeordnet sind (vgl. Kapitel 5.1.4.2). Eine Grenzfallbetrachtung verdeutlicht, dass im Gegenzug zu vorgehaltener Flexibilität zusätzliche Kosten entstehen können (vgl. Kapitel 2.2.3): Eine simple Regel zur Minimierung der Varianz ist die Festlegung, dass jedem Arbeitsplatz höchstens ein Arbeitsvorgang mit Zeitspreizung zugeordnet werden kann. Existieren nur Arbeitsvorgänge mit Zeitspreizung, ist ausgeschlossen, dass mehrere Arbeitsvorgänge einem Arbeitsplatz zugeordnet werden können. Mögliches Potential zur Reduktion der Arbeitsplätze und somit Kostensparnis kann daher durch die Forderung einer geringen Varianz nicht ausgeschöpft werden. Hinsichtlich einer wandlungsfähigen Gestaltung der Fließbandabstimmung verdeutlicht ebenso eine Grenzfallbetrachtung den Kostenzusammenhang: Sind alle Betriebsmittel an allen Arbeitsplätzen verfügbar, so können hierdurch verringerte Reallokationskosten durch höhere Kosten der initialen Greenfield-Fließbandabstimmung erreicht werden. Aus diesem Grund bilden die konkurrierenden Zielkriterien der Greenfield-Kosten, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit das Zielsystem veränderungsfähiger Fließbandabstimmungen.

Hinsichtlich der Architektur des Zielsystems ist festzulegen, ob ein monokriterielles oder multikriterielles Zielsystem umgesetzt werden soll. Aus zwei Gründen wird dabei ein multikriterielles Zielsystem (vgl. MODM in Kapitel 2.3.1) verwendet. Einerseits liegen

durch die Ermittlung von Kosten und Varianz unterschiedliche Dimensionen der Zielkriterien vor. Andererseits erfordert die integrierte Optimierung mehrerer Zielkriterien eine starre Gewichtung der Zielkriterien *ex ante*, wodurch nur ein Zielfunktionswert ermittelt und damit eine nachgelagerte Bewertung obsolet wird. Die Zielkriterien des Problems *OP* werden durch die Zielfunktionen f_{gk} (Greenfield-Kosten), f_{flex} (Flexibilität), und f_{wf} (Wandlungsfähigkeit) beschrieben, die im Zielfunktionsvektor \vec{z} (siehe Formel 5.11) zu-
sammengefasst und nachfolgend entwickelt werden.

$$OP: \min \vec{z} = \begin{pmatrix} f_{gk} \\ f_{flex} \\ f_{wf} \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

Greenfield-Kosten

In dieser Zielfunktion werden ausschließlich die Kosten der Greenfield-Fließbandabstimmung vor einem Wandel fokussiert. Daher wird diese Fließbandabstimmung als Fließbandabstimmung für Szenario 0 (im Folgenden: s_0) bezeichnet. Alle möglichen Zukunftsszenarien werden mit $s \in S | s \neq 0$ bezeichnet.

Die Kernaufgabe der Fließbandabstimmung besteht in der Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Montagestationen von Fließmontagesystemen (vgl. Kapitel 2.3.5). Um eine realitätsnahe Modellierung des Montageprozesses sicherzustellen, wird eine parallele Bearbeitung von Arbeitsvorgängen an bis zu WP unterschiedlichen Arbeitsplätzen einer Montagestation ermöglicht. Daher gilt es in der Zielfunktion f_{gk} (siehe Formel 5.12) sowohl die Kosten für Montagestationen als auch für Arbeitsplätze und Betriebsmittel in Szenario 0 zu berücksichtigen. Die Kosten einer Montagestationen werden durch die Summe eröffneter Montagestationen y_{k,s_0} und dem Kostensatz einer Montagestation $c_{stat}(\tau_0)$ zum Zeitpunkt τ_0 bestimmt. Analog hierzu ergeben sich die Kosten der Arbeitsplätze aus der Summe eröffneter Arbeitsplätze y_{j,s_0} sowie dem Kostensatz $c_{ap}(\tau_0)$. Die Kosten der Betriebsmittel werden anhand der Summe benötigter Betriebsmittel r_{b,k,j,s_0} sowie dem spezifischen Kostensatz $c_{inv,b}(\tau_0)$ bestimmt.

$$f_{gk} = \sum_{k \in K_{s_0}} \sum_{j \in J_{k,s_0}} \left(y_k * c_{stat}(\tau_0) + y_{j,k} * c_{ap}(\tau_0) + \sum_{b \in B} r_{b,k,j,s_0} * c_{inv,b}(\tau_0) \right) \quad (5.12)$$

Flexibilität

Nachdem in Kapitel 5.1.4.2 die Gestaltung eines flexibilitätsbezogenen Zielkriteriums beschrieben wurden, wird dieses nun sukzessive definiert. Die hierbei verfolgte Zielstellung besteht in der Bestimmung der Varianz der aggregierten Bearbeitungszeit eines Arbeitsplatzes var_j durch die Aggregation der Varianzen der allozierten Arbeitsvorgänge $var_{i,j}$ unter Berücksichtigung der stochastischen Abhängigkeit der Arbeitsvorgänge. Formel 5.13 (Henking, Bluhm & Fahrmeir 2006) gibt die Varianz abhängiger Zufallszahlen Z_1 und Z_2 an.

$$var(Z_1 + Z_2) = var(Z_1) + var(Z_2) + 2 * cov(Z_1 Z_2) \quad (5.13)$$

Der Wert der Kovarianz cov gibt dabei an, ob hohe Werte von Z_1 eher mit hohen oder niedrigen Werten von Z_2 einhergehen, wobei eine positive (negative) Kovarianz darauf hindeutet, dass hohe Werte von Z_1 mit hohen (niedrigen) Werten von Z_2 einhergehen²⁰ (Bosch 2015). Liegt eine positive Kovarianz zweier Arbeitsvorgänge an einem gemeinsamen Arbeitsplatz vor, so trägt dies zu einer Erhöhung der vereinten Varianz bei. Dieser Zusammenhang erscheint im Rahmen der Fließbandabstimmung plausibel.

Da einem Arbeitsplatz mehrere Arbeitsvorgänge zugeordnet werden können, ist die Varianz mehrerer Zufallszahlen Z_n zu ermitteln. Der Faktor w_n dient hierbei als Gewicht der Varianz einer Zufallsvariable. Daher ist die Zielfunktion entsprechend der Berechnung der Varianz einer gewichteten Summe von Zufallsvariablen zu formulieren. Diese ergibt sich nach Laux & Schabel (2008) für Zufallsvariablen Z_n mit $n = 1, \dots, N$ und Gewichten w_n nach Formel 5.14.

$$\begin{aligned} & var(w_1 * Z_1 + w_2 * Z_2 + \dots + w_N * Z_N) \\ &= \sum_{n=1}^N w_n^2 * var(Z_n) + \sum_{n=1}^N \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N cov(w_n * Z_n; w_m * Z_m) \\ &= \sum_{n=1}^N w_n^2 * var(Z_n) + 2 * \sum_{n=1}^N \sum_{m=n+1}^N w_n * w_m * cov(Z_n; Z_m) \quad (5.14) \end{aligned}$$

²⁰ Die Kovarianz ist nicht mit der der Korrelation zu verwechseln. Diese bezeichnet nach Schira (2009) eine Normierung der Kovarianz auf das Intervall [-1;1] durch Division mit den Standardabweichungen der Zufallszahlen.

Die allgemeine Form der Varianz mehrerer Zufallszahlen wird nun auf das Problem der Fließbandabstimmung übertragen. Die Funktion $f_{flex,s}$ (siehe Formel 5.15) beschreibt dabei die Varianz einer Fließbandabstimmung für ein Szenario s . Um die Berechnung der Varianz aller Arbeitsvorgänge eines Arbeitsplatzes durchzuführen, sind diese aus der Menge aller Arbeitsvorgänge auszuwählen. Hierzu wird der Gewichtungsfaktor w_n durch die binäre Zuordnungsvariable $x_{i,j,k,s} \in \{0,1\}$ ersetzt, die für $x_{i,j,k,s} = 1$ eine Zuordnung des Arbeitsvorgangs i zum Arbeitsplatz j der Montagestation k in Szenario s anzeigt. Da $x_{i,j,k,s}$ binär ist kann auf die Quadrierung verzichtet werden.

$$f_{flex,s} = \sum_{k \in K_s} \sum_{j \in J_{k,s}} \left(\sum_{i=1}^{|J_s|} x_{i,j,k,s} * var_{i,s} + 2 * \sum_{u=1}^{|J_s|} \sum_{v=u+1}^{|J_s|} x_{u,j,k,s} * x_{v,j,k,s} * cov(u,v) \right) \quad (5.15)$$

Für die Auswahl einer Fließbandabstimmung ist die Flexibilität der Greenfield-Fließbandabstimmung von großer Bedeutung. Zudem ist jedoch auch die Flexibilität von Fließbandabstimmungen nach einem Wandel nicht zu vernachlässigen. Daher erfolgt die Bestimmung des aggregierten Zielfunktionswertes nach Formel 5.16 mit den Gewichten w_s . Zur Bestimmung eines Gewichtungsfaktors wird die Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios s verwendet.

$$f_{flex} = \sum_{s \in S} f_{flex,s} * w_s \quad (5.16)$$

Wandlungsfähigkeit

Bei der Bestimmung der Wandlungsfähigkeit wird der erwartete Zeitpunkt des Wandels berücksichtigt. Die hierbei entstehenden Kosten c werden daher als Funktionen des Wandlungszeitpunkts $c(\tau)$ beschrieben.

Die Bestimmung der Planungskosten erfolgt nach Formel 5.17 durch die Funktion $f_{plan,s}$. Hierbei wird für ein Szenario s geprüft, ob Arbeitsvorgänge i in s_0 unterschiedlich alloziert sind und mit den Kosten $c_{plan,s}$ zu bewerten sind. Damit jeder Arbeitsvorgang genau einmal berücksichtigt wird, erfolgt eine Multiplikation mit der binären Zuordnungsvariable $x_{i,j,k,s}$. Für das Szenario s_0 gilt $x_{i,j,k,s} = x_{i,j,k,s_0}$, wodurch keine Planungskosten bei unveränderter Fließbandabstimmung anfallen.

$$f_{plan,s} = \sum_{i \in I_s} \sum_{k \in K_s} \sum_{j \in J_{k,s}} (x_{i,j,k,s} - x_{i,j,k,s_0}) * x_{i,j,k,s} * c_{plan,s}(\tau) \quad (5.17)$$

Sind nach einem Wandel zusätzliche Betriebsmittel b erforderlich ($\delta_{pos,b,s} = 1$), so wird die Differenz der Betriebsmittel $q_{b,s}$ der Szenarien s_0 und $s|s \neq s_0$ durch die Funktion $f_{inv,s}$ nach Formel 5.18 mit den Investitionskosten des Betriebsmittels $c_{inv,b}$ bewertet.

$$f_{inv,s} = \sum_{b \in B} |q_{b,s}| * \delta_{pos,b,s} * c_{inv,b}(\tau) \quad (5.18)$$

Ebenso besteht die Möglichkeit, dass Betriebsmittel b nach einem Wandel nicht weiter benötigt werden ($\delta_{neg,b,s} = 1$). In Formel 5.19 erfolgt die Bewertung der Betriebsmitteldifferenz durch die Funktion $f_{desinv,s}$ mit den Desinvestitionskosten $c_{desinv,b}$, die für einen positiven Restwert einen negativen Wert annehmen.

$$f_{desinv,s} = \sum_{b \in B} |q_{b,s}| * \delta_{neg,b,s} * c_{desinv,b}(\tau) \quad (5.19)$$

Die bei einem Wandel zu Szenario s neu zugeordneten oder zugekauften Betriebsmittel b werden am entsprechenden Arbeitsplatz j der Montagestation k in das Fließbandsystem integriert ($m_{int,b,j,k,s} = 1$). Nach Formel 5.20 erfolgt die Bewertung der Integrationsaufwände mit den Kosten $c_{int,b}(\tau)$ durch die Funktion $f_{int,s}$.

$$f_{int,s} = \sum_{b \in B} \sum_{k \in K_s | s \neq 0} \sum_{j \in J_{k,s} | s \neq 0} m_{int,b,j,k,s} * c_{int,b}(\tau) \quad (5.20)$$

Ebenso ist die Desintegration ($m_{des,b,j,k,s} = 1$) der Betriebsmittel b in Szenario s_0 mit den Kosten $c_{desint,b}$ zu bewerten, falls diese in Szenario s realloziert oder nicht weiter benötigt werden. Dies erfolgt durch die Funktion $f_{desint,s}$ in Formel 5.21.

$$f_{desint,s} = \sum_{b \in B} \sum_{k \in K_{s_0}} \sum_{j \in J_{k,s_0}} m_{des,b,j,k,s} * c_{desint,b}(\tau) \quad (5.21)$$

Die Reallokation von Betriebsmitteln b verursacht entsprechend der Funktion $f_{trans,s}$ in Formel 5.22 Kosten des Transports $c_{trans,b}$ für alle Transportvorgänge $q_{trans,b,s}$.

$$f_{trans,s} = \sum_{b \in B} q_{trans,b,s} * c_{trans,b}(\tau) \quad (5.22)$$

Formel 5.23 beschreibt die Berechnung der indirekten Wandlungskosten durch die höchsten ($\gamma_{b,s} = 1$) betriebsmittelspezifischen Opportunitätskosten $c_{lost,b}(\tau)$ (vgl. Formeln 5.46 und 5.47) durch die Funktion $f_{lost,s}$.

$$f_{lost,s} = \sum_{b \in B} \gamma_{b,s} * c_{lost,b}(\tau) \quad (5.23)$$

Entsprechend den Greenfield-Kosten, sind auch für die Fließbandabstimmungen der Szenarien $s \in S | s \neq s_0$ die Betriebskosten in Form der Werker an Arbeitsplätzen mit den Kosten $c_{ap}(\tau)$ sowie $q_{stat,s}$ zusätzliche Montagestationen ($\varepsilon_{stat,s} = 1$) mit den Kosten $c_{stat}(\tau)$ zu bewerten. Diese werden nach der Funktion $f_{add,s}$ in Formel 5.24 erfasst. Hierbei gilt, dass Montagestation die nach einem Wandel nicht länger benötigt werden keinen Restwert aufweisen.

$$f_{add,s} = q_{stat,s} * \varepsilon_{stat,s} * c_{stat}(\tau) + \sum_{k \in K_s | s \neq 0} \sum_{j \in J_{k,s} | s \neq 0} \gamma_{j,k} * c_{ap}(\tau) \quad (5.24)$$

Nachdem die Kostenfaktoren durch die Formeln 5.17 bis 5.24 beschrieben sind, werden diese nach Formel 5.25 durch die Zielfunktion f_{wf} vereint. Dabei werden die Kostenfaktoren summiert und mit w_s gewichtet.

$$f_{wf} = \sum_{s \in S} (f_{plan,s} + f_{inv,s} + f_{desinv,s} + f_{int,s} + f_{desint,s} + f_{trans,s} + f_{lost,s} + f_{add,s}) * w_s \quad (5.25)$$

5.1.6.2 Nebenbedingungen

Die Optimierung der Zielfunktionswerte erfolgt unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen. So beschreiben die Nebenbedingungen (1) bis (4) die Konfiguration von Montagestationen und Arbeitsplätzen, die Nebenbedingungen (5) bis (7) montagestationsinterne Restriktionen zur Parallelisierung von Arbeitsvorgängen und die Nebenbedingungen (8) bis (13) die Allokation von Betriebsmitteln.

(1) Ausführung aller Arbeitsvorgänge

Die Durchführung aller Arbeitsvorgänge i stellt eine notwendige Bedingung zur erfolgreichen Durchführung des Montageprozesses dar und wird durch Formel 5.26 sichergestellt. Für alle Arbeitsvorgänge eines Szenarios s muss daher gelten, dass diese über die Zuordnungsvariable $x_{i,j,k} \in \{0,1\}$ zu genau einem Arbeitsplatz j an einer Montagestation k alloziert sind. (A_Exner 2018)

$$\sum_{k \in K_s} \sum_{j \in J_{k,s}} x_{i,j,k,s} = 1 \quad \forall i \in I_s ; s \in S \quad (5.26)$$

(2) Taktzeitrestriktion

Die Taktzeit C beschreibt die verfügbare Zeit zur Ausführung von Montageumfängen einer Station (vgl. Kapitel 2.1.2.2). Durch Formel 5.27 wird ausgeschlossen, dass die Summe von Bearbeitungszeiten $t_{robust,i,s}$ der einem Arbeitsplatz j an Montagestation k allozierten Arbeitsvorgänge i die Taktzeit überschreitet. (A_Arslan 2017)

$$\sum_{i \in I_s} x_{i,j,k,s} * t_{robust,i,s} \leq C \quad \forall j \in J_s; k \in K_s; s \in S \quad (5.27)$$

(3) Reihenfolgerestriktionen auf Montagestationsebene

Hinsichtlich der Abfolge von Arbeitsvorgängen sind entsprechende Reihenfolgerestriktionen zu beachten (vgl. Kapitel 2.1.4.2). Formel 5.28 garantiert, dass ein Arbeitsvorgang i , der Nachfolger eines Arbeitsvorgangs h ist, frühestens an der Montagestation k von Arbeitsvorgang h startet. Diese Restriktion gilt nur für Arbeitsvorgänge, die im fokussierten Szenario in einer Vorrangbeziehung stehen ($(h, i) \in I_{vr,s}$).

$$(k * x_{h,k,s}) - (k * x_{i,k,s}) \leq 0 \quad \forall (h, i) \in I_{vr,s}; k \in K_s; s \in S \quad (5.28)$$

(4) Arbeitsplatz- und Montagestationseröffnung

Zur kostenseitigen Bewertung von Arbeitsplätzen und Montagestationen ist erforderlich, dass der Eröffnungsstatus $y_{j,k,s}$ eines Arbeitsplatzes j bzw. $y_{k,s}$ einer Montagestation k in Szenario s diesen als geöffnet kennzeichnet, sollte dem betreffenden Arbeitsplatz einer Station ein Arbeitsvorgang alloziert sein. Gilt daher $\exists x_{i,j,k,s} = 1$, so folgt $y_{j,k,s} = y_{k,s} = 1$, womit nach Formel 5.29 Arbeitsplatz j und Station k geöffnet sind. Die Konstante²¹ $M \in \mathbb{R}_+$ beschreibt eine hinreichend große Zahl, die größer der Anzahl an Arbeitsvorgängen $|J_s|$ ist und durch den Anwender definiert wird. Durch M wird ausgeschlossen, dass die linke Seite der Ungleichung für mehr als einen zugewiesenen Arbeitsvorgang unwahr wird. (A_Exner 2018)

$$\sum_{i \in I_s} x_{i,j,k,s} - M * y_{j,k,s} * y_{k,s} \leq 0 \quad \forall j \in J_s; k \in K_s; s \in S \quad (5.29)$$

²¹ Weiterführende Informationen zur Big-M-Methode liefern Hillier & Lieberman (2015).

(5) Gemeinsame Bearbeitung von Arbeitsvorgängen an einem Arbeitsplatz

Werden in einem Szenario s zwei Arbeitsvorgänge h und i am selben Arbeitsplatz j der Station k ausgeführt, es gilt also $x_{h,j,k,s} = 1$ und $x_{i,j,k,s} = 1$, dann muss nach Formel 5.30 für die gemeinsame Zuordnung $g_{h,i,j,k,s} = 1$ gelten. (A_Exner 2018)

$$x_{h,j,k,s} + x_{i,j,k,s} - g_{h,i,j,k,s} \leq 1 \quad \forall j \in J_s; k \in K_s; h, i \in I_s | h \neq i; s \in S \quad (5.30)$$

Ebenso muss gelten, dass aus der Zuordnung zweier Arbeitsvorgänge h und i zu einem gemeinsamen Arbeitsplatz ($g_{h,i,j,k,s} = 1$) auch die individuelle Allokation der Arbeitsvorgänge zum gemeinsamen Arbeitsplatz $x_{i,j,k,s} = 1$ folgt (siehe Formel 5.31). Der Allquantor gewährleistet dies analog für Arbeitsvorgänge h . (A_Exner 2018)

$$-x_{i,j,k,s} + g_{h,i,j,k,s} \leq 0 \quad \forall j \in J_s; k \in K_s; h, i \in I_s | h \neq i; s \in S \quad (5.31)$$

(6) Karosserieansprache

Die parallele Bearbeitung erlaubt Mitarbeitern gleichzeitig an mehreren Arbeitsplätzen derselben Station zu arbeiten. Zur Reduzierung zurückzulegender Wege der Werker erfolgt die Durchführung von Arbeitsvorgängen, die denselben Karosserieansprache punkt (vgl. Kapitel 2.1.3) beanspruchen, am selben Arbeitsplatz einer Montagestation.

Formel 5.32 schließt daher aus, dass zwei Arbeitsvorgänge h und i unterschiedlichen Arbeitsplätzen j zugewiesen werden ($g_{h,i,j,k,s} = 0$), wenn die Schnittmenge ihrer Karosserieansprachepunkte $KA_{h,s} \cap KA_{i,s}$ nicht leer ist (also gilt $\exists(h, i) \in I_{KA,s}$) und sie zur selben Montagestation k alloziert sind.

$$\sum_{j=1}^{WP} x_{i,j,k,s} + x_{h,j,k,s} - g_{h,i,j,k,s} \leq 1 \quad \forall (h, i) \in I_{KA,s}; k \in K_s; s \in S \quad (5.32)$$

(7) Intrastationäre Reihenfolge restriktionen

Die einer Montagestation zugewiesenen Arbeitsvorgänge werden dann an einem gemeinsamen Arbeitsplatz durchgeführt, falls zwischen ihnen eine Vorrangbeziehung besteht. Somit kann sichergestellt werden, dass sich Störungen im Montageprozess an einem Arbeitsplatz nicht derart auswirken, als dass Wartezeiten für weitere Werker entstehen, die auf Fertigstellung des Arbeitsvorgangs angewiesen sind. Formel 5.33 fordert dementsprechend, dass zwei Arbeitsvorgänge h und i demselben Arbeitsplatz j

zugewiesen werden ($g_{h,i,j,k,s} = 1$), wenn sie in einer Vorrangbeziehung stehen (also gilt $\exists (h, i) \in I_{vr,s}$) und zur selben Montagestation k alloziert sind.

$$\sum_{j=1}^{WP} x_{i,j,k,s} + x_{h,j,k,s} - g_{h,i,j,k,s} \leq 1 \quad \forall (h, i) \in I_{vr,s}; k \in K_s; s \in S \quad (5.33)$$

(8) Betriebsmittelsubstitution

Die Eignung der Betriebsmittel $b \in B$ zur Durchführung des Arbeitsvorgangs $i \in I$ ist in der Substitutionsmatrix $Bm_{b,u,i}$ definiert. Dabei sind die verfügbaren Betriebsmittel sowie deren Eignung für alle Szenarien s identisch. Ist ein Betriebsmittel nicht zur Durchführung eines Arbeitsvorgangs geeignet oder wird nicht benötigt ($\sum_{u \in B} Bm_{b,u,i} = 0$), so stellt Formel 5.34 sicher, dass das Betriebsmittel dem Arbeitsvorgang nicht alloziert werden kann ($bm_{b,i} = 0$). (A_Exner 2018)

$$bm_{b,i} = 0 \quad \forall b \in B; i \in I_s \mid \sum_{u \in B} Bm_{b,u,i} = 0 \quad (5.34)$$

Ist ein Betriebsmittel für die Durchführung eines Arbeitsvorgangs geeignet, ist dies durch das Vorhandensein von mindestens einem Eintrag in der Substitutionsmatrix ($\sum_{u \in B} Bm_{b,u,i} \geq 1$) ersichtlich. Hierbei garantiert Formel 5.35, dass genau eines der Betriebsmittel $b \in B$ dem Arbeitsvorgang i als Betriebsmittel alloziert ist ($bm_{u,i} = 1$). (A_Exner 2018)

$$\sum_{u \in B \mid Bm_{b,u,i}=1} bm_{u,i} = 1 \quad \forall b \in B; i \in I_s \mid \sum_{u \in B} Bm_{b,u,i} \geq 1 \quad (5.35)$$

(9) Zuordnung von Betriebsmitteln

Bei der Modellbildung des Fließmontagesystems wurde die Zuordnung von Betriebsmitteln über Arbeitsvorgänge zu Arbeitsplätzen beschrieben (vgl. Kapitel 5.1.2). Ist in Szenario s ein Betriebsmittel b an Arbeitsplatz j der Montagestation k erforderlich, es gilt also $bm_{b,i} = 1 \wedge x_{i,j,k,s} = 1$, so muss für die Entscheidungsvariable der Zuordnung von Betriebsmitteln zu Arbeitsplätzen $r_{b,j,k,s} = 1$ gelten (siehe Formel 5.36). Da gilt, dass einem Arbeitsplatz mehrere Betriebsmittel zuordenbar sind, ist die Konstante M hinreichend groß zu wählen. Eine geeignete Ausprägung hierfür stellt die Anzahl der

Arbeitsvorgänge $|I_s|$ dar. Hierdurch kann eine mehrfache Zuordnung von Betriebsmitteln unterbunden werden. (A_Exner 2018)

$$\sum_{i \in I_s} b m_{b,i} * x_{i,j,k,s} - M * r_{b,j,k,s} \leq 0 \quad \forall b \in B; j \in J_s; k \in K_s; s \in S \quad (5.36)$$

(10) Betriebsmittelintegration und -desintegration

Die Integration und Desintegration von Betriebsmitteln stellt ein wesentliches Element zur Bestimmung der Wandlungskosten von Fließbandabstimmungen dar (vgl. Kapitel 5.1.5.2). Ein Wandel der Fließbandabstimmung ist durch einen Übergang von Szenarien s gekennzeichnet, wobei die Allokation der Betriebsmittel durch die binäre Entscheidungsvariable $r_{b,j,k,s}$ beschrieben ist. Durch Formel 5.37 wird sichergestellt, dass Betriebsmittel der Arbeitsplätze $j \in J_{k,s_0}$, die durch den Wandel zu einem anderen Arbeitsplatz j alloziert werden, nicht an Arbeitsplatz l verbleiben. Die binäre Entscheidungsvariable $m_{des,b,l,m,s}$ der Desintegration von Betriebsmittel b an Arbeitsplatz l der Montagestation k für ein Szenario s nimmt dabei den Wert 1 an. (A_Exner 2018)

$$r_{b,j,k,s} + m_{des,b,l,m,s} \leq 1 \quad \forall b \in B; j \in J_{s_0}; l \in J_s | l = j; k \in K_{s_0}; m \in K_s | m = k; s \in S | s \neq s_0 \quad (5.37)$$

Die wandlungsbedingte Integration eines Betriebsmittels b an Arbeitsplatz j der Montagestation k in Szenario s ist durch den Wert 1 der binären Entscheidungsvariable $m_{int,b,j,k,s}$ beschrieben. Hierbei ist nach Formel 5.38 sicherzustellen, dass entsprechend der Integration von Betriebsmitteln auch die Allokation des Betriebsmittels durch die binäre Entscheidungsvariable $r_{b,j,k,s}$ zum Arbeitsplatz j der Montagestation k erfolgt. (A_Exner 2018)

$$-r_{b,j,k,s} + m_{int,b,j,k,s} \leq 0 \quad \forall b \in B; j \in J_s; k \in K_s; s \in S | s \neq s_0 \quad (5.38)$$

(11) Desinvestition und zusätzliche Investition in Betriebsmittel

Durch die Reallokation von Arbeitsvorgängen kann sich die benötigte Anzahl von Betriebsmitteln b verändern. Die Differenz der vor und nach einem Wandel zu einem Szenario s geltenden Betriebsmittelzuweisungen r_{b,j,k,s_0} und $r_{b,j,k,s}$ wird nach Formel 5.39 durch $q_{b,s}$ erfasst.

$$\sum_{k \in K_s} \sum_{j \in J_{k,s}} r_{b,j,k,s} - \sum_{k \in K_{s_0}} \sum_{j \in J_{k,s_0}} r_{b,j,k,s_0} - q_{b,s} = 0 \quad \forall b \in B; j \in J_s; k \in K_s; s \in S | s \neq s_0 \quad (5.39)$$

Zur Bestimmung der entstehenden Kosten wird in den Formeln 5.40 bis 5.42 durch den Wert 1 der folgenden Indikatoren angezeigt, ob zusätzliche Betriebsmittel b benötigt werden $\delta_{pos,b,s} \in \{0,1\}$, Betriebsmittel b nicht mehr benötigt werden $\delta_{neg,b,s} \in \{0,1\}$ oder die Anzahl unverändert bleibt $\delta_{eq,b,s} \in \{0,1\}$.

$$\left(\sum_{k \in K_{s_0}} \sum_{j \in J_{k,s_0}} r_{b,j,k,s_0} * \delta_{pos,b,s} \right) - \sum_{k \in K_s} \sum_{j \in J_{k,s}} r_{b,j,k,s} \leq 1 \quad \forall b \in B; s \in S | s \neq s_0 \quad (5.40)$$

$$\left(\sum_{k \in K_s} \sum_{j \in J_{k,s}} r_{b,j,k,s} * \delta_{neg,b,s} \right) - \sum_{k \in K_{s_0}} \sum_{j \in J_{k,s_0}} r_{b,j,k,s_0} \leq 1 \quad \forall b \in B; s \in S | s \neq s_0 \quad (5.41)$$

$$|q_{b,s}| * \delta_{eq,b,s} * M - \delta_{eq,b,s} \leq 0 \quad \forall b \in B; s \in S | s \neq s_0 \quad (5.42)$$

Formel 5.43 stellt sicher, dass genau ein Zustand $\delta_{pos,b,s} = 1 \vee \delta_{neg,b,s} = 1 \vee \delta_{eq,b,s} = 1$ für Betriebsmittel b bei Wandel zu Szenario s eingenommen wird.

$$\delta_{pos,b,s} + \delta_{neg,b,s} + \delta_{eq,b,s} = 1 \quad \forall b \in B; s \in S | s \neq s_0 \quad (5.43)$$

(12) Reallokation

Die physische Verlagerung von Betriebsmitteln b bei Wandel zu Szenario s verursacht Transportvorgänge $q_{trans,b,s} \in \mathbb{N}$ (vgl. Kapitel 5.1.5.2) gemäß Formel 5.44. Hierbei ist zu beachten, dass ausschließlich Betriebsmittel transportiert werden, die vor und nach einem Wandel benötigt werden. Zusätzliche ($q_{b,s} | \delta_{pos,b,s} = 1$) oder entsorgte Betriebsmittel ($q_{b,s} | \delta_{neg,b,s} = 1$) verursachen keine Transportvorgänge

$$\sum_{k \in K_s} \sum_{j \in J_{k,s}} \left((m_{int,b,j,k,s} - |q_{b,s}|) * \delta_{pos,b,s} + (m_{desint,b,j,k,s} - |q_{b,s}|) * \delta_{neg,b,s} + m_{int,b,j,k,s} * \delta_{eq,b,s} \right) - q_{trans,b,s} = 0 \quad \forall b \in B; s \in S | s \neq s_0 \quad (5.44)$$

Die Variable $\varepsilon_{b,s} \in \{0,1\}$ nimmt in Formel 5.45 den Wert 1 an, falls ein Betriebsmittels b bei einem Wandel zu Szenario s physisch verlagert wird. Als Indikator der physischen

Verlagerung wird hierzu das Vorliegen von mindestens einem Transportvorgang des Betriebsmittels $q_{trans,b,s}$ verwendet.

$$(\varepsilon_{b,s} + q_{trans,b,s}) - (M * \varepsilon_{b,s} * q_{trans,b,s}) \leq 0 \quad \begin{array}{l} \forall b \in B; \\ s \in S | s \neq s_0 \end{array} \quad (5.45)$$

Da die Reallokation von Betriebsmitteln gleichzeitig erfolgt (vgl. Kapitel 5.1.1), werden durch Formel 5.46 ausschließlich die höchsten betriebsmittelspezifischen Opportunitätskosten $c_{lost,b}$ berücksichtigt. Die Variable $\gamma_{b,s} \in \{0,1\}$ kann für Betriebsmittel den Wert 1 annehmen, die mit mindestens einer Instanz realloziert und physisch verschoben werden ($\varepsilon_{b,s} = 1$) sowie höhere betriebsmittelspezifischen Opportunitätskosten als alle Betriebsmittel u aufweist.

$$(\gamma_{b,s} * c_{lost,u} * \varepsilon_{u,s}) - (\gamma_{b,s} * c_{lost,b} * \varepsilon_{b,s}) \leq 0 \quad \begin{array}{l} \forall b \in B; \\ u \in B | u \neq b; \\ s \in S | s \neq s_0 \end{array} \quad (5.46)$$

Formel 5.47 stellt sicher, dass ein Betriebsmittel als das mit den höchsten Opportunitätskosten ($\gamma_{b,s} = 1$) gekennzeichnet wird. Weiterhin wird ausgeschlossen, dass Opportunitätskosten mehrfach erfasst werden, falls das Maximum der Opportunitätskosten mehrerer Betriebsmittel identisch ist.

$$\sum_{b \in B} \gamma_{b,s} = 1 \quad \forall s \in S | s \neq s_0 \quad (5.47)$$

(13) Zusätzliche Montagestationen

Erfordert die Fließbandabstimmung eines Szenarios $s \neq s_0$ mehr Montagestationen als die Fließbandabstimmung für s_0 , so sind bei einem Wandel nach Formel 5.48 zusätzliche Montagestationen $q_{stat,s} \in \mathbb{Z}$ zu beschaffen.

$$\sum_{k \in K_s} \gamma_{k,s} - \sum_{k \in K_{s_0}} \gamma_{k,s_0} - q_{stat,s} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall k \in K_s; \\ s \in S | s \neq s_0 \end{array} \quad (5.48)$$

Als Indikator der Beschaffung zusätzlicher Betriebsmittel ($q_{stat,s} > 0$) wird die Variable $\varepsilon_{stat,s} \in \{0,1\}$ verwendet. Diese zeigt gemäß Formel 5.49 eine zusätzliche Beschaffung durch den Wert 1 an.

$$(\varepsilon_{stat,s} + q_{stat,s}) - (M * \varepsilon_{stat,s} * q_{stat,s}) \leq 0 \quad \begin{array}{l} \forall b \in B; \\ s \in S | s \neq s_0 \end{array} \quad (5.49)$$

5.1.6.3 Lösungsverfahren

Hinsichtlich eines geeigneten Lösungsverfahrens für multikriterielle Optimierungsprobleme können zwei Vorgehensweisen unterschieden werden (Deb 2001).

- Präferenzbasiertes Vorgehen: Die Gewichtung der Zielfunktionen erfolgt vor der Lösung des Optimierungsproblems. Die Lösungsmenge enthält hierbei ausschließlich die, der Gewichtung entsprechende, optimale Lösung.
- Idealtypisches Vorgehen: Durch die Lösung des nicht modifizierten multikriteriellen Optimierungsproblems werden mehrere Lösungen gefunden. Aus diesen Lösungen wird durch nachträgliche Bewertung eine Lösung ausgewählt.

Da die Gestaltung einer veränderungsfähigen Fließbandabstimmung hinsichtlich potentieller Szenarien und somit einer unsicheren zukünftigen Entwicklung erfolgt, kann eine Sensitivitätsanalyse zur Entscheidungsfindung beitragen. Unter Anwendung eines präferenzbasierten Vorgehens kann der Einfluss unterschiedlicher Gewichtungen auf die Ausgestaltung der Lösung nicht analysiert werden, weshalb ein idealtypisches Vorgehen angewendet wird (vgl. Kapitel 5.1.6.1).

Hinsichtlich der Auswahl eines geeigneten Lösungsalgorithmus sind sowohl die Lösungsgüte auch die Lösungsgeschwindigkeit wichtige Auswahlkriterien. Das Optimierungsproblem der Fließbandabstimmung stellt ein NP-schweres Problem (vgl. Kapitel 2.3.5) dar, für das bei großen Probleminstanzen Heuristiken empfohlen werden (Reeves & Beasley 1993; Scholl 2001). Aufgrund der definierten Entscheidungsvariablen²² (vgl. Kapitel 5.1.6.1) wird das Optimierungsproblem als solches klassifiziert und dementsprechend ein heuristisches Verfahren (vgl. Kapitel 2.3.4) verwendet. Aus dem Bereich der heuristischen Verfahren erscheint ein genetischer Algorithmus aus der Klasse der evolutionären Algorithmen auf Basis der in Kapitel 2.3.4 erläuterten Vorteilhaftigkeit als besonders geeignet. Im Gegensatz zu typischen evolutionären Algorithmen zur Mehrzieloptimierung bietet der Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) eine vergleichsweise geringe Berechnungskomplexität, eine hohe Lösungsspreizung sowie eine starke Konvergenz der Annäherung an die Pareto-Front (Deb et al. 2002) und wird daher zur Implementierung empfohlen.

²² Für ein vergleichsweise kleines Fließbandabstimmungsproblem, bestehend aus 4 Arbeitsvorgängen und 2 Stationen, besteht der Lösungsvektor aus 48 Entscheidungsvariablen, welche einen Raum von $2,27 \cdot 10^{48}$ möglichen Lösungen aufspannen.

Eine typische Maßnahme zur Reduktion der Lösungsmenge multikriterieller Optimierungsprobleme ist die Identifikation der Pareto-Front, die alle pareto-optimalen Lösungen vereint. Pareto-optimale Lösungen sind dadurch definiert, als dass sie hinsichtlich aller Zielkriterien, im Vergleich zu allen weiteren Lösungen mindestens Zielfunktionswerte gleicher Güte aufweisen. Zusätzlich dominieren sie diese hinsichtlich mindestens eines Zielkriteriums. (Mehnen 2005) Da durch die nachfolgenden Kapitel eine Bewertung der Lösungen erfolgt, die über die Zielkriterien hinausgeht, erscheint eine Reduktion der Lösungsmenge auf die Pareto-Front an dieser Stelle nicht geeignet.

Als Ergebnis des Optimierungsmoduls liegt ein Verfahren vor, um die Fließbandabstimmung unter Berücksichtigung der Veränderungsfähigkeit zu gestalten. Unter Anwendung des Verfahrens kann eine Menge von Fließbandabstimmung erzeugt werden, die jeweils eine Zuordnung von Arbeitsvorgängen und Betriebsmitteln zu Arbeitsplätzen und Montagestationen beinhalten.

5.1.6.4 Maßnahmen zur Verringerung der Rechenzeit

Zur Berechnung großer Probleminstanzen des NP-schweren Problems der Fließbandabstimmung (vgl. Kapitel 2.3.5) werden in Anlehnung an die vom Autor angeleiteten studentischen Arbeiten von A_Arslan (2017) und A_Hort (2018) nachfolgend Maßnahmen vorgestellt, die eine Verringerung der Rechenzeit unter Anwendung des NSGA-II ermöglichen. Diese fokussieren die Modellierungstechnik sowie die Einschränkung des Lösungsraums.

Umcodierung von Entscheidungsvariablen

Der NSGA-II kann der Klasse der evolutionären Algorithmen zugeordnet werden. In Anlehnung an die Evolutionstheorie arbeitet der Algorithmus mit Populationen, die eine Menge von Individuen darstellen. Jedes Individuum enthält ein Chromosom, auf dem sich Gene befinden, die jeweils einen Eintrag des Entscheidungsvektors repräsentieren. Im Rahmen binärer Probleme weist ein Gen entweder den Wert 0 oder den Wert 1 auf. Durch schrittweise Mutation dieser Gene und Überprüfen der hierdurch erzeugten Population erfolgt eine Annäherung an die optimale Lösung. Da große Probleminstanzen durch eine hohe Anzahl an Genen die Identifikation des Optimums erschweren, wird die Anzahl an Genen durch ein entsprechendes Vorgehen eingeschränkt. Hierzu werden die Zuordnungen von Arbeitsvorgängen zu Arbeitsplätzen und

Montagestationen $x_{i,j,k}$ sowie die Eröffnung von Arbeitsplätzen y_{jk} und Montagestationen y_k nicht weiter binär codiert, sondern anhand der ID des Arbeitsplatzes vorgenommen. Dies wird an nachfolgendem Beispiel für die Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Arbeitsplätzen erläutert (vgl. Abbildung 5.6). Hierbei sollen zwei Arbeitsvorgänge zwei Arbeitsplätzen derart zugeordnet werden, dass Arbeitsvorgang 1 an Arbeitsplatz 1 und Arbeitsvorgang 2 an Arbeitsplatz 2 durchgeführt wird. Anhand der veränderten Codierung ist ersichtlich, dass die Anzahl der Gene des Entscheidungsvektors \vec{x} auf die Anzahl an Arbeitsvorgängen reduziert wird. Weiterhin werden hierdurch ungültige Lösungen ausgeschlossen, die durch die Allokation eines Arbeitsvorgangs zu einem Arbeitsplatz ($x_{11} = 1$) erzeugt werden, der nicht eröffnet ist ($y_1 = 0$).

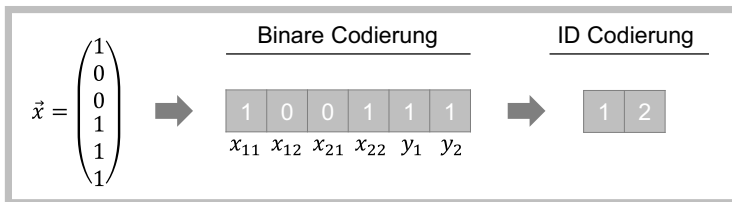


Abbildung 5.6: Prinzip der Umcodierung von Entscheidungsvariablen

Hierarchische Prüfung von Nebenbedingungen

Die hierarchische Modellierung basiert darauf, dass die Gültigkeit der Allokation von Arbeitsvorgängen i zu einem Arbeitsplatz j der Montagestation k nicht geprüft werden muss, wenn ausgeschlossen werden kann, dass Arbeitsvorgang i der Montagestation k alloziert wird. Daher ist für die Implementierung des Lösungsalgorithmus eine stufenweise Prüfung der Nebenbedingung (3) und nachfolgend (6) und (7) zu empfehlen. Hierdurch kann die Anzahl der Prüfung von Nebenbedingungen reduziert und somit die Berechnungszeit verringert werden.

Einschränkung des Lösungsraums

Die Kernidee ist die Einschränkung ($x_{i,j,k} = 0$) der Montagestationen k , denen durch die Berücksichtigung des kritischen Pfades der Reihenfolgerestriktionen von Arbeitsvorgängen ein Arbeitsvorgang i alloziert werden kann. Daher ist das Montagestationsintervall zu identifizieren, das durch die frühestmögliche und spätestmögliche gültige Montagestation ($x_{i,j,k} = 1$) begrenzt ist. Die Grundlage hierfür bilden der früheste ($ls_i \in \mathbb{R}_+$) und späteste Startzeitpunkt ($us_i \in \mathbb{R}_+$) eines Arbeitsvorgangs i , die in Anlehnung

an Becker & Scholl (2009) sukzessiv bestimmt werden können. Bezüglich des frühestmöglichen Startzeitpunkts (siehe Formel 5.50) ist zu beachten, dass zusätzlich zum Startzeitpunkt der Vorgänger h auch dessen Bearbeitungszeit t_h zu berücksichtigen ist. Gilt für einen Arbeitsvorgang i , dass er in keiner Vorrangbeziehung steht ($I_{vr} = \{\}$), so beträgt der früheste Startzeitpunkt $ls_i = 0$.

$$ls_i = \max\{0; ls_h + t_h\} \quad \forall (h, i) \in I_{vr} \quad (5.50)$$

Zur Bestimmung des spätestmöglichen Startzeitpunkts (siehe Formel 5.51) ist eine Festlegung der maximalen Montagestationsanzahl $|K|$ ex post erforderlich. Durch die Multiplikation mit der Taktzeit und Subtraktion der Bearbeitungszeit t_h ergibt sich die Obergrenze für den Fall, dass keine nachfolgenden Arbeitsvorgänge i existieren.

$$us_h = \min\{C * |K| - t_h; us_i - t_h\} \quad \forall (h, i) \in I_{vr} \quad (5.51)$$

Nach den Formeln 5.52 und 5.53 können, unter Berücksichtigung der Taktzeit C sowie der Anzahl an Arbeitsplätzen pro Montagestation WP , die frühestmögliche ($ly_i \in \mathbb{N}$) und spätestmögliche ($uy_i \in \mathbb{N}$) Montagestation bestimmt werden.

$$ly_i = \left\lfloor \frac{ls_i + t_i}{WP * C} \right\rfloor \quad \forall i \in I \quad (5.52)$$

$$uy_i = \left\lfloor \frac{us_i + t_i}{WP * C} \right\rfloor \quad \forall i \in I \quad (5.53)$$

Ebenso erfolgt die Einschränkung der Entscheidungsvariable der Betriebsmittelzuordnung $r_{b,j,k} \in \{0,1\}$. Aufgrund der hierarchischen Modellierung steht dabei die Zuordnung $r_{b,k}$ im Fokus. Damit ein Betriebsmittel b zwangsweise zu Montagestation k alloziert wird, muss $lr_{b,k} = 1$ gelten. Die Bedingung hierfür ist, dass ein Arbeitsvorgang i ein Betriebsmittel b erfordert, zu dem kein Substitut u existiert ($Bm_{b,u,i} = 1$) und durch die untere Grenze ly_i und obere Grenze uy_i auf Montagestation k eingegrenzt ist (siehe Formel 5.54). Ist die Zuweisung ausgeschlossen, so ist $ur_{b,j,k} = 0$ festzulegen. Dies erfordert, dass kein Arbeitsvorgang i der Station k zugeordnet sein kann ($I_{pot,k}$), das Betriebsmittel b erfordert (siehe Formel 5.55).

$$lr_{b,k} = \begin{cases} 1 & \text{für } Bm_{b,u,i} = 1 \wedge ly_i = uy_i; \forall i \in I_{pot,k}; u \in B \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall i \in I \quad (5.54)$$

$$ur_{b,k} = \begin{cases} 0 & \text{für } Bm_{b,u,i} = 0; \forall i \in I_{pot,k}; u \in B \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall i \in I \quad (5.55)$$

Da ein Betriebsmittel nur von einem Arbeitsplatz verschoben werden kann, wenn es dort in Szenario s_0 integriert war, gilt, dass die Variable der Desintegration von Betriebsmitteln um_{desint,b,k,s_0} für $ur_{b,k,s_0} = 0$ den Wert 0 annimmt (siehe Formel 5.56). Ebenso kann ein Betriebsmittel nicht an einen Arbeitsplatz verschoben werden ($um_{int,b,k,s} = 0$), an dem es in Szenario $s \neq s_0$ nicht alloziert ist (siehe Formel 5.57). Somit werden ausschließlich obere Grenzen definiert.

$$um_{desint,b,k,s_0} = \begin{cases} 0 & \text{für } ur_{b,k,s_0} = 0 \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall i \in I \quad (5.56)$$

$$um_{int,b,k,s} = \begin{cases} 0 & \text{für } ur_{b,k,s} ; \forall s \in S | s \neq s_0 \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall i \in I \quad (5.57)$$

5.2 Bewertungsmodul

Eine Lösung des Optimierungsproblems der Fließbandabstimmung $sol \in SOL$ beschreibt ein Lösungsbündel bestehend aus einer Fließbandabstimmung $fa_s \in FA_s$ des Szenarios s_0 in Periode p_0 sowie je einer Fließbandabstimmung fa_s für jedes Szenario $s \in S \setminus \{s_0\}$ der Periode p_1 . Aufgrund herrschender Unklarheit über die konkrete Ausprägung des durchschnittlich betrachteten Variantenmix (vgl. Kapitel 2.1.4.2) erlaubt das Optimierungsproblem keine Bewertung von Flexibilitätskorridoren und Überlast. Die Zielfunktionswerte ZFW_{gk} , ZFW_{flex} und ZFW_{wf} einer Fließbandabstimmungen fa liefern somit keine ganzheitliche Bewertung. Es bedarf daher einer nachgelagerten Bewertungsergänzung der ermittelten Fließbandabstimmungen.

Diese erfolgt anhand von drei Bewertungskriterien, die in Abbildung 5.7 dargestellt sind. Die Greenfield-Kosten einer Lösung ergeben sich aus dem Zielfunktionswert ZFW_{gk} des Optimierungsproblems der Fließbandabstimmung sowie zusätzlich anfallenden Kosten zur Kompensation von Überlast (vgl. Kapitel 2.1.4.3). Die Zielfunktion f_{flex} bildet die gewichtete Varianz der Fließbandabstimmungen fa_s ab. Diese stellt einen Befähiger und Indikator der Flexibilität dar, ist jedoch nicht ausreichend, um das Flexibilitätsverhalten von Fließbandabstimmungen zu beschreiben, also die Eigenschaft mehrere Variantenmischverhältnisse ohne entstehende Wandlungsaufwände abzubilden (vgl. Kapitel 5.1.3.1). Daher erfolgt in Kapitel 5.2.4 die Formulierung der Flexibilitätskennzahl FKZ_{fa} von Fließbandabstimmungen. Analog der Bewertungsergänzung der Greenfield-Kosten wird auch bei der Bewertung der Wandlungsfähigkeit ein Aufschlag der Kosten zur Kompensation von Überlast vorgenommen.

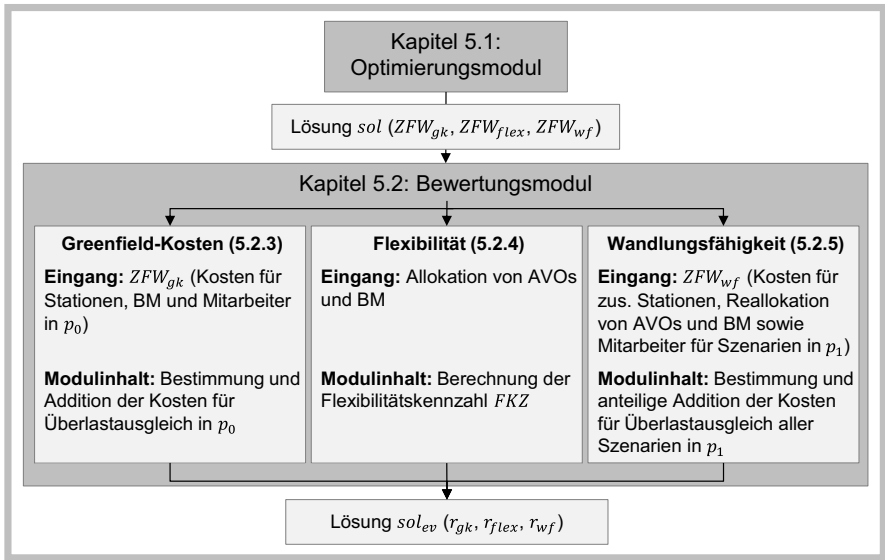


Abbildung 5.7: Übersicht des Bewertungsmoduls

Zur Bestimmung der Kosten des Überlastausgleichs ist zunächst die Überlast selbst zu bestimmen. Wie in Abbildung 5.8 ersichtlich, stellt diese das Ergebnis der optimierten Reihenfolgeplanung eines Produktionsprogramms bezüglich einer bestimmten Fließbandabstimmung dar und wird abschließend durch eine geeignete Funktionsvorschrift monetarisiert. Daher wird nachfolgend den zugrundeliegenden Annahmen in Kapitel 5.2.1 ein Modell zur Optimierung der Reihenfolgebildung in Kapitel 5.2.2 beschrieben.

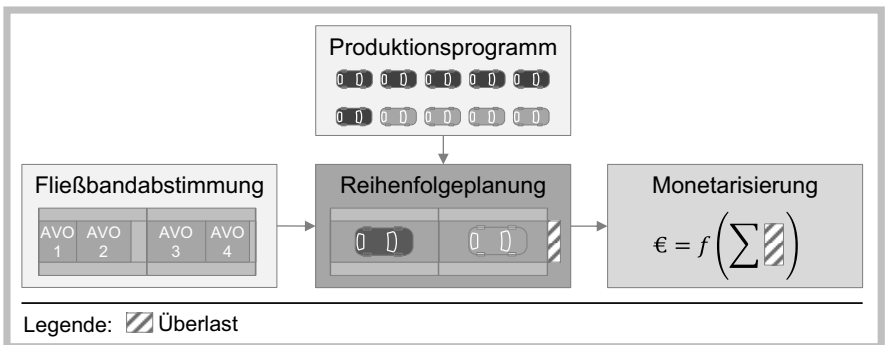


Abbildung 5.8: Ansatz zur Kostenbewertung von Überlastkompensation

5.2.1 Annahmen

Da die Fließbandabstimmung und die Reihenfolgebildung Planungsaufgaben desselben Fließmontagesystems darstellen, besitzen die Annahmen, die im Rahmen der Fließbandabstimmung getroffen wurden auch für die Reihenfolgeplanung Gültigkeit. Diese werden nun durch spezifisch die Reihenfolgeplanung betreffende Annahmen ergänzt:

1. **Universelle Einsetzbarkeit von Unterstützern:** Es wird angenommen, dass Unterstützer alle anfallenden Arbeitsvorgänge beherrschen und somit universell einsetzbar sind. Alle Kosten zur Vermittlung der hierfür notwendigen Kenntnisse sind mit den Lohnkosten abgegolten.
2. **Unterstützer-Laufgeschwindigkeit:** Die örtliche Verteilung der anfallenden Überlast wirkt durch die anfallenden Wegstrecken auf die Kapazität der Unterstützer. Da die hierzu notwendige Definition des Layouts nicht Teil der vorliegenden Planungsaufgabe ist, erfolgt analog der Werker-Laufgeschwindigkeit (vgl. Kapitel 5.1.1) die Annahme einer unendlichen Unterstützer-Laufgeschwindigkeit.
3. **Fraktales Produktionsprogramm:** Das Produktionsprogramm einer Schicht weist die gleichen Variantenanteile wie das Produktionsprogramm eines Jahres auf. Da in Fließmontagesystemen der Automobilindustrie typischerweise keine Rüstzeit anfällt (vgl. Kapitel 2.1.2.3), entstehen durch den Variantenwechsel keine Zeitverluste.

5.2.2 Optimierungsmodell der Reihenfolgebildung zur Bestimmung der Überlast

Da zur Bildung der repräsentativen Bearbeitungszeit im Rahmen der Erstellung von Variantenmischgraphen (vgl. Kapitel 2.1.4.2) ein szenariobasierter Durchschnittstyp mit Erwartungswert und Varianz entwickelt wurde (vgl. Kapitel 5.1.4.1), kann in der Reihenfolgeplanung Überlast entstehen. Die Zielstellung des Optimierungsmodells besteht darin, für eine nach Kapitel 5.1.6 modellierte Fließbandabstimmung eine Montagesequenz des Produktionsprogramms so zu ermitteln, dass die resultierende Überlast minimal wird.

5.2.2.1 Vorgehensmodell zur Bestimmung von Überlast

Das in Abbildung 5.9 schematisch dargestellte Vorgehensmodell beschreibt die Identifikation der Überlast einer Fließbandabstimmung auf Grundlage ihrer Eigenschaften

sowie weiterer Eingangsgrößen. Hierzu sind zwei wesentliche Zwischenschritte durchzuführen: Die Berechnung arbeitsplatz- und optionsspezifischer Bearbeitungszeiten sowie die Berechnung fließbandabstimmungsspezifischer Driftbereiche. Liegen keine zukünftigen Produktionsprogramme vor, so können diese entsprechend dem algorithmischen Vorgehen in Anhang A.2 aus dem generischen Variantenmix des jeweiligen Szenarios unter Berücksichtigung von Ausstattungsoptionen und Ausstattungspaketen instanziiert werden. Der Algorithmus erzeugt zufällige Ausprägungen aus $v = 2^{oe} * dc$ Fahrzeugvarianten von dc Antriebskonzepten und oe Ausstattungsmerkmalen, die in ihrer Gesamtheit den jeweils eingangs definierten Eintrittswahrscheinlichkeiten entsprechen.

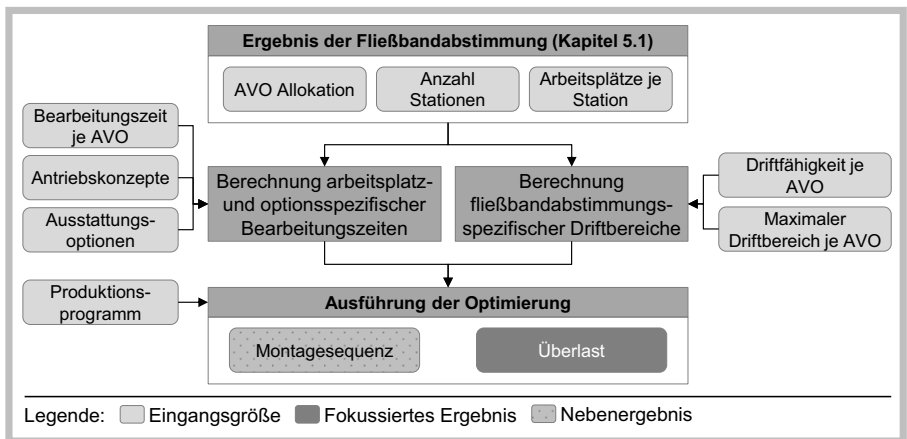


Abbildung 5.9: Vorgehensmodell zur Bestimmung von Überlast (in Anlehnung an A_Heinzelmann (2018))

Berechnung arbeitsplatz- und optionsspezifischer Bearbeitungszeiten

Die im Montagesystem herzustellenden Fahrzeugvarianten bilden sich im vorliegenden Ansatz aus den Antriebskonzepten und Ausstattungsoptionen (vgl. Kapitel 2.1.2.3). Zur Optimierung der Fließbandabstimmung werden entsprechend Kapitel 5.1.4.1 durchschnittliche robuste Bearbeitungszeiten je Szenario errechnet. Im physischen Montageprozess wird jeweils eine konkret ausgeprägte Fahrzeugvariante bearbeitet, sodass die Ansetzung von Durchschnittswerten nicht zulässig ist. Es ist daher ein Algorithmus

erforderlich, der für jeden Arbeitsplatz einer Fließbandabstimmung die konkreten Bearbeitungszeiten aller zulässigen Kombinationen aus Antriebskonzept und Ausstattungsoption erzeugt. Ein hierzu geeigneter Algorithmus findet sich in Anhang A.3.

Berechnung fließbandabstimmungsspezifischer Driftbereiche

Das Driften von Montagemitarbeitern wird verwendet, um Arbeitsvorgänge auch über die Stationsgrenzen hinaus bearbeiten zu können und somit Überlast zu vermeiden (vgl. Kapitel 2.1.4.3). Es gilt daher entsprechende Driftbereiche des Arbeitsplatzes j zwischen Montagestationen k zu definieren sowie deren zeitliche Ausprägung zu bestimmen. Abbildung 5.10 verdeutlicht die Entstehung von Driftbereichen auf Basis der Driftfähigkeit von Arbeitsvorgängen (AVO).

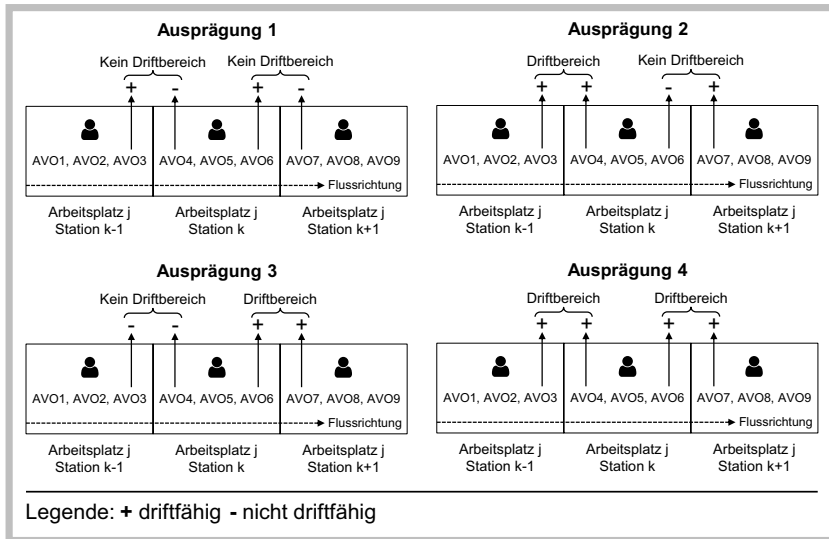


Abbildung 5.10: Übersicht möglicher Ausprägungen von Driftbereichen (in Anlehnung an A_Heinzelmann (2018))

Der zeitliche Umfang von Driftbereichen wird nachfolgend als Driftzeitpuffer $t_{dr,j,k}$ bezeichnet. Dieser beschreibt, wie lange der Mitarbeiter an Arbeitsplatz j an Montagestation k maximal in den nachgelagerten Arbeitsplatz der Montagestation $k + 1$ eindringen kann. Entsprechend wird festgelegt, dass ebenso die Arbeit an Arbeitsplatz j der Montagestation $k + 1$ um $t_{dr,j,k}$ früher begonnen werden kann. Weiterhin ist die Nutzung

von Driftbereichen nur möglich, wenn hierdurch keine Restriktionen der parallelen Bearbeitung verletzt werden. Um einen Driftbereich zu etablieren, ist es zudem erforderlich, dass sowohl der Arbeitsvorgang an der rechten Stationsgrenze von j an k als auch an der linken Stationsgrenze von j an $k + 1$ driffähig ist ($t_{dr,j,k} > 0$). Die Driffähigkeit kann beispielsweise abgelehnt werden, falls einem Arbeitsvorgang ein stationäres Betriebsmittel alloziert ist. Die automatisierte Bestimmung von Driftbereichen wird durch das algorithmische Vorgehen in Anhang A.4 ermöglicht. (A_Heinzelmann 2018)

5.2.2.2 Modell der Reihenfolgeplanung zur Unterstützung der Bewertung

Nachdem die notwendigen Vorarbeiten zur Bestimmung der Überlast beschrieben sind, erfolgt die Entwicklung des Optimierungsmodells der Reihenfolgebildung.

Diskussion bestehender Ansätze

Nachfolgend werden Ansätze aus der Literatur vorgestellt, die eine Minimierung der Überlast im Rahmen der Reihenfolgebildung ermöglichen und somit als Vorarbeit dienen können.

Car Sequencing: Das Car Sequencing steuert die Abfolge von Fahrzeugen mit vergleichsweise arbeitsintensiven Ausstattungsoptionen so, dass Überlast vermieden wird. Zur Steuerung der Abfolge werden bestimmten Ausstattungsoptionen Sequenzierungsregeln zugeordnet. Das Optimierungsproblem ermittelt dabei Montagesequenzen, die diese Sequenzierungsregeln einhalten. (Gottlieb, Puchta & Solnon 2003) Erweiterungen des Basisproblems beschäftigen sich unter anderem mit der Unterscheidung von weichen und harten Sequenzierungsregeln (Solnon et al. 2008), der Gütebewertung von Sequenzierungsregeln (Lesert et al. 2011) und der Skalierung von Sequenzierungsregeln zur Erzeugung von Flexibilität innerhalb der Auftragsreihenfolge (Bürgin 2018). Der Car-Sequencing-Ansatz setzt voraus, dass Sequenzierungsregeln der Ausstattungsoptionen vorliegen. Weiterhin zielt der Ansatz lediglich auf die Identifikation einer den Regeln genügenden Montagesequenz. Die Minimierung der Überlast ist nicht probleminhärent vorgesehen und ist gegebenenfalls über Nebenbedingungen zu formulieren.

Mixed-Model-Sequencing: Das Mixed-Modell-Sequencing wurde von Kilbridge & Wester (1963) sowie Thomopoulos (1967) eingeführt und fokussiert die Überlastentstehung in der Fließfertigung. Die Zielstellung des Ansatzes besteht darin eine Sequenz zu iden-

tifizieren, in der durch die Abwechslung von Varianten mit unterschiedlichen Bearbeitungszeiten eine minimale Überlast erreicht wird (Thomopoulos 1967). Eine Übersicht überlastbezogener Zielkriterien findet sich bei Boysen (2005).

Das Mixed-Modell-Sequencing erweist sich hinsichtlich der Zielstellung als geeigneter Ansatz, da die mathematische Formulierung auf die Minimierung der Überlast ausgelegt ist und keine Sequenzierungsregeln bekannt sind. Dieser Ansatz wird daher nachfolgend angewendet. Die Formulierung des Grundproblems wird in Anlehnung an Boysen (2005) vorgenommen, wobei hier die Bearbeitung an mehreren Arbeitsplätzen j einer Montagestation k nicht berücksichtigt ist. Es erfolgt daher eine Weiterentwicklung des Modells zur Beherrschung paralleler Arbeitsplätze.

5.2.2.3 Zielfunktion

Die Zielfunktion in Formel 5.58 minimiert das Zielkriterium der Überlast pro Schicht t_{ol} über alle Takte zur Montage des Produktionsprogramms $at \in AT$, Arbeitsplätze $j \in J$ und Montagestationen $k \in K$. Überlast entsteht dann, wenn der Startzeitpunkt der Bearbeitung an einem Arbeitsplatz $ms_{at,j,k}$ addiert mit der Bearbeitungszeit $t_{v,j,k}$ der zugeordneten Variante $x_{v,at} \in \{0,1\}$ ($x_{v,at} = 1$) im Takt at die rechte Stationsgrenze überschreitet. Die rechte Stationsgrenze entspricht der summierten verfügbaren Bearbeitungszeit t_m aller vor der Montagestation k durchlaufenen Montagestationen m und kann durch die Nutzung des Driftbereichs $y_{at,j,k} \in \{0,1\}$ ($y_{at,j,k} = 1$) um den Driftzeitpuffer $t_{dr,j,k}$ erweitert werden. Da der Startzeitpunkt alle bereits vergangenen Takte ($at - 1$) einschließt, sind diese mit der Taktzeit C gewichtet vom Ende der Bearbeitung zu subtrahieren. Beendet der Mitarbeiter die ihm zugeordneten Arbeitsvorgänge vor Erreichen der Stationsgrenze, verhindert die Maximum-Funktion eine Reduktion der ermittelten Überlast t_{ol} . (A_Heinzelmann 2018) Maximums-, Minimums- und Betragsfunktionen sind in den Kapiteln 5.2.2.3 und 5.2.2.4 aus Gründen der Übersichtlichkeit notiert. Durch eine Zerlegung der Funktion in mehrere Gleichungen kann eine lineare Formulierung des Modells erzeugt werden (Klein & Scholl 2012).

$$P: \min t_{ol} = \sum_{at \in AT} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \max \left\{ ms_{at,j,k} + \sum_{v \in V} t_{v,j,k} * x_{v,at} - C * (at - 1) - \sum_{m \in K | m \leq k} t_m - t_{dr,j,k} * y_{at,j,k}, 0 \right\} \quad (5.58)$$

5.2.2.4 Nebenbedingungen

Nachfolgend werden die Nebenbedingungen des linearen Problems beschrieben. Diese gliedern sich in Nebenbedingungen zur Nachfragebefriedigung (1) sowie zu Startzeitpunkten (2) und Endzeitpunkten der Bearbeitung von Montageaufgaben (3).

(1) Nachfragebefriedigung

Formel 5.59 gewährleistet, dass in jedem Takt at der Montageprozess für genau eine Fahrzeugvariante v beginnt. Die Nachfrage einer Fahrzeugvariante dm_v gilt nach Formel 5.60 dann als befriedigt, wenn entsprechend viele Einheiten der Variante v in den Montageprozess eingesteuert sind. (A_Heinzelmann 2018)

$$\sum_{v \in V} x_{v,at} = 1 \quad \forall at \in AT \quad (5.59)$$

$$\sum_{at \in AT} x_{v,at} = dm_v \quad \forall v \in V \quad (5.60)$$

(2) Startzeitpunkt der Bearbeitung

Der Startzeitpunkt der Bearbeitung $ms_{at,j,k}$ in einem Takt at an Arbeitsplatz j der Station k unterliegt mehreren Beschränkungen. So stellt Formel 5.61 sicher, dass der Endzeitpunkt $me_{at-1,j,k}$ des vorherigen Takts ($at - 1$) am selben Arbeitsplatz überschritten ist, bevor mit der Bearbeitung in Takt at begonnen wird. Nach Formel 5.62 gilt ebenso, dass die Bearbeitung an der vorherigen Montagestation ($k - 1$) abzuschließen ist, bevor diese an Montagestation k beginnen kann. Formel 5.63 gewährleistet zudem, dass die Bearbeitung an Station k in Takt at frühestens nach ($at - 1$) Takten und dem Durchlaufen aller vorherigen Montagestationen m startet. Die Bearbeitung kann erst starten, wenn das Fahrzeug nach at Takten in die Linie eingesteuert wird und alle Stationen vor k passiert hat, an denen die Bearbeitungszeit der Montagestation t_m zur Verfügung steht (typisch: $t_m = C$). Die Bearbeitung kann jedoch um den Wert des Driftpuffers $t_{dr,j,k-1}$ früher starten, insofern dieser nicht von Montagestation $k - 1$ genutzt wird ($y_{at,j,k-1} = 0$). Für die Arbeitsplätze der ersten Montagestation gilt im ersten Takt nach Formel 5.64 ein Start der Bearbeitung zum Zeitpunkt 0. (A_Heinzelmann 2018)

$$me_{at-1,j,k} < ms_{at,j,k} \quad \forall at \in AT | at \geq 2; j \in J; k \in K \quad (5.61)$$

$$me_{at,j,k-1} < ms_{at,j,k} \quad \forall at \in AT; j \in J; k \in K | k \geq 2 \quad (5.62)$$

$$C * (at - 1) + \sum_{m \in K | m < k} t_m - t_{dr,j,k-1} * y_{at,j,k-1} \leq ms_{at,j,k} \quad \forall at \in AT; j \in J; k \in K \quad (5.63)$$

$$ms_{at,j,k} = 0 \quad \forall j \in J; at = 1; k = 1 \quad (5.64)$$

Für Mitarbeiter an Montagestationen gilt, dass sich diese mit unendlicher Geschwindigkeit bewegen (vgl. Kapitel 5.1.1) und somit die Wegstrecke vom Ort der Beendigung einer Montageaufgabe zurück zum Anfang der Montagestation keine Limitierung der Startzeitpunkte darstellt. Mit Formel 5.65 wird daher eine Kompensation definiert, die einen Bearbeitungsstart an allen Paaren von Arbeitsplätzen (j, l) einer Montagestation innerhalb einer halben Taktzeit C fordert. (A_Heinzelmann 2018)

$$|ms_{at,j,k} - ms_{at,l,k}| \leq C/2 \quad \forall at \in AT; (j, l) \in J_k; k \in K \quad (5.65)$$

(3) Endzeitpunkt der Bearbeitung

Der Endzeitpunkt der Bearbeitung $me_{at,j,k}$ wird nach Formel 5.66 erreicht, wenn die Bearbeitungszeit $t_{v,j,k}$ der entsprechenden Variante v im Takt at an Arbeitsplatz j der Station k vergangen ist oder das Fahrzeug die rechte Stationsgrenze erreicht. Für $y_{at,j,k} = 1$ erweitert sich die rechte Stationsgrenze um den Driftpuffer $t_{dr,j,k}$. Für den ersten Takt eines Montageprozesses existieren keine zeitlich vorgelagerten Fahrzeuge, so dass für alle Endzeitpunkte $me_{at,j,k}$ des fiktiven Takts $at = 0$ gemäß Formel 5.67 der Zeitpunkt 0 gilt. Um den Abschluss des Montageprozesses zu gewährleisten, stellt Formel 5.68 sicher, dass der späteste Endzeitpunkt $me_{|AP|,j,k|}$ nicht nach dem Durchlaufen aller Takte und Montagestationen liegt. (A_Heinzelmann 2018)

$$me_{at,j,k} = \min \left\{ ms_{at,j,k} + \sum_{v \in V} t_{v,j,k} * x_{v,at}, C * (at - 1) + \sum_{m \in K | m \leq k} t_m + t_{dr,j,k} * y_{at,j,k} \right\} \quad \forall j \in J; k \in K; at = 0; \quad (5.66)$$

$$me_{at,j,k} = 0 \quad \forall j \in J; k \in K; \quad at = 0; \quad (5.67)$$

$$me_{|AP|,j,|K|} \leq (|AT| + |K| - 1) * C \quad \forall j \in J \quad (5.68)$$

5.2.2.5 Lösungsverfahren

In der Literatur sind unterschiedliche Lösungsansätze für das Mixed-Modell-Sequencing-Problem bekannt. So werden sowohl exakte Verfahren als auch heuristische Eröffnungs- und Verbesserungsverfahren (vgl. Kapitel 2.3.4) eingesetzt (Boysen, Fliedner & Scholl 2009b). Da das Mixed-Modell-Sequencing-Problem, ebenso wie das Fließbandabstimmungsproblem (vgl. Kapitel 2.3.5), der Komplexitätsklasse NP-schwer zugeordnet wird, werden vorrangig heuristische Verfahren eingesetzt (Tahriri, Zawiah Md Dawal & Taha 2014). Dabei konnte in vergleichenden Studien bisher kein allgemein dominantes Verfahren identifiziert werden (Sumichrast & Russell 1990; Bautista Valhondo & Cano 2006; Mosadegh, Fatemi Ghomi & Süer 2016). Daher wird der Einsatz eines Dynamic Search- oder ein Automatic Search-Algorithmus empfohlen, die diese an das Branch & Cut-Verfahren angelehnt sind und unterschiedliche Heuristiken zur Lösungsfindung einsetzen (ILOG 2007; Hochdörffer 2018; Laborie et al. 2018).

5.2.3 Bewertung der Greenfield-Kosten

Um die monetäre Vergleichbarkeit von Fließbandabstimmungen mit und ohne induzierte Überlast im Rahmen der Reihenfolgebildung zu ermöglichen, erfolgt in diesem Kapitel eine Kostenbewertung zur Auflösung der Überlast.

5.2.3.1 Kostenmodell zur Bewertung des Überlastausgleichs

Der Zielfunktionswert des Optimierungsmodells zur Bestimmung der Auftragsreihenfolge aus Kapitel 5.2.2 beschreibt die Überlast pro Schicht t_{ol} , die durch geeignete Maßnahmen zu kompensieren ist. Hierzu wurden in Kapitel 2.1.4.3 „Offene Stationsgrenzen“ („Driften“), „Dynamische Kapazitätserweiterung durch Unterstützer“ und „Bandstopp“ als mögliche Kompensationsmaßnahmen diskutiert und die Maßnahmen „Offene Stationsgrenzen“ und „Dynamische Kapazitätserweiterung durch Unterstützer“ als hinsichtlich der Problemstellung geeignet identifiziert. Die Öffnung der Stationsgrenzen ist im Optimierungsmodell der Auftragsreihenfolge in Kapitel 5.2.2 berücksichtigt, sodass die verbleibende Überlast durch eine dynamische Kapazitätserweiterung kompensiert wird.

Das entwickelte Planungsvorgehen zur Bestimmung einer veränderungsfähigen Fließbandabstimmung umfasst eine Greenfieldplanung in Periode p_0 (Szenario s_0) sowie eine Brownfieldplanung hinsichtlich mehrerer Szenarien in Periode p_1 (vgl. Kapitel 5.1.6.1). Alle Jahre a einer Periode A_p sind bei der Bewertung der Kapazitätserweiterung zu berücksichtigen, da die Überlast unter Annahme eines unveränderten Produktionsprogramms in jedem Jahr zu kompensieren ist. Ein Jahr besteht aus d_y Arbeitstagen, an denen in $shft_d$ Schichten produziert wird. Zur Abschätzung der Kapazitätserweiterungskosten wird die resultierende Überlast mit dem Stundensatz des Unterstützers $c_{w,p}$ bewertet²³. Die aus diesen Faktoren errechneten Kapazitätserweiterungskosten (siehe Formel 5.69) zu Beginn einer Planungsperiode $c_{ol,0,p}$ bilden die Basis zur Berücksichtigung der Lohnkostenentwicklung.

$$c_{ol,0,p} = d_y * shft_d * t_{ol} * c_{w,p} \quad (5.69)$$

Die Entwicklung der Lohnkosten wird durch die jährliche Verzinsung mit dem Zinssatz int nach Formel 5.70 (Tietze 2014) modelliert. Somit können die jahresspezifischen Kapazitätserweiterungskosten $c_{ol,a,p}$ errechnet werden.

$$c_{ol,a,p} = c_{ol,0,p} * (1 + int)^a \quad (5.70)$$

Da die Bewertung der Kapazitätserweiterungskosten zur Kompensation der Überlast auf Basis einer Periode erfolgt, sind die einer Periode zugeordneten jahresspezifischen Kapazitätserweiterungskosten zu den Kapazitätserweiterungskosten einer Planungsmethode $c_{ol,p}$ nach Formel 5.71 zu aggregieren.

$$c_{ol,p} = \sum_{a \in A_p} c_{ol,a} \quad (5.71)$$

5.2.3.2 Addition der Kapazitätserweiterungskosten

Die Kosten für Montagestationen c_{stat} , Betriebsmittel $c_{inv,b}$ und Mitarbeiter c_{ap} der Periode p_0 werden in der Zielfunktion f_{gk} des Optimierungsmodells der Fließbandabstimmung in Kapitel 5.1.6.1 erfasst. Zur Vervollständigung der Bewertung von Fließbandabstimmungen sind zudem die Kosten zur Kompensation von resultierender Überlast

²³ Ansätze zur Feinplanung von Unterstützereinsätzen bieten unter anderem Claus, Herrmann & Manitz (2015) sowie Krüger (2004).

zu berücksichtigen. Diese werden durch das Optimierungsmodell zur Reihenfolgebildung in 5.2.2 sowie die monetäre Bewertung der Kapazitätserweiterung durch Unterstützer zur Kompensation von Überlast ermittelt. Die Bewertung des Entscheidungskriteriums der Greenfield-Kosten einer Lösung r_{gk} ergibt sich damit aus der Addition der Zielfunktion f_{gk} und den Kapazitätserweiterungskosten $c_{ol,0}$ (siehe Formel 5.72).

$$r_{gk} = f_{gk} + c_{ol,0} \quad (5.72)$$

5.2.4 Bewertung der Flexibilität

Zur Erläuterung der Flexibilitätsbewertung einer Fließbandabstimmung wird nachfolgend ein Rückblick auf die bisherigen Überlegungen und Erkenntnisse gegeben. In Kapitel 5.1.3.1 wurde die Flexibilität der Fließbandabstimmung als Eigenschaft definiert, mehrere Variantenmischverhältnisse ohne zusätzliche Wandlungsaufwände abzubilden. Infolgedessen wurde im Rahmen der Lösung des Fließbandabstimmungsproblems das Zielkriterium der Flexibilität eingeführt. Dieses zielt darauf ab, die Varianz der aggregierten Bearbeitungszeit eines Arbeitsplatzes zu minimieren, wodurch die Robustheit hinsichtlich Schwankungen im Variantenmix erhöht, und somit ein Flexibilitätskorridor geschaffen wird (vgl. Kapitel 5.1.6.1). Eine direkte Ableitung der Flexibilitätsbewertung aus dem Zielfunktionswert der Flexibilität ist nicht zulässig, da hierfür die Auswirkungen veränderter repräsentativer Bearbeitungszeiten (vgl. Kapitel 2.1.4.2) zu bewerten sind.

5.2.4.1 Vorgehensmodell

Die Bewertung der Flexibilität von Fließbandabstimmungen erfolgt anhand der Durchführung folgender Schritte: Im ersten Schritt werden die Modellparameter definiert, wodurch der Untersuchungsraum festgelegt wird. Zur Einschränkung des Prüfaufwandes gilt es nachfolgend den Untersuchungsraum durch systematische Variation der Variantenanteile im Modellmix zu reduzieren und die Prüfung auf Zulässigkeit der gewählten Fließbandabstimmung durchzuführen. Die Prüfergebnisse werden in Zulässigkeitsvektoren zusammengefasst und abschließend durch die in Kapitel 5.2.4.2 beschriebenen Flexibilitätskennzahlen bewertet.

Definition der Modellparameter

In einem ersten Schritt wird das Inkrement inc der Betriebspunkte definiert. Dieses beschreibt die Granularität des Modellmix der Antriebskonzepte in Prozent und legt den Detaillierungsgrad der Flexibilitätsuntersuchung fest. Ein Betriebspunkt bp (siehe Formel 5.73), beschreibt den Modellmix wobei die Summe der Anteile $sh_1, \dots, sh_{|DC|}$ 100% entspricht.

$$bp = \begin{pmatrix} sh_1 \\ \dots \\ sh_{|DC|} \end{pmatrix} \quad (5.73)$$

Die Anzahl der zu prüfenden Betriebspunkte $|BP_p|$ wird in Abhängigkeit des Inkrements und der Anzahl an betrachteten Antriebskonzepten $|DC|$, durch den in Formel 5.74 dargestellten Binomialkoeffizienten²⁴, abzüglich des bereits als Lösung ermittelten Betriebspunkts angegeben.

$$|BP_p| = \binom{|DC| + \frac{100\%}{inc} - 1}{\frac{100\%}{inc}} - 1 \quad (5.74)$$

Reduktion des Untersuchungsraums

Da hierdurch bereits für eine vergleichsweise grobe Granularität von $inc = 10\%$ eine hohe Anzahl zu prüfender Betriebspunkte entsteht (vgl. Tabelle 5.9), wird nachfolgend ein Vorgehen zur Reduktion des Untersuchungsraums beschrieben. Die Menge aller zu prüfender Betriebspunkte wird hierbei durch die reduzierte Menge zu prüfender Betriebspunkte BP_r ersetzt. Dies erfolgt durch die separate Betrachtung der Freiheitsgrade FG_{dc} aller Betriebspunkte BP_p . Ein Freiheitsgrad beschreibt die Erhöhung (Reduktion) des Modellmixanteils eines Antriebskonzepts dc bei komplementärer Reduktion (Erhöhung) der Anteile der Antriebskonzepte $DC \setminus \{dc\}$. Hierbei bleibt das relative Anteilsverhältnis der Antriebskonzepte $DC \setminus \{dc\}$ unverändert. Die Anzahl der Freiheitsgrade $|FG|$ entspricht somit der Anzahl an Antriebskonzepten $|DC|$.

²⁴ Die Berechnung der Anzahl an Betriebspunkten kann auf das kombinatorische Problem „Urnenmodell ohne Reihenfolge mit Zurücklegen“ (Papula 2014) zurückgeführt werden. Dabei entsprechen die Varianten den zu ziehenden Kugeln und das Inkrement beschreibt die Anzahl an Ziehungen.

Tabelle 5.9: Anzahl zu prüfender Betriebspunkte für ausgewählte Probleminstanzen

Anzahl Antriebskonzepte $ DC $	Inkrement inc	Zu prüfende Betriebspunkte $ BP_p $
1	5	0
2	5	20
3	5	230
4	5	1770
5	5	10625
1	10	0
2	10	10
3	10	65
4	10	285
5	10	1000

Abbildung 5.11 veranschaulicht den Untersuchungsraum aller Betriebspunkte BP_p für drei Antriebskonzepte, deren Anteile am Modellmix in Summe 100% betragen, als Fläche. Der reduzierte Untersuchungsraum BP_r wird durch Pfeile dargestellt, die eine Verschiebung des Betriebspunkts in zunehmende und abnehmende Richtung anzeigen. Durch die Reduktion des Untersuchungsraums entsteht daher eine modellhafte Annäherung an das tatsächliche Zulässigkeitsverhalten des Untersuchungsraums.

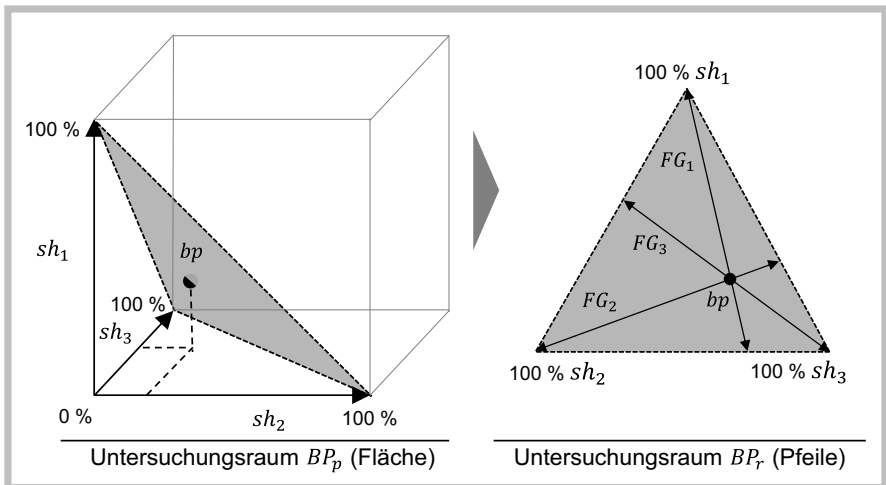


Abbildung 5.11: Reduktion des Untersuchungsraums am Beispiel von $|DC| = 3$ Antriebskonzepten für den Betriebspunkt $sh_1 = 30\%$, $sh_2 = 20\%$, $sh_3 = 50\%$

Da für einen Freiheitsgrad FG_{dc} der Anteil eines Antriebskonzepts sh_{dc} zwischen 0 % und 100 % variiert wird, sind für die weiteren Antriebskonzepte $L = DC \setminus \{dc\}$ die relativen Anteile $sh_l^{r,dc}$ im Variantenmix ohne dc zu bestimmen. Dies erfolgt durch die Skalierung der jeweiligen Anteile auf 100 % (siehe Formel 5.75).

$$sh_l^{r,dc} = \frac{sh_l}{\sum_{l \in L} sh_l} * 100\% \tag{5.75}$$

Nach Formel 5.76 lassen sich somit die relativ skalierten Anteile $sh_l^{var,dc}$ aller Varianten L für jeden variierten Anteil sh_{dc}^{var} des Antriebskonzepts dc bestimmen.

$$sh_l^{var,dc} = (100\% - sh_{dc}^{var}) * sh_l^{r,dc} \tag{5.76}$$

Abbildung 5.12 führt das Beispiel aus Abbildung 5.11 fort und stellt die systematische Variation der Anteile im Modellmix mit einem Inkrement von $inc = 10$ Prozentpunkten dar. Somit besteht der reduzierte Untersuchungsraum je FG_{dc} aus 11 Betriebspunkten. Da eine Fließbandabstimmung auf den Betriebspunkt bp ausgelegt und dieser damit bekannt ist, verbleiben je FG_{dc} 10 zu prüfende Betriebspunkte bp_r . Die reduzierte Anzahl zu prüfender Betriebspunkte ergibt sich damit zu 3 (|DC|) mal 10 (bp_r je dc) gleich 30 (vgl. Tabelle 5.10). Im Modellmix des FG_1 sind beispielhaft die Anteile der Antriebskonzepte 2 und 3 für die Variation des Anteils des Antriebskonzepts 1 auf 70 % sh_1^{70} dargestellt. Der auf Gültigkeit zu prüfende Betriebspunkt des reduzierten Untersuchungsraums setzt sich hierbei aus 70 % dc_1 , 21,43 % dc_2 und 8,57 % dc_3 zusammen.

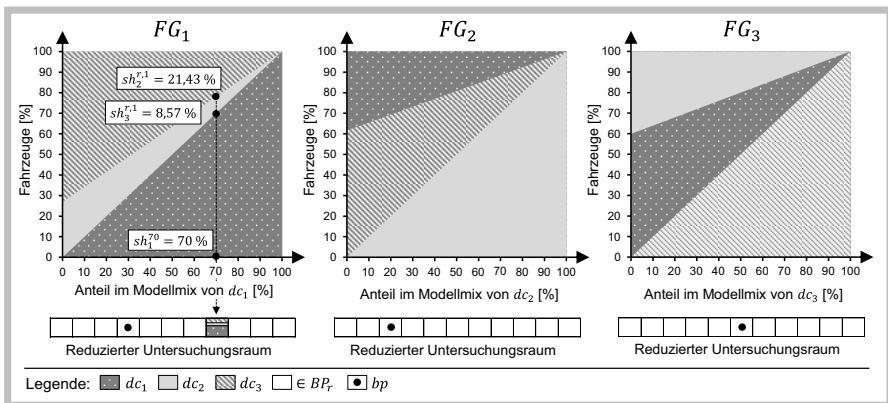


Abbildung 5.12: Konzept zur Identifikation der zu prüfenden Variantenverhältnisse

Die reduzierte Anzahl zu prüfender Betriebspunkte $|BP_r|$ entspricht für $|DC| \leq 2$ der nicht reduzierten Anzahl und kann daher nach Formel 5.74 bestimmt werden. Die Bestimmung von $|BP_r|$ für $|DC| > 2$ erfolgt hingegen nach Formel 5.77.

$$|BP_r| = \left(\left(2 + \frac{100\%}{\frac{inc}{100\%}} - 1 \right) - 1 \right) * |DC| \quad (5.77)$$

Tabelle 5.10 stellt die Anzahl sowie die durch das Vorgehen bestimmte reduzierte Anzahl zu prüfender Betriebspunkte für ausgewählte Varianten und Inkremente gegenüber. Hierbei ist ersichtlich, dass der Prüfaufwand deutlich verringert ist. Es ist anzumerken, dass im Übergang von zwei zu drei Antriebskonzepten jeweils ein Bruch im ansonsten linearen Anstieg von $|BP_r|$ vorzuliegen scheint. Dies kann jedoch darauf zurückgeführt werden, dass die Betriebspunkte beider Varianten identisch sind und daher auf eine doppelte Prüfung verzichtet wird.

Tabelle 5.10: Anzahl der reduzierten zu prüfenden Betriebspunkte ausgewählter Probleminstanzen

Anzahl Antriebskonzepte $ DC $	Inkrement inc	Zu prüfende Betriebspunkte $ BP_p $	Reduzierte Anzahl $ BP_r $
1	5	0	0
2	5	20	20
3	5	230	60
4	5	1770	80
5	5	10625	100
1	10	0	0
2	10	10	10
3	10	65	30
4	10	285	40
5	10	1000	50

Zulässigkeitsprüfung

Eine Fließbandabstimmung bzgl. eines spezifischen Variantenmix ist dann zulässig, wenn für jeden Arbeitsplatz j gilt, dass die Summe der betriebspunktspezifischen durchschnittlichen Bearbeitungszeiten t_i^{bp} aller dem Arbeitsplatz zugeordneten Arbeitsvorgänge i die Taktzeit C im Mittel nicht überschreitet (siehe Formel 5.78). Die Menge aller

Betriebspunkte, für die das Kriterium der Zulässigkeit erfüllt ist, wird nachfolgend als Flexibilitätskorridor bezeichnet.

$$zv_{dc}^{bp} = \begin{cases} 1 & \text{für } \sum_{i \in I} x_{ij} * t_i^{bp} \leq C \quad \forall j \in J \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.78)$$

Das Ergebnis der Zulässigkeitsprüfung $zv_{dc}^{bp} \in \{0,1\}$ kann „zulässig“ ($zv_{dc}^{bp} = 1$) oder „nicht zulässig“ ($zv_{dc}^{bp} = 0$) sein und wird im Zulässigkeitsvektor des Antriebskonzepts \vec{zv}_{dc} gespeichert (siehe Formel 5.79).

$$\vec{zv}_{dc} = \begin{pmatrix} zv_{dc}^0 \\ \dots \\ zv_{dc}^{100} \end{pmatrix} \quad (5.79)$$

Die durch dieses Vorgehen erzeugten Zulässigkeitsvektoren werden nachfolgend anhand geeigneter Kriterien bewertet und zur Flexibilitätskennzahl aggregiert.

5.2.4.2 Flexibilitätskennzahl

Die Flexibilitätskennzahl (FKZ) setzt sich aus den untergeordneten Kennzahlen der Robustheit und Lage zusammen. Diese Kennzahlen sind derart gestaltet, als dass die beste Ausprägung dem Wert 100 entspricht, wohingegen die schlechteste Ausprägung durch den Wert 0 repräsentiert wird. Die Bewertung der Flexibilität erfolgt jeweils hinsichtlich des reduzierten Untersuchungsraums eines Freiheitsgrads FG_{dc} (vgl. Abbildung 5.12) und schließt in einer Aggregation der Einzelbewertungen.

Robustheit

Die Kennzahl der Robustheit $Fl_{R,dc}$ beschreibt die Breite eines Flexibilitätskorridors bei systematischer Variation des Anteils eines Antriebskonzepts dc . Dieser repräsentiert den Bereich des reduzierten Untersuchungsraums eines Freiheitsgrads (vgl. Abbildung 5.12), der alle Verhältnisse beinhaltet, die durch die jeweilige Fließbandabstimmung produziert werden können. Die Kennzahl errechnet sich nach Formel 5.80 aus der Differenz der oberen Begrenzung FK_{dc}^+ und der unteren Begrenzung FK_{dc}^- des Flexibilitätskorridors.

$$Fl_{R,dc} = FK_{dc}^+ - FK_{dc}^- \quad (5.80)$$

Abbildung 5.13 visualisiert die Bewertung des Flexibilitätskorridors eines Antriebskonzepts dc durch die Kennzahlen der Robustheit und Lage.

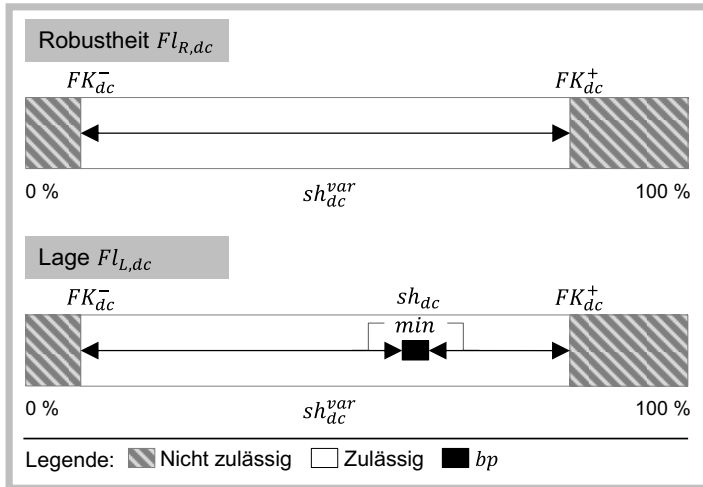


Abbildung 5.13: Kennzahlen der Robustheit und Lage

Lage

Eine weitere zu bewertende Eigenschaft von Flexibilitätskorridoren ist die relative Lage des Betriebspunkts bp . Da durch systeminhärente Flexibilität schwankende, unsystematische Veränderungen im Modellmix adressiert werden (vgl. Kapitel 5.1.3), ist aufgrund der unsicheren Veränderungsrichtung dieser Schwankungen eine möglichst große Pufferzone zwischen dem Betriebspunkt sowie der oberen und unteren Begrenzung zu präferieren. Liegt der Anteil eines Antriebskonzepts beispielsweise nahe an 100 Prozent, so ist die Möglichkeit zur Erhöhung des Anteils stark begrenzt. Dementsprechend entsteht durch die Wahl des Betriebspunkts eine Obergrenze der Flexibilitätskennzahl FKZ^+ . Die Kennzahl der Lage $FL_{L,dc}$ ergibt sich nach Formel 5.81 zum Minimum der Differenzen des Betriebspunkts und der oberen sowie unteren Begrenzung FK_{dc}^+ und FK_{dc}^- . Die Skalierung mit dem Faktor 2 wird vorgenommen, um den Wertebereich bis 100 auszudehnen und so Konsistenz zum Wertebereich der Robustheitskennzahl herzustellen.

$$FL_{L,dc} = 2 * \min\{|FK_{dc}^+ - sh_{dc}|, |FK_{dc}^- - sh_{dc}|\} \quad (5.81)$$

Zusammenführung

Die Bewertungen liegen nun für alle Freiheitsgrade vor. Im ersten Schritt zur Zusammenführung werden die antriebskonzeptspezifischen Bewertungen der Robustheit $Fl_{R,dc}$ (siehe Formel 5.82) und Lage $Fl_{L,dc}$ (siehe Formel 5.83) arithmetisch gemittelt.

$$Fl_R = \frac{\sum_{dc \in DC} Fl_{R,dc}}{|DC|} \quad (5.82)$$

$$Fl_L = \frac{\sum_{dc \in DC} Fl_{L,dc}}{|DC|} \quad (5.83)$$

Nachdem die Robustheit und Lage als Bestandteile der Flexibilität definiert sind, werden diese mit $w_{Fl_R} \in \{0 \leq w_{Fl_R} \leq 1\}$ (Robustheit) bzw. $w_{Fl_L} \in \{0 \leq w_{Fl_L} \leq 1\}$ (Lage) gewichtet und nach Formel 5.84 zur Flexibilitätskennzahl FKZ aggregiert.

$$FKZ = w_{Fl_R} * Fl_R + w_{Fl_L} * Fl_L \quad (5.84)$$

Die Bewertung der Flexibilität ist damit abgeschlossen und kann im Entscheidungsmodul (Kapitel 5.3) aufgegriffen und zur Entscheidungsfindung herangezogen werden.

5.2.5 Bewertung der Wandlungsfähigkeit

Im Kontext der Fließbandabstimmung beschreibt Wandlungsfähigkeit eine vergleichsweise aufwandsarme Rekonfiguration des Variantenfließmontagesystems infolge einer Veränderung im Variantenmix (vgl. Kapitel 2.2.1). Die Evaluation der Wandlungsfähigkeit erfolgt auf monetärer Basis. Dabei wird ein System dann als vergleichsweise wandlungsfähiger definiert, wenn die gewichteten Gesamtkosten zur Realisierung einer Anzahl von Betriebspunkten durch Rekonfiguration des Variantenfließmontagesystems geringer sind (vgl. Kapitel 5.1.5). Analog dem Vorgehen zur Bewertung der Greenfield-Kosten sind die Kapazitätserweiterungskosten $c_{ol,p}$ auch bei der Bewertung von Szenarien zu berücksichtigen. Da die Eintrittswahrscheinlichkeiten P_s von Szenarien s spezifisch sind, werden diese zur Gewichtung der Kapazitätserweiterungskosten herangezogen. Die Bewertung des Wandlungsfähigkeitskriteriums r_{wf} ergibt sich daher nach Formel 5.85 aus dem Wert der Zielfunktion f_{wf} (vgl. Kapitel 5.1.6.1) und den szenario-spezifisch gewichteten Kapazitätserweiterungskosten $c_{ol,1,s}$.

$$r_{wf} = f_{wf} + \sum_{s \in S} P_s * c_{ol,1,s} \quad (5.85)$$

5.3 Entscheidungsmodul

In Kapitel 5.1 und 5.2 wurden Lösungsbündel von Fließbandabstimmungen für mehrere Szenarien erzeugt und in ihrer Bewertung erweitert. In diesem Kapitel erfolgt die Zusammenführung der methodischen Vorarbeiten zu einem multikriteriellen Auswahlproblem. Zur Auswahl eines Ansatzes für die Problemstellung der vorliegenden Arbeit werden die in Kapitel 2.3.1 benannten Ansätze überprüft.

Die Anwendung eines klassischen Ansatzes setzt die Kenntnis der Nutzenfunktion des Entscheiders voraus und fordert die Unabhängigkeit der Entscheidungskriterien (Geldermann & Lerche 2014). Hinsichtlich der Nutzenfunktion wird davon ausgegangen, dass diese aufgrund der Komplexität des Planungsproblems nicht exakt beschrieben werden kann. Weiterhin stehen die Entscheidungskriterien Kosten, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in einem Zielkonflikt (vgl. Kapitel 2.2.3), sodass eine Unabhängigkeit der Kriterien abzulehnen ist. Aufgrund dieser Einordnung wird die Anwendung eines Outranking-Ansatzes präferiert. Hinsichtlich der Auswahl eines Outranking-Verfahrens stellen Velasquez & Hester (2013) fest, dass Verfahren nicht hinsichtlich der Korrektheit von Lösung bewertet werden können, da diese für das Erstellen von Präferenzlisten nicht existiert. Vielmehr sei die Auswahl eines Verfahrens anhand der problem-spezifischen Anwendbarkeit und Nachvollziehbarkeit durchzuführen. Unterstützend konstatieren Zanakis et al. (1998) sowie Tscheikner-Gratl et al. (2017), dass die Anwendung unterschiedlicher Methoden im Rahmen von Fallstudien nicht zwingend zu identischen, jedoch zu ähnlichen Ergebnissen führt. Aufgrund der einfachen Handhabung, nachvollziehbaren Bewertung und verbreiteter Anwendung im produktionstechnischen Umfeld (Velasquez & Hester 2013), wird die Methode TOPSIS gewählt. Die grundlegende Vorgehensweise dieser Methode kann Anhang A.5 entnommen werden.

5.3.1 Auswahl der Zielkriterien

Die Lösungsbündel sol_{ev} umfassen Fließbandabstimmungen für alle Szenarien s und stellen die zur Auswahl stehenden Entscheidungsalternativen dar. Um die Bewertung der Lösungsbündel vornehmen zu können, sind nachfolgend Kriterien zu identifizieren, anhand deren die Evaluierung erfolgen kann. Bewertet werden die Lösungsbündel anhand der Zielkriterien der Greenfield-Kosten r_{gk} , der Flexibilität r_{flex} und Wandlungsfähigkeit r_{wf} . Die Bewertung der Greenfield-Kosten (r_{gk}) sowie der Wandlungsfähigkeit (r_{gk}) setzen sich jeweils aus den Zielfunktionswerten der Fließbandabstimmung ZWF_{gk}

und ZWF_{wf} (vgl. Kapitel 5.1.6.1) sowie den Kosten der Überlastkompensation (vgl. Kapitel 5.2.3 und 5.2.5) zusammen. Die Flexibilitätskennzahl FKZ (vgl. Kapitel 5.2.4.2) bildet die Bewertungsgröße der Flexibilität (r_{flex}).

5.3.2 Parameter der Zielkriterien

Für die Auswahl einer Entscheidungsalternative ist die Präferenz des Entscheiders hinsichtlich der Zielkriterien zu bewerten. Diese wird durch die Entscheidungsgewichte der Greenfield-Kosten w_{gk} , der Flexibilität w_{flex} sowie der Wandlungsfähigkeit w_{wf} repräsentiert. Weiterhin ist zu definieren ob eine Minimierung (min) oder Maximierung (max) der Zielkriterien angestrebt wird. Hinsichtlich der Zielkriterien der Greenfield-Kosten und Wandlungsfähigkeit sind die jeweils anfallenden Kosten zu minimieren. Im Gegensatz dazu wird eine hohe Flexibilität von Fließbandabstimmungen gefordert, weshalb eine Maximierung der Flexibilität erfolgt. Tabelle 5.11 fasst die Beschreibung der Zielkriterien zusammen.

Tabelle 5.11: Parameter der Zielkriterien des Auswahlproblems

Zielkriterium	Zeichen	Entscheidungsgewicht	Optimierungsrichtung
Greenfield-Kosten	r_{gk}	w_{gk}	min
Flexibilität	r_{flex}	w_{flex}	max
Wandlungsfähigkeit	r_{wf}	w_{wf}	min

Der Ideal- und Nadirpunkt bilden das Bezugssystem des Lösungsraums. Das theoretische Optimum aller Zielkriterien wird dabei als Idealpunkt bezeichnet, wohingegen der Nadirpunkt die jeweils schlechteste Ausprägung aller Zielkriterien vereint. Die Bestimmung der jeweils besten und schlechtesten Ausprägungen eines Zielkriteriums richtet sich nach dessen Optimierungsrichtung. Demzufolge wird zur Bestimmung des Nadirpunkts die entgegengesetzte Optimierungsrichtung des Idealpunkts gewählt.

6 Erprobung der Methodik und prototypische Softwarerealisierung

In diesem Kapitel wird die industrielle Erprobung des vorgestellten Lösungsansatzes zur Gestaltung einer veränderungsfähigen Abstimmung getakteter Fließmontagesysteme beschrieben. Der Lösungsansatz wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts „EFFECT 360° - Energieeffiziente und flexibel industriell herstellbare Elektrofahrzeugantriebe“ mit einem Projektpartner aus der Automobilindustrie angewendet (Fisel & Lanza 2016; Fisel, Arslan & Lanza 2017; Fisel et al. 2018). Der Nachweis der Anwendbarkeit des Ansatzes wurde durch die Umsetzung in einem Softwaredemonstrator erbracht.

Zunächst erfolgt die Einführung in das Anwendungsbeispiel einer Fließbandabstimmung sowie eine Darlegung der Ausgangssituation (Kapitel 6.1). Nachfolgend wird die Anwendung der Module des Lösungsansatzes beschrieben (Kapitel 6.2 - 6.4). Das Kapitel schließt mit einer Vorstellung des Softwaredemonstrators zur prototypischen Implementierung (Kapitel 6.5).

6.1 Einführung in das Anwendungsbeispiel der Automobilmontage

Das Forschungsprojekt EFFECT 360° beschäftigt sich unter anderem mit der Gestaltung veränderungsfähiger Fließbandabstimmungen in der Automobilmontage. Dies ergibt sich als relevante Herausforderung, da Veränderungen im Variantenmix, bspw. durch neue Antriebskonzepte, in der Abstimmung des Fließbandes zu berücksichtigen sind.

Um die Nachvollziehbarkeit der Erprobung sicherzustellen, wird nachfolgend das Planungsszenario beschrieben. Geplant wird die Fließbandabstimmung für einen PKW der Kompaktklasse, der drei unterschiedliche Antriebskonzepte aufweist. Neben einem

Verbrennungsmotor (ICE)²⁵ liegen sowohl die Varianten des batterieelektrischen Antriebs (BEV)²⁶ sowie eines bivalenten Erdgasmotors (bNGV)²⁷ vor. Die unterschiedlichen Antriebskonzepte werden durch ein Conversion Design realisiert und dementsprechend voll integriert (vgl. Anhang A.6), führen dabei jedoch, vor allen Dingen aufgrund ihrer technischen Eigenschaften, zu partiell heterogenen Bearbeitungszeiten und Betriebsmittelanforderungen sowie zu gänzlich verschiedenen Arbeitsvorgängen (vgl. Kapitel 2.1.2.3). Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Hauptlinie der Automobilmontage. Die Bandbelegung der Modulvormontagen wird nicht explizit betrachtet, da diese häufig unter anderen Planungsprämissen erfolgt (Klug 2010).

Die Planungsaufgabe ist die Identifikation von Fließbandabstimmungen sowohl für den gegenwärtigen Variantenmix als auch für zukünftige Variantenmixszenarien. Dabei wird die Zielstellung verfolgt, das Bündel von Fließbandabstimmungen zu identifizieren, das hinsichtlich der konkurrierenden Zielkriterien das anwenderspezifische Optimum aus den Kosten der Greenfield-Montagelinie, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit darstellt. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse erfolgt ein Vergleich mit der Referenzfließbandabstimmung des Projektpartners für das Szenario s_0 .

6.2 Optimierungsphase

Zur Durchführung der beschriebenen Planungsaufgabe wird in diesem Kapitel eine handhabbare Datenstruktur als operative Grundlage des implementierten Lösungsalgorithmus gestaltet. Nachfolgend werden die Parametrisierung der entsprechenden Berechnungsgrößen sowie die erzeugten Zwischenergebnisse beschrieben.

6.2.1 Ausgestaltung des Montagesystems

Zur strukturierten Formalisierung der notwendigen Elemente des Montagesystems bei der Implementierung wird auf die Unified Modeling Language (UML)²⁸ mit den in Tabelle

²⁵ Akronym des englischen Begriffs „internal combustion engine“

²⁶ Akronym des englischen Begriffs „battery electric vehicle“

²⁷ Bivalente Erdgasfahrzeuge (bivalent natural gas vehicle - bNGV) können sowohl mit Ottokraftstoff als auch Erdgas betrieben werden. Notwendige Fahrzeuganpassungen im Vergleich mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren sind beispielsweise zusätzliche Druckgasbehälter, Druckregler sowie Tank- und Rückschlagventil. (van Basshuysen 2015)

²⁸ Weitere Informationen liefern unter anderem D'Souza & Wills (1998) sowie Balzert (2011).

6.1 beschriebenen Notationen zurückgegriffen. Im Folgenden wird die Formulierung der Montagesystemkonfiguration, der Arbeitsvorgänge sowie der Betriebsmittel notiert.

Tabelle 6.1: Notation der verwendeten Dateitypen (Balzert 2011)

Datentyp	Erläuterung
boolean	Logischer Wert
double	Gleitkommazahl
integer	Ganzzahl
string	Zeichenkette
[*]	Array mit beliebiger Anzahl an Elementen
[1..n]	Array mit n Elementen
{order}	Geordnete Datenstruktur
{unique}	Der zurückgegebene Wert des Parameters hat kein Duplikat

6.2.1.1 Konfiguration des Montagesystems

Die Optimierung der Fließbandabstimmung erfolgt auf Basis der Rahmenbedingungen des Fließmontagesystems (vgl. Kapitel 5.1.2), die im Folgenden beschrieben werden. Um die parallele Bearbeitung von Arbeitsvorgängen durch mehrere Werker im Optimierungsmodell zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 5.1.6.2), ist eine Klassifizierung möglicher Karosserieansprachen erforderlich (vgl. Kapitel 2.1.3). In Abstimmung mit dem Projektpartner wurde für das vorliegende Planungsproblem die in Abbildung 6.1 dargestellte Aufteilung der Karosserieansprachepunkte gewählt.

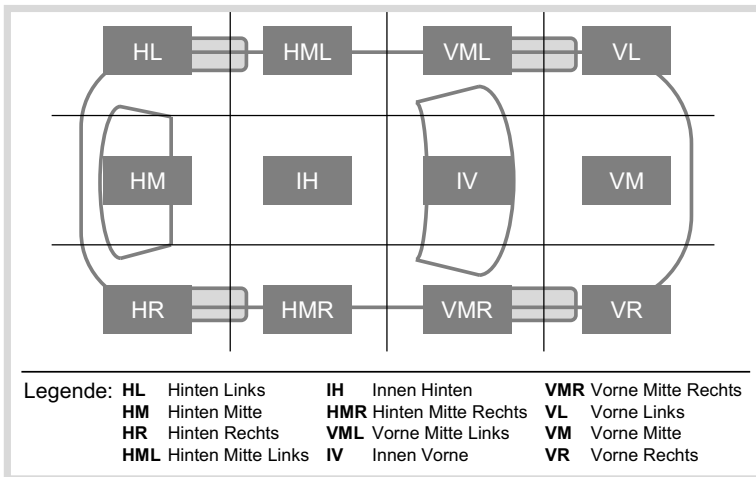


Abbildung 6.1: Karosserieansprachepunkte zur Verrichtung von Arbeitsvorgängen

Hierdurch kann die Durchführung eines Arbeitsvorgangs an der Karosserie verortet werden, wobei ein Arbeitsvorgang einen oder mehrere Karosserieanspruchepunkte für den Zeitraum der Bearbeitung besetzt. Nach der Beendigung der Montagetätigkeiten stehen die besetzten Karosserieanspruchepunkte für die Durchführung weiterer Arbeitsvorgänge zur Verfügung. Die Taktzeit C beträgt 120 s, wobei das Driften D (vgl. Kapitel 2.1.4.3) der Montagemitarbeiter zur Überlastkompensation erlaubt ist. Je Montagestation können dabei maximal $WP = 2$ Arbeitsplätze eingerichtet werden, an denen eine parallele Durchführung von Arbeitsvorgängen möglich ist. Die beschriebenen Konstanten zur Definition des Fließmontagesystems sowie deren Parametrisierung sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst.

Tabelle 6.2: Konstanten zur Definition des Fließmontagesystems

Zeichen	Bezeichnung	Datentyp	Wert
C	Taktzeit [s]	integer	120
D	Drift möglich [1]	boolean	1
WP	Anzahl AP pro Station [1]	integer	2
KA	Karosserieanspruchepunkte	string [*]	VL; ... ; HR

6.2.1.2 Arbeitsvorgänge

Als Betrachtungsumfang der Erprobung werden 100 Arbeitsvorgänge der Hauptlinie des Inneneinbaus definiert. Die aggregierten Bearbeitungszeiten der durchzuführenden Arbeitsvorgänge betragen 2645,41 s (ICE), 2510,10 s (BEV) sowie 2712,40 s (bNGV), wobei Ausstattungsoptionen durch einen identischen Durchschnittswert repräsentiert werden. Die unter diesen Bedingungen maximale Zeitspreizung des Betrachtungsumfangs beträgt 202,30 s. Die Verbauquoten der Ausstattungsoptionen stehen nicht in Abhängigkeit mit dem gewählten Antriebskonzept des Fahrzeugs. Es liegen weiterhin keine antriebskonzeptspezifischen Ausstattungsoptionen vor, sodass neun Ausstattungsoptionen gewählt werden können. Bei der Auswahl von Ausstattungsoptionen kann abseits der gezielten Auswahl einzelner Optionen auch eine Auswahl von Ausstattungspaketen (Business, Outdoor und Klima) erfolgen, die ein Bündel von Optionen darstellt. Eine vollständige Darstellung der Arbeitsvorgänge findet sich im Anhang der Arbeit. Diese umfasst die Übersicht der Arbeitsvorgänge (Anhang A.7), deren Vorrangrestriktionen (Anhang A.8) und Karosserieanspruchepunkte (Anhang A.9) sowie eine Übersicht der Ausstattungspakete (Anhang A.10) und der einzelnen Ausstattungsoptionen (Anhang A.11).

Zur formalen Beschreibung von Arbeitsvorgängen wird die Klasse der Arbeitsvorgänge entsprechend Abbildung 6.2 eingeführt. Konkrete Arbeitsvorgänge können im Rahmen der Anwendung aus dieser Klasse instanziiert werden. Die *ID* stellt den einzigartigen Schlüssel zur Identifikation des Arbeitsvorgangs dar²⁹. Zur Durchführung von Arbeitsvorgängen können Betriebsmittel erforderlich sein. Sind hierbei alternative Betriebsmittel verfügbar, so wird jedes *mögliche Betriebsmittel* dem Arbeitsvorgang zugewiesen. Die Auswahl des Betriebsmittels wird durch Nebenbedingungen des linearen Programms sichergestellt (vgl. Kapitel 5.1.6.2). Hinsichtlich der Vereinigung der variantenspezifischen Montagevorranggraphen ist die Zuordnung des Arbeitsvorgangs zu einer *Variante* vorzunehmen, wodurch variantenspezifische *Bearbeitungszeiten* definiert werden können. Ebenso sind hinsichtlich des Arbeitsvorgangs alle *notwendigen Vorgänger* zu identifizieren, die vor der Durchführung des fokussierten Arbeitsvorgangs abgeschlossen sein müssen. Ferner gilt es, die *Karosserieansprechpunkte* zu definieren und die *montagerelevanten Ausstattungsoptionen* des Arbeitsvorgangs zu bestimmen. Diese kann, beispielsweise durch notwendige immobile Betriebsmittel, negativ bewertet werden.

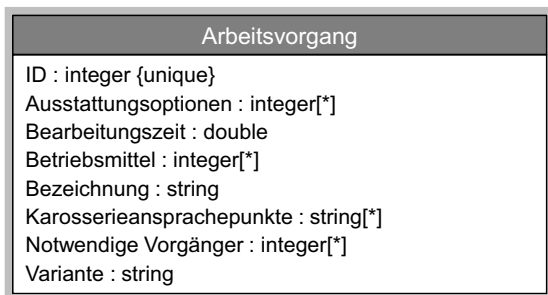


Abbildung 6.2: Klasse der Arbeitsvorgänge

6.2.1.3 Betriebsmittel

Im Rahmen der Erprobung können die in Tabelle 6.3 aufgeführten Betriebsmittel eingesetzt werden. Vergleichsweise kostengünstige Betriebsmittel wie Sprühflaschen und Handzangen werden dabei nicht berücksichtigt.

²⁹ Für weiterführende Informationen zu Schlüsseln sei auf Balzert (2011) verwiesen.

Tabelle 6.3: Übersicht verfügbarer Betriebsmittel

ID	Bezeichnung
0	Manipulator
1	Lastaufnahmemittel (LAM) Tür
2	Lastaufnahmemittel Cockpit
3	Akkuschrauber
4	EC-Schrauber
5	Stationäre Schraubtechnik
6	Blindnietgerät

Bestimmte Arbeitsvorgänge können nur unter Einsatz von Betriebsmitteln durchgeführt werden. Diese sind daher derart zu modellieren, dass sie Arbeitsvorgängen zugeordnet werden können (vgl. Abbildung 5.1). Hierzu dient der einzigartige Schlüssel der *ID*. Weiterhin gilt es, die Kostenfaktoren der Betriebsmittel entsprechend der Systematik von Wandlungsvorgängen (vgl. Kapitel 5.1.5.2) zu modellieren. Da Investitionskosten sowohl bei der Greenfieldplanung als auch bei einem Wandel anfallen können, sind acht Kostenwerte zu definieren. Weiterhin ist die Driffähigkeit von Betriebsmitteln anhand deren Mobilität zu bestimmen. Ortsfeste Betriebsmittel (bspw. eine stationäre Schraubtechnik) schließen das Driften eines assoziierten Arbeitsvorgangs aus, wohingegen mobile Betriebsmittel (bspw. ein Akkuschauber) das Driften ermöglichen. Abbildung 6.3 fasst die Attribuierung der Klasse zusammen.

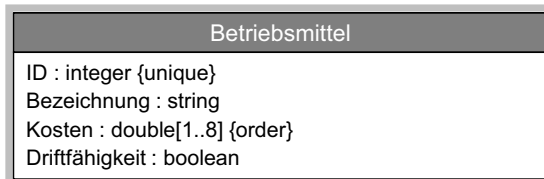


Abbildung 6.3: Klasse der Betriebsmittel

6.2.2 Veränderungsfähigkeit

Der Ausgestaltung des Montagesystems folgt die Definition zukünftiger Szenarien, die Bestimmung robuster Bearbeitungszeiten nach Kapitel 5.1.4.1 sowie die Parametrisierung der Kostenfaktoren entsprechend Kapitel 5.1.5.2.

6.2.2.1 Szenarien

Um die Dimensionierung der erforderlichen Veränderungsfähigkeit vornehmen zu können, ist die Definition der möglichen zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten in Form von Szenarien festzulegen. Die Formalisierung der Szenarien erfolgt nach Kapitel 5.1.4 durch die Modellierung von Normalverteilungen als Repräsentanz der Anteile im Variantenmix. Da der Antriebsstrang eines Fahrzeugs einen wesentlichen Einfluss auf die verbauten Komponenten und somit den Montageprozess aufweist (vgl. Kapitel 2.1.2.3), bildet dieser das Kriterium zur Kennzeichnung einer Variante. Im Rahmen der Erprobung werden die Varianten benzin- oder dieselbetriebener Verbrennungsmotor (ICE), batterieelektrischer Antrieb (BEV) und bivalenter Erdgasmotor (bNGV) unterschieden und in Form ihrer Anteile am Variantenmix zu Szenarien zusammengefasst. Zur Identifikation zukünftiger Entwicklungsrichtungen wurden Studien zur Marktdurchdringung alternativer Antriebskonzepte (Bauer 2014; Plötz et al. 2013; Schühle 2014) mit den Projektpartnern diskutiert, nachfolgende Szenarien abgeleitet und hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit bewertet:

- **Low EV:** Diesem Szenario liegt eine durchschnittliche Marktdiffusion batterieelektrischer Antriebe zugrunde, wobei weiterhin von einer Dominanz der benzin- oder dieselbetriebenen Verbrennungsmotoren ausgegangen wird.
- **Focus ICE:** Das Szenario beschreibt eine ausschließliche Montage von Fahrzeugen mit benzin- oder dieselbetriebenem Verbrennungsmotor-Antriebsstrang. Der Montagelinie liegt dabei die strategische Ausrichtung zugrunde durch die Spezialisierung auf einen Antriebsstrang Effizienzvorteile zu erzielen.
- **High EV:** Hierbei wird ebenfalls eine Marktdiffusion batterieelektrischer Antriebe angenommen. Allerdings fällt diese deutlich stärker aus, so dass ein Übergewicht der batterieelektrischen Antriebe entsteht. Zudem ist dieses Szenario mit einer höheren Unsicherheit behaftet.
- **Multi Concept:** Dieses Szenario folgt der Annahme koexistenter alternativer Antriebskonzepte, wobei ebenfalls von einer erhöhten Unsicherheit des Variantenmix ausgegangen wird.

Die quantitativen Ausprägungen des Erwartungswertes im Variantenmix μ , der Standardabweichung σ sowie der Eintrittswahrscheinlichkeit P der vorgestellten Szenarien s kann Tabelle 6.4 entnommen werden.

Tabelle 6.4: Übersicht der Planungsszenarien

s	Bezeichnung	μ (ICE;BEV;bNGV) [%]	σ (ICE;BEV;bNGV) [%]	P_s [%]
0	Low EV	80;20;0	3;3;0	45
1	Focus ICE	100;0;0	0;0;0	10
2	High EV	40;60;0	4;4;0	35
3	Multi Concept	50;25;25	5;5;5	10

Die in Abbildung 6.4 dargestellten Dichtefunktionen der Antriebskonzepte im Variantenmix dienen der Visualisierung der in Tabelle 6.4 charakterisierten Szenarien.

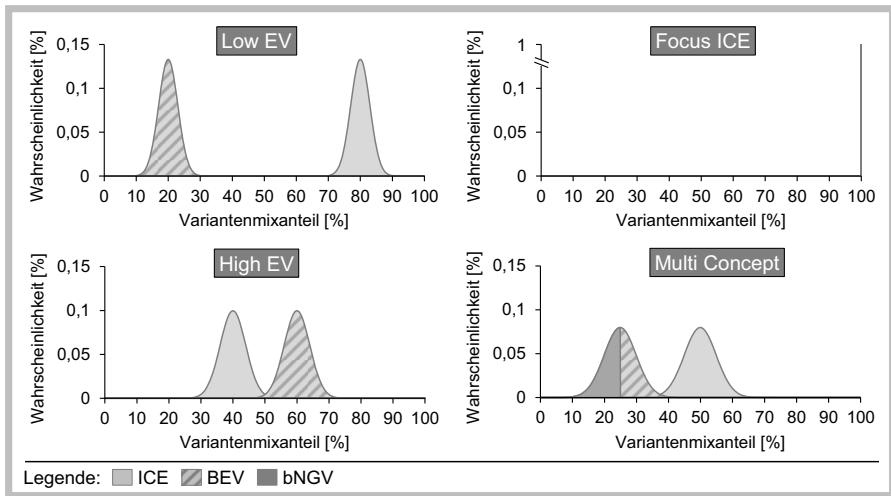


Abbildung 6.4: Dichtefunktionen der Antriebskonzepte je Szenario

Das beschriebene Planungsvorgehen berücksichtigt die grundsätzliche Neuausrichtung des Variantenmix zu einem zu definierenden Zeitpunkt. Der Zeithorizont des vorliegenden Planungsfalls repräsentiert zwei Produktlebenszyklen, wobei die Neuausrichtung des Variantenmix zur Mitte des Zeithorizonts nach 7 Jahren (A_{aw}) prognostiziert wird und für weitere 7 Jahre besteht (A_{pw}). Das Szenario s_0 beschreibt dabei den Variantenmix der initialen Greenfieldplanung, wohingegen die Szenarien s_1, s_2, s_3 alternative Neuausrichtungen und somit Gegenstand einer Brownfieldplanung darstellen. Unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeiten P_s für die Neuausrichtung des Variantenmix ergibt sich damit der in Abbildung 6.5 dargestellte Szenariobaum des Planungsproblems.

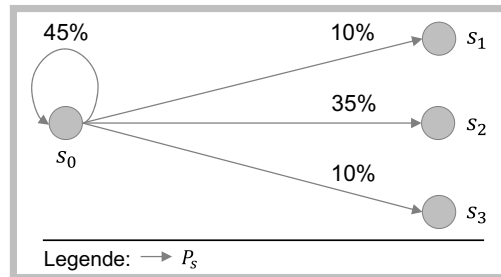


Abbildung 6.5: Szenariobaum des Planungsproblems

Die Verbauquoten der Sonderausstattungsoptionen (vgl. Anhang A.11) sind durch die Neuausrichtung des Variantenmix nicht betroffen und verbleiben daher über den gesamten Zeitrahmen des Planungsproblems auf einem konstanten Niveau.

6.2.2.2 Flexibilität

Nachdem die Definition der Szenarien erfolgt ist, werden weitere Eingangsdaten des Optimierungsproblems vorbereitet. Zur Bestimmung robuster szenarioabhängiger Bearbeitungszeiten t_{robust} im Rahmen der Bildung des Mischgraphen wird der in Kapitel 5.1.4.1 beschriebene Algorithmus angewandt.

Eine Übersicht der hierdurch erzeugten Bearbeitungszeiten je Arbeitsvorgang und Szenario findet sich in Anhang A.12. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Sonderausstattungsumfängen sind dabei unabhängig vom gewählten Antriebskonzept und beeinflussen die varianteninduzierte Abweichung der durchschnittlichen Bearbeitungszeit zwischen Szenarien nicht. Zur Visualisierung der Abweichung ist diese in Abbildung 6.6 für die Szenarien „Low EV“, „High EV“ und „Multi Concept“ zum Referenzszenario „Focus ICE“ dargestellt. Arbeitsvorgänge die in keinem Szenario eine Abweichung aufweisen, sind dabei nicht abgebildet. Die Abweichungen resultieren aus den unterschiedlichen Anteilen der Antriebsvarianten im Modellmix eines Szenarios. So weist Arbeitsvorgang 16 für batterieelektrische Fahrzeuge eine niedrigere Bearbeitungszeit auf als für benzin- oder dieselbetriebene Verbrennungsmotoren, da weniger Abdämpfungselemente im Motorraum zu verbauen sind. Aufgrund des hohen Anteils batterieelektrischer Fahrzeuge im Modellmix des Szenarios „High EV“ entsteht eine verringerte durchschnittliche Bearbeitungszeit von ca. 10 s. Die aggregierten robusten Bearbeitungszeiten der Szenarien betragen 2657,08 s („Low EV“), 2655,74 s („Focus ICE“), 2617,66 s („High EV“) und 2714,99 s („Multi Concept“).

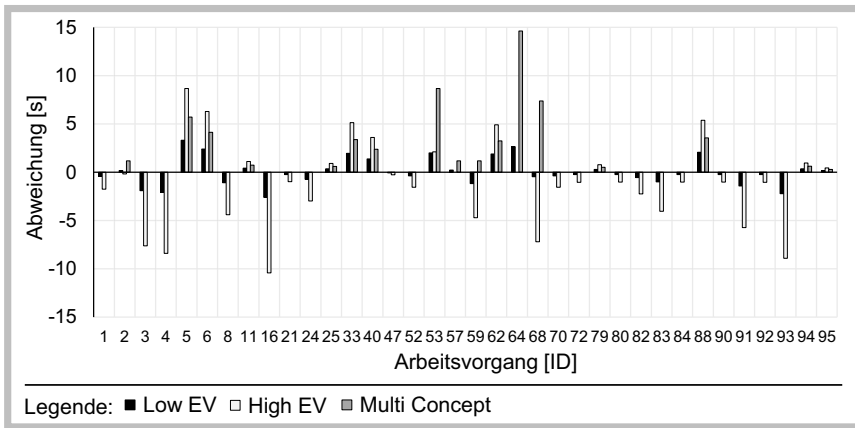


Abbildung 6.6: Abweichungen der robusten szenariospezifischen Bearbeitungszeiten zur Referenz „Focus ICE“

6.2.2.3 Wandlungsfähigkeit

Zur Berechnung der Zielfunktion f_{wf} (vgl. Kapitel 5.1.6.1) ist gemäß Kapitel 5.1.5.2 eine Parametrisierung der Wandlungsobjektkosten sowie der direkten und indirekten Wandlungskosten erforderlich. Weiterhin sind die Kosten zusätzlicher Montagestationen sowie Werker an Arbeitsplätzen für den Wandel und Betrieb der Fließbandabstimmung zu bestimmen.

Kosten zusätzlicher Stationen und Mitarbeiter je Arbeitsplatz

Montagestationen können zu zwei Zeitpunkten beschafft werden. So werden einerseits im Rahmen der initialen Greenfieldplanung (s_0) Montagestationen benötigt und andererseits kann der Wandel der Fließbandabstimmung (s_1-s_3) die Nutzung zusätzlicher oder weniger Montagestationen erfordern. Montagestationen, die durch die Änderung der Fließbandabstimmung nicht weiter genutzt werden, besitzen keinen Restwert (vgl. Kapitel 5.1.6.1) und werden daher nicht weiter betrachtet. Zur Kostenvergleichsrechnung wird der Wiederbeschaffungswert WBW der Montagestationen nach Formel 6.1 (Buchholz & Gerhards 2016) verwendet, um den Substanzerhalt des Unternehmens zu fokussieren und eine Wiederbeschaffung des Anlagevermögens zum aktuellen Zeitpunkt zu ermöglichen.

$$WBW = AN * (1 + int)^{an} \quad (6.1)$$

Die Kosten einer Montagestation c_{stat,s_0} mit dem Anschaffungswert AN von 150.000 €, einer Nutzungsdauer a_n von 14 Jahren sowie einem Zinssatz int von 1,21 %³⁰ ergeben sich zu 177.508,52 €. Da ein Wandel der Fließbandabstimmung nach 7 Jahren prognostiziert wird (vgl. Kapitel 6.2.2.1), werden zusätzlich zu beschaffende Montagestationen um 7 weitere Jahre aufgezinnt und daher mit $c_{stat,s_{s \neq 0}} = 193.100,40$ € bewertet.

Ebenso gilt es, die Mitarbeiterkosten je Arbeitsplatz c_{ap} zu bestimmen. Die Berechnung der monatlichen Mitarbeiterkosten $c_{ap,mt}$ basiert auf dem Entgelt c_{ent} der Gruppe 7 des IG Metall-Tarifvertrags für die Metall- und Elektroindustrie in Baden-Württemberg, wobei jährlich mt Monatsgehälter ausbezahlt werden und zusätzlich zu vergeltende Zulagen c_{sz} sich nach dem Tarifgebiet Nordwürttemberg / Nordbaden richten (IG Metall 2018b). Weiterhin fließen die Anzahl der Schichten pro Tag $shft_d$ sowie die Lohnnebenkosten c_{ag} in die Berechnung der Mitarbeiterkosten nach Formel 6.2 ein.

$$c_{ap,y} = (c_{ent} * shft_d * c_{ag} + c_{ent} * c_{sz}) * mt \quad (6.2)$$

Für ein Zweischichtmodell ergeben sich bei einem Entgelt von 3240,50 €, Lohnnebenkosten von 21 %, Zulagen von 24,29 % für die Spätschicht und 12 Monatsgehälter pro Jahr Kosten von 103.547,86 € pro Arbeitsplatz. Diese Kosten werden durch Formel 6.3 über den Planungszeitraum eines Szenarios aggregiert.

$$c_{ap} = \sum_{a=0}^{a_n-1} c_{ap,y} * (1 + int)^a \quad (6.3)$$

Bis zum prognostizierten Wandel nach 7 Jahren fallen für eine jährliche Lohnkostentwicklung von 2,44 %³¹ somit Kosten von 780.104,08 € pro Arbeitsplatz an. Für die Szenarien s_1, s_2 und s_3 ergeben sich analog Kosten in Höhe von 923.505,61 €. Tabelle 6.5 fasst die ermittelten Kosten zusammen.

Tabelle 6.5: Übersicht der Kosten für Montagestationen und Arbeitsplätze

Element	s_0	s_1, s_2, s_3
Montagestation (c_{stat})	177.508,52	193.100,40
Mitarbeiter je Arbeitsplatz (c_{ap})	780.104,08	923.505,61

³⁰ Mittlere jährliche Inflationsrate in Deutschland für 2009 bis 2018 nach Statista (2018).

³¹ Mittlere Entgeltentwicklung im Tarifvertrag der Metall und Elektroindustrie für 2009 bis 2018 nach IG Metall (2018a).

Wandlungsobjektkosten

Die Investitionskosten c_{inv,s_0} der verfügbaren Betriebsmittel wurden gemäß Tabelle 6.6 festgelegt. Da ein Wandel der Fließbandabstimmung zusätzliche Betriebsmittel erfordern kann, werden diese für die Szenarien s_1 , s_2 und s_3 nach Formel 6.1 mit $int = 1,21\%$ aufgezinst. Die Kosten der Desinvestition fallen ausschließlich im Rahmen eines Wandels an und entsprechen einem Restwert von 50 Prozent der Investitionskosten.

Tabelle 6.6: Übersicht der Wandlungsobjektkosten

Betriebsmittel	c_{inv,s_0} [€]	$c_{inv,s_{s \neq 0}}$ [€]	c_{desinv} [€]
Manipulator	150.000,00	177.508,52	-88.754,26
Lastaufnahmemittel Tür	6.000,00	7.100,34	-3.550,17
Lastaufnahmemittel Cockpit	8.000,00	9.467,12	-4.733,56
Akkuschrauber	2.000,00	2.366,78	-1.183,39
EC-Schrauber	25.000,00	29.584,75	-14.792,38
Stationäre Schraubtechnik	200.000,00	236.678,03	-118.339,02
Blindnietgerät	1.000,00	1.183,39	-591,70

Direkte Wandlungskosten

Die Kostenfaktoren zur Planung der Verschiebung von Arbeitsvorgängen und Betriebsmitteln (c_{plan}), der Integration und Desintegration von Betriebsmitteln (c_{int}) sowie des Transports von Betriebsmitteln (c_{trans}) ergeben sich aus der Multiplikation der kumulierten Bearbeitungszeit t_{kum} beteiligter Mitarbeiter und einem entsprechenden Stundensatz. Dieser wird für die Planungstätigkeit aus der Entgeltgruppe 14 und für die Integration, Desintegration und den Transport von Betriebsmitteln aus der Entgeltgruppe 7 abgeleitet und verzinst. In Tabelle 6.7 sind die hieraus resultierenden Personalkosten zusammengefasst.

Tabelle 6.7: Personalkosten für Planungstätigkeiten

Kostenfaktor	Komplexität	t_{kum}	Kostensatz	Kosten
c_{plan}	Basis	15 h	50,23 €/h	753,48 €
	niedrig	10 h	50,23 €/h	502,32 €
	mittel	60 h	50,23 €/h	3.013,92 €
	hoch	135 h	50,23 €/h	6.781,92 €
c_{int}, c_{desint}	niedrig	5 h	32,09 €/h	160,48 €
	mittel	20 h	32,09 €/h	641,93 €
	hoch	50 h	32,09 €/h	1.604,82 €
c_{trans}	niedrig	2 h	32,09 €/h	64,19 €
	mittel	8 h	32,09 €/h	256,77 €
	hoch	25 h	32,09 €/h	802,41 €

Durch eine Komplexitätsbewertung der Reallokation von Betriebsmitteln werden die ermittelten direkten Wandlungskosten den entsprechenden Betriebsmitteln zugeordnet (siehe Tabelle 6.8).

Tabelle 6.8: Übersicht der direkten Wandlungskosten

Betriebsmittel	c_{plan} [€]	c_{int} [€]	c_{desint} [€]	c_{trans} [€]
Manipulator	6.781,32	641,93	641,93	256,77
Lastaufnahmemittel Tür	3.013,92	1.604,82	1.604,82	802,41
Lastaufnahmemittel Cockpit	3.013,92	1.604,82	1.604,82	802,41
Akkuschrauber	502,32	160,48	160,48	64,19
EC-Schrauber	502,32	160,48	160,48	64,19
Stationäre Schraubtechnik	6.781,32	1.604,82	1.604,82	802,41
Blindnietgerät	502,32	160,48	160,48	64,19

Indirekte Wandlungskosten

Die indirekten Wandlungskosten c_{lost} repräsentieren durch den Wandel entstehende Opportunitätskosten. Diese werden mit einem entgangenen Gewinn pro Fahrzeug c_{eg} von 3000 € und der Taktzeit C von 120 s anhand Formel 6.4 kalkuliert.

$$c_{lost} = \frac{t_{lost} * 3600}{C} * c_{eg} \quad (6.4)$$

Die Zeit t_{lost} , in der Opportunitätskosten anfallen, entspricht der Zeit zum Durchführen von Desintegration (t_{int}), Transport (t_{trans}) und Integration (t_{int}) eines Betriebsmittels. Da bei der Personalkostenplanung die kumulierte Bearbeitungszeit aller durchzuführenden Tätigkeiten berücksichtigt wird, ist die Zeitdauer des kritischen Pfads zu bestimmen. Tabelle 6.9 fasst die resultierenden indirekten Wandlungskosten zusammen.

Tabelle 6.9: Übersicht der indirekten Wandlungskosten

Betriebsmittel	t_{int} [h]	t_{desint} [h]	t_{trans} [h]	t_{lost} [h]	c_{lost} [€]
Manipulator	5	5	1,0	11,0	990.000
Lastaufnahmemittel Tür	8	8	2,0	18,0	1.620.000
Lastaufnahmemittel Cockpit	8	8	2,0	18,0	1.620.000
Akkuschrauber	2	2	0,5	4,5	405.000
EC-Schrauber	2	2	0,5	4,5	405.000
Stationäre Schraubtechnik	8	8	2,0	18,0	1.620.000
Blindnietgerät	2	2	0,5	4,5	405.000

6.2.3 Zwischenergebnisse

Vor der Durchführung der Optimierung ist eine Obergrenze der Stationsanzahl zur Verkleinerung des Lösungsraums erforderlich (vgl. Kapitel 5.1.6.4). Da durch die Restriktionen der Vorrangbeziehungen und Karosserieansprache eine parallele Bearbeitung von Arbeitsvorgängen an Montagestationen nicht sichergestellt werden kann, dient der Quotient aus aggregierter Bearbeitungszeit einer Variante und der an einer Montagestation zur Verfügung stehenden Bearbeitungszeit nicht als geeigneter Indikator. Daher wurde die Obergrenze iterativ abgesenkt bis mit einer Populationsgröße von 2000 und einer Generationenanzahl von 800 bei einer einheitlichen Obergrenze von 21 Montagestationen letztmalig Lösungen identifiziert werden konnten. Es werden somit alle Fließbandabstimmungen ausgeschlossen, die ein System mit mehr als 21 Montagestationen benötigen. Die 116 Lösungsbündel des multikriteriellen Optimierungsproblems mit den beschriebenen Parametern und durch den Algorithmus frei wählbarer Fließbandabstimmung für das Szenario s_0 sind in Abbildung 6.7 grün dargestellt. Jedes Lösungsbündel beinhaltet dabei anteilig gewichtet die Bewertungen der Fließbandabstimmungen der Szenarien s_0 bis s_3 . Wird als Fließbandabstimmung des Szenarios s_0 die Referenz-Fließbandabstimmung des Projektpartners eingesetzt, so ergeben sich die 9 rot dargestellten Lösungsbündel.

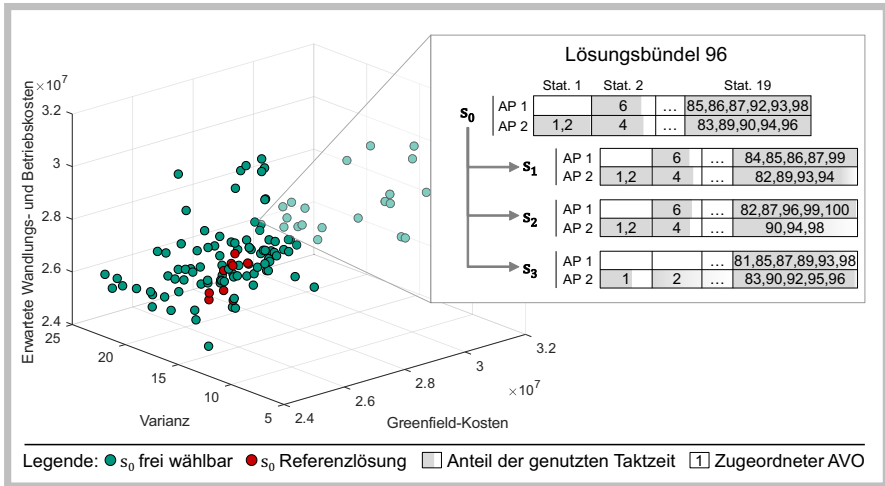


Abbildung 6.7: Punktwolke der Lösungsbündel des multikriteriellen Optimierungsproblems und exemplarische Detailansicht des Lösungsbündels 96

Abbildung 6.7 zeigt zudem exemplarisch die Auflösung des Lösungsbündels 96 in die Fließbandabstimmungen für die Szenarien s_0 bis s_3 aus denen sich die Bewertung des Lösungsbündels ergibt. Im Vergleich der Lösungsbündel weist dieses untere Bewertungsränge der Zielkriterien auf (vgl. Anhang A.13: ZFW_{gk} : 96/125; ZFW_{flex} : 80/125; ZFW_{wf} : 98/125) und dient an dieser Stelle zur exemplarischen Beschreibung vorteilhafter und verbesserungsfähiger Eigenschaften der Fließbandabstimmung. Eine Übersicht der Fließbandabstimmungen des Lösungsbündels 96 mit den Allokationen von Arbeitsvorgängen und Betriebsmitteln sowie dem durchschnittlichen Anteil der genutzten Taktzeit findet sich in Abbildung 6.8.

	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8	St. 9	St. 10	St. 11	St. 12	St. 13	St. 14	St. 15	St. 16	St. 17	St. 18	St. 19	
S₀																				
AP 1	6								26,30	21,27,36	19,29,31,32,33,41,42,48	39,45,46,47,50,65,69	63,64,74	58,66,67,72	70,71	79,84,88				85,86,87,92,93,98
AP 2	1,2	4	5	3	7	8	9,11,12	10,13,14,15	16,17,18,20,22,24,25,34	23,28,35	49	37,38,40,43,44,55,76,77	52,56,75	57	53,54,59,60,62,68	51,61,73,78,91	80,81,87	82,95,99,100	83,89,94,96	
S₁																				
AP 1	6	3			13				10	25,30,35	19,20,28,29,31,32,33,34	37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48	50,63,64,69,74	58,70		79		91	84,85,86,87,99	
AP 2	1,2	4	5	7	8	9	11	14	15	16,18,21,23,24	17,22,26,27,36	49	55,56,59,72,76,77	52,57,60	53,54,59,66,67,75	51,61,62,68,71,73,78	80,88,90	83,95	82,89,93,94	
S₂																				
AP 1	6	3						24		26,27	37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48	54,64,70				53,61,62,63,68,71,73,74,75	83,85,86,89	91,92,97	82,87,89,99,100	
AP 2	1,2	4	5	7	8,13	11	9,10,12,14,15	16,21,23,25,35	17,18,20,22,29,31,32,34,36	19,28,30,33	49	50,59,60,65,66,69	52	57,58,77	72	51,55,56,67,76,78,79	80,81,84,95	88,93	90,94,98	
S₃																				
AP 1		6	4						22,26,30,35	21,27	37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48	55,63,64,65,76,77,78				58,60,70,71,74	84,86,88,94	99,100	81,85,87,89,93,98	
AP 2	1	2	5	3	7	8	9,11,12	10,13,14,15	16,17,18,20,24,25,34	19,23,28,29,31,32,33,36	49	50,57,69,73	52,61,75	66,67,72,79	51,53,54,56,59,62,68	80,91	97	82	83,90,92,95,96	

Legende: Manipulator LAM Tür LAM Cockpit Blindnietgerät Akkuschauber
 EC-Schrauber Stationäre Schraubtechnik Zugeordneter AVO
 Anteil der genutzten Taktzeit Zugeordnete Betriebsmittel

Abbildung 6.8: Übersicht der Fließbandabstimmungen des Lösungsbündels 96

Ein positives Merkmal des Lösungsbündels liegt hier in der beinahe unveränderten Allokation der Betriebsmittel am Arbeitsplatz 1 der Station 10 in den Szenarien s_0 , s_2 und s_3 . Im Gegensatz dazu ist die vergleichsweise hohe Anzahl von 33 Arbeitsplätzen der Fließbandabstimmung für s_1 verbesserungsfähig, die durch eine gemeinsame Allokation der Arbeitsvorgänge 10, 14 und 15 reduziert werden könnte. Im Rahmen der Analyse von Lösungsbündeln ist zu berücksichtigen, dass szenariospezifische durchschnittliche Bearbeitungszeiten vorliegen, die beispielsweise die Trennung der Arbeitsvorgänge 1 und 2 in s_3 begründen, da deren summierte Bearbeitungszeit in diesem Szenario die Taktzeit übersteigt.

Tabelle 6.10 fasst die minimalen und damit besten Ausprägungen der Zielkriterien für die ermittelten Lösungsbündel zusammen. Hierbei ist ersichtlich, dass die Referenzlösung des Projektpartners die minimalen Greenfield-Kosten um 4,7 % übersteigt. Dies kann als starke Kostenfokussierung bei der Planung der Fließbandabstimmung durch den Projektpartner gewertet werden. Durch die Referenzlösung ist die Fließbandabstimmung des Szenarios s_0 fixiert, sodass die minimalen Greenfield-Kosten die Greenfield-Kosten in jedem Lösungsbündel (Farbe Rot) darstellen. Hinsichtlich der Varianz überschreitet die Referenzlösung die algorithmisch ermittelte minimale Lösung um 49,4 % und bietet somit Verbesserungspotential. Die erwarteten Wandlungs- und Betriebskosten der Szenarien s_1 bis s_3 werden unter Anwendung der Referenzlösung um 3,6 % überschritten. Somit weist diese eine lediglich geringfügige Erhöhung der erwarteten Wandlungs- und Betriebskosten auf.

Tabelle 6.10: Vergleich des Algorithmus und der Referenzlösung für das Szenario s_0

Zielkriterium	Algorithmus	Referenzlösung	Abweichung
<i>min</i> Greenfield-Kosten	24.774.854,97 €	25.614.128,52 €	+ 4,7 %
<i>min</i> Varianz	8,70 s ²	13,00 s ²	+ 49,4 %
<i>min</i> Wandl.- und Betriebskost.	25.329.807,88 €	25.660.195,19 €	+ 3,6 %

Da die Wandlungs- und Betriebskosten mehrere Kostenfaktoren vereinen, werden diese nachfolgend gesondert beschrieben. Eine vollständige Auflistung findet sich in Anhang A.14. Die Arbeitsplatzkosten der Werker stellen mit durchschnittlich 96,6% den dominierenden Kostenfaktor dar. Da diese pro besetztem Arbeitsplatz über die Nutzungsdauer anfallen, werden im Wandlungsfall Fließbandabstimmungen favorisiert, die vergleichsweise geringe Betriebskosten verursachen. Werden die Arbeitsplatzkosten

vernachlässigt, ergibt sich die in Abbildung 6.9 dargestellte Verteilung der Kosten zusätzlicher Stationen (SK), der Wandlungsobjektkosten (WOK) sowie der direkten (DWK) und indirekten Wandlungskosten (IWK).

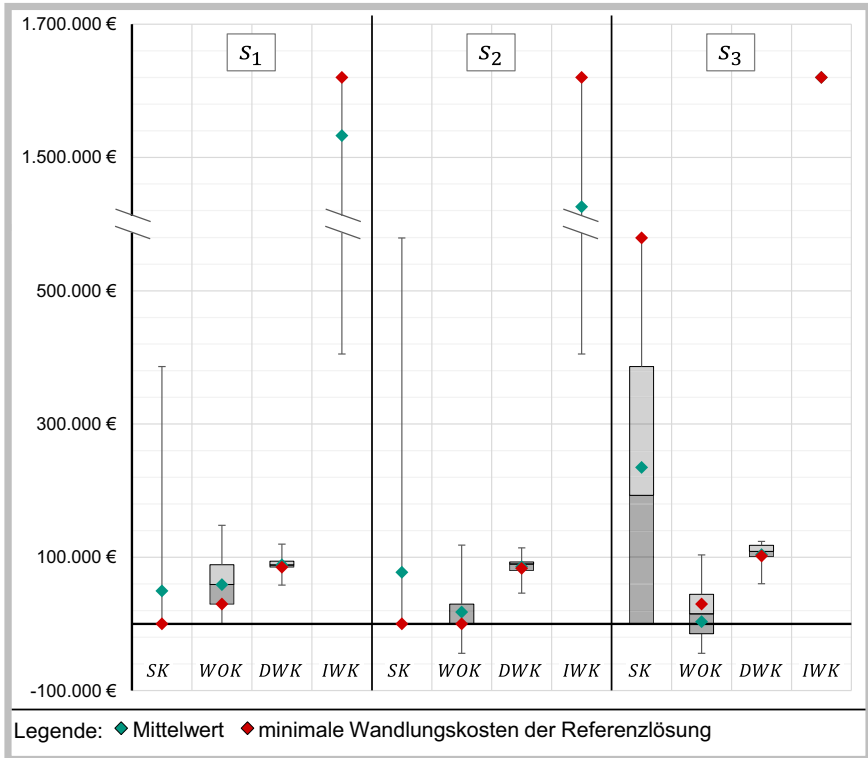


Abbildung 6.9: Kostenfaktoren der Wandlungskosten ohne Betriebskosten

Zusätzliche Stationen werden vorrangig bei einem Wandel zu Szenario s_3 benötigt. Dies kann erwartet werden, da hier die Variante mit der größten Bearbeitungszeit bNGV zu integrieren ist. Für Szenario s_1 und s_2 liegen das obere (hell) und untere Quartil (dunkel) sowie der Median jeweils bei 0, wodurch die seltene Erfordernis zusätzlicher Stationen bestätigt wird. Hinsichtlich der Wandlungsobjektkosten ist festzustellen, dass besonders im Wandel zu Szenario s_1 zusätzliche Betriebsmittel erforderlich sind, wohingegen im Wandel zu den Szenarien s_2 und s_3 Betriebsmittel gegebenenfalls veräu-

bert werden. Der Wandel zu Szenario s_3 verursacht durchschnittlich die höchsten direkten Wandlungskosten, da durch die Erhöhung der Stationsanzahl eine Betriebsmitteleinrichtung der zusätzlichen Arbeitsplätze induziert wird. Die indirekten Wandlungskosten basieren auf den zu verschiebenden Betriebsmitteln (vgl. Tabelle 6.9) und weisen für alle Szenarien ein unteres Quartil auf dem Niveau des Maximalwerts aus. Eine Verschiebung der kostenintensivsten Betriebsmittel wird daher vorwiegend vorgenommen. Hinsichtlich der Wandlungskosten zeigt die Referenzlösung eine vorteilhafte Struktur der Wandlungsobjektkosten, direkten Wandlungskosten sowie Kosten für zusätzliche Stationen im Wandel zu den Szenarien s_1 und s_2 . Demgegenüber stehen vergleichsweise hohe Kosten zusätzlicher Stationen und Wandlungsobjektkosten im Wandel zu Szenario s_3 sowie szenariounabhängig hohe indirekte Wandlungskosten.

Die physische Verlagerung von Betriebsmitteln wird durch die Wandlungsobjektkosten der Investition (*inv*) und Desinvestition (*desinv*) sowie die direkten Wandlungskosten der Planung (*plan*), des Transports (*trans*), der Integration (*int*) und Desintegration (*desint*) bewertet (vgl. Kapitel 5.1.5.2) und wird nachfolgend weiter detailliert. Abbildung 6.10 stellt diese durch Quartile dar.

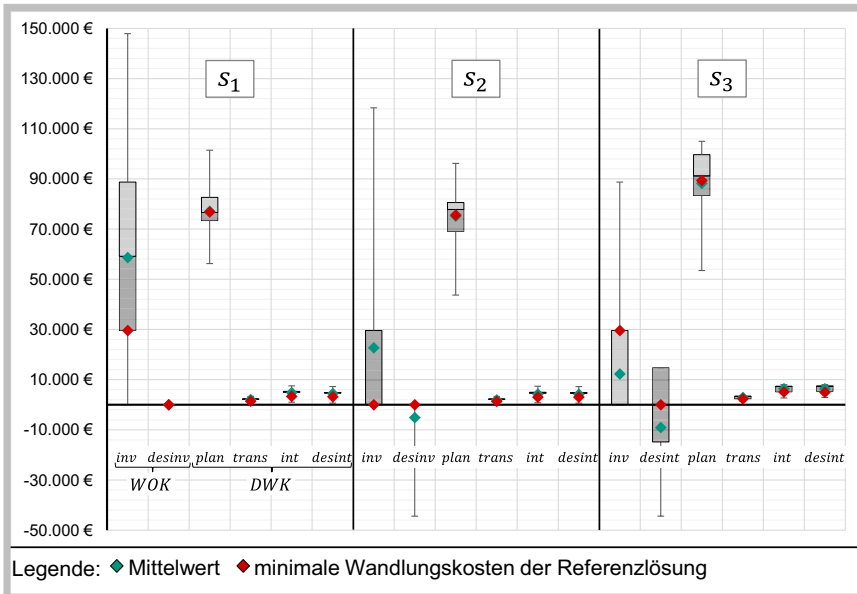


Abbildung 6.10: Übersicht der Wandlungsobjektkosten und direkten Wandlungskosten

Hierbei ist ersichtlich, dass vergleichsweise hohen Investitionskosten im Wandel zu Szenario s_1 keine Erlöse aus Desinvestitionen gegenüberstehen, was einen zusätzlichen Bedarf an Betriebsmitteln impliziert. Daraus resultiert ebenso ein Ungleichgewicht der Integrations- und Desintegrationskosten. Hinsichtlich der direkten Wandlungsobjektkosten stellen die Planungskosten in jedem Szenario den dominierenden Kostentreiber dar, wobei der Planungsaufwand im Wandel zu Szenario s_3 die höchsten Kosten verursacht. In der nachfolgenden Bewertungsphase werden die Überlastkompensation und das Flexibilitätsverhalten der Fließbandabstimmungen auf Basis potentieller Produktionsprogramme evaluiert, um die Entscheidungsgrundlage zu erweitern.

6.3 Bewertungsphase

In diesem Kapitel wird aufbauend auf den Ausführungen in Kapitel 5.2 die Bewertungserweiterung der in Kapitel 6.2 erzeugten Lösungsbündel vorgenommen.

6.3.1 Definition der Produktionsprogramme

Um die durchschnittliche Überlast einer Fließbandabstimmung abschätzen zu können, wird diese je Szenario hinsichtlich zufällig generierter Produktionsprogramme (vgl. Abbildung 5.9) als Instanzen des szenariospezifischen Variantenmix errechnet und gemittelt. Die Anzahl der Produktionsprogramme je Szenario wird auf 20 festgesetzt, wobei je Produktionsprogramm 210 Produktionsaufträge bearbeitet werden. Dies entspricht bei sieben Stunden aktiver Arbeitszeit einer Taktzeit von 2 min. Zur Ermittlung der Produktionsprogramme auf Basis der in Anhang A.11 definierten Ausstattungsoptionen wird der in Anhang A.2 beschriebene Algorithmus eingesetzt, der Produktionsprogramme aus 1536 Kombinationen von Ausstattungsmerkmalen erzeugt. Abbildung 6.11 zeigt aufsteigend sortiert das arithmetische Mittel der Bearbeitungszeit je Produktionsauftrag der erzeugten 20 Produktionsprogramme t_{avg} sowie die jeweilig niedrigste t_{min} und höchste Bearbeitungszeit t_{max} . Zur Beschreibung der Schwankung wird die Wurzel der Fehlerquadratsumme³² verwendet, die für das Szenario s_1 den niedrigsten Wert (7,89 s) aufweist. Dies erscheint plausibel, da in diesem Szenario lediglich das Antriebskonzept ICE auftritt und somit keine antriebskonzeptinduzierte Zeitspreizung entsteht. Die höchste Abweichung (17,37 s) wird im Szenario s_2 festgestellt und kann

³² Weiterführende Informationen zur Wurzel der Fehlerquadratsumme finden sich in Auer & Rottmann (2012)

auf die Zeitspreizung durch den in diesem Szenario dominierenden elektrischen Antriebsstrang zurückgeführt werden. Zwischen den beschriebenen Extrema lassen sich die Schwankungen in den Szenarien s_0 (12,75 s) und s_3 (17,00 s) einordnen.

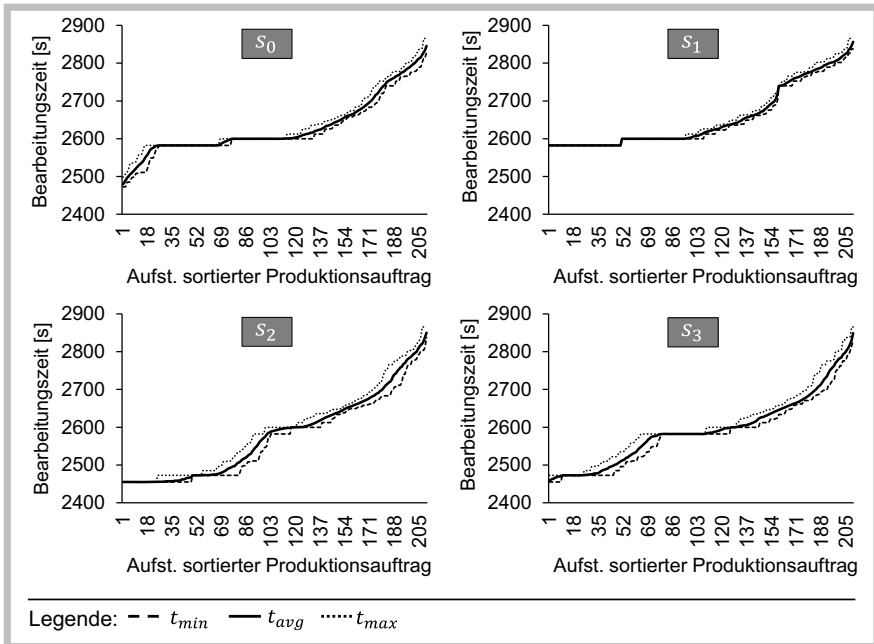


Abbildung 6.11: Durchschnittliche Bearbeitungszeit von Produktionsaufträgen nach Szenarien in aufsteigender Sortierung

6.3.2 Bewertung der Greenfield-Kosten

Wie in Kapitel 2.1.4.2 beschrieben, bedingt das konkrete Produktionsprogramm die Überlast einer Fließbandfertigung, die bisher nicht in der Bewertung der Greenfield-Kosten berücksichtigt ist. Aus diesem Grund erfolgt in diesem Kapitel eine Ermittlung der Kosten zur Überlastkompensation.

Die in Kapitel 6.3.1 definierten Produktionsprogramme dienen der systematischen Überlastbestimmung der in Kapitel 6.2.3 identifizierten Fließbandabstimmungen des Szenarios s_0 anhand des in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Optimierungsproblems. Abbildung 6.12 zeigt aufsteigend sortiert die durchschnittliche Überlast der 20 definierten Produktionsprogramme für die Fließbandabstimmungen des Szenarios s_0 mit einer

mittleren Standardabweichung von 63,47 s. Dabei ist ersichtlich, dass die Referenzlösung im Durchschnitt eine vergleichsweise hohe Überlast erzeugt. Dies erscheint nachvollziehbar, da durch die Anzahl von 26 Arbeitsplätzen eine Ausnutzung der gesamten zur Verfügung stehenden Bearbeitungszeit von 85,16 % erreicht wird (vgl. Anhang A.15) und somit ein geringerer Zeitpuffer zur Kompensation varianteninduzierte Bearbeitungszeitschwankungen zur Verfügung steht.

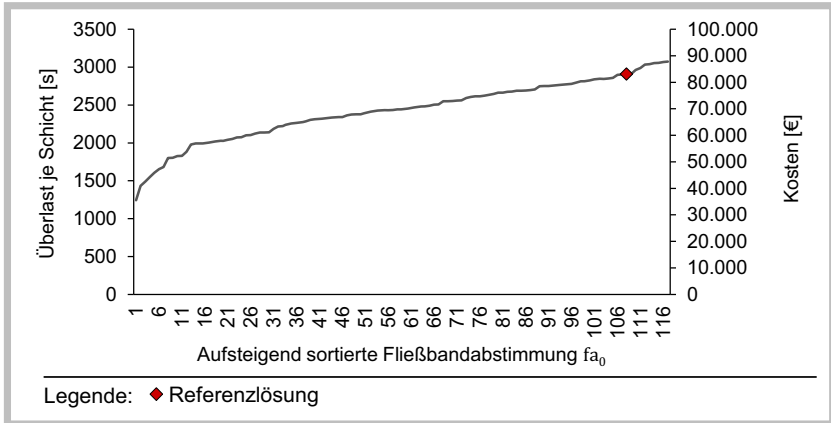


Abbildung 6.12: Kosten der Überlastkompensation des Szenarios s_0 für Planungsperiode p_0 in aufsteigender Sortierung

Zur Bewertung der Überlast wird wie für die reguläre Montagetätigkeit der Stundensatz der Einkommensgruppe 7 (vgl. Kapitel 6.2.2.3) inklusive 21 % Arbeitgeberanteil angesetzt. Eine detaillierte Einsatzplanung von Unterstützern liegt nicht im Betrachtungsumfang dieser Arbeit und wird daher durch den beschriebenen Bewertungsansatz ersetzt.³³ Nach der in Kapitel 5.2.3.1 beschriebenen Berechnungsvorschrift werden die Kosten der Überlastkompensation aller Fließbandabstimmungen ermittelt. Für das erste Jahr des Szenarios s_0 ergibt sich der Stundensatz zu 27,11 €. Unter anteiliger Berücksichtigung von Schichtzulagen für die zweite Schicht resultieren für die Referenzlösung in Jahr 1 Kosten von 10.858,74 € und entsprechend unter Berücksichtigung der Lohnsteigerung für 7 Jahre in Höhe von 81.807,09 €. Die Kosten zur gesamten Überlastkompensation entsprechen dabei ca. 28 % des Grundentgelts eines Mitarbeiters im gleichen Zeitraum.

³³ Weiterführende Informationen zur Einsatzplanung von Unterstützern finden sich bei Altemeier (2009).

6.3.3 Bewertung der Flexibilität

Nachdem die Minimierung der Varianz durch das Optimierungsproblem abgeschlossen ist (vgl. Abbildung 6.7), erfolgt die Bestimmung der Flexibilität auf Basis der in Kapitel 5.2.4.2 definierten Flexibilitätskennzahl (FKZ). Die FKZ berücksichtigt die initiale Fließbandabstimmung s_0 der Periode p_0 (Anteil: 50%) sowie die möglichen Szenarien $s_0, s_1, s_2,$ und s_3 der Periode p_1 (Anteil: 50%) die mit den in Kapitel 6.2.2.1 beschriebenen Eintrittswahrscheinlichkeiten gewichtet werden. Es ergeben sich damit die Gewichtungsfaktoren $w_0 = 0,725, w_1 = 0,05, w_2 = 0,175$ und $w_3 = 0,05$. Die Gewichte der Lage w_{FL_L} und Robustheit w_{FL_R} werden jeweils mit 0,5 bewertet. Eine Übersicht der FKZ-Berechnungsergebnisse findet sich in Anhang A.15. Die FKZ berücksichtigt das gewählte Variantenmischverhältnis, woraus die obere Grenze FKZ_s^+ abgeleitet wird (vgl. Kapitel 5.2.4.2). Aufgrund spezifischer Variantenmischverhältnisse der Szenarien erfolgt die Berechnung szenariospezifisch. Die oberen Grenzen ergeben sich zu $FKZ_0^+ = 0,7, FKZ_1^+ = 0,5, FKZ_2^+ = 0,9$ und $FKZ_3^+ = 0,833$. In Abbildung 6.13 sind die berechneten Werte der FKZ über dem Zielfunktionswert der Flexibilität abgetragen. Exemplarisch ist zudem die FKZ des Lösungsbündels 96 in ihre Bestandteile aufgeschlüsselt.

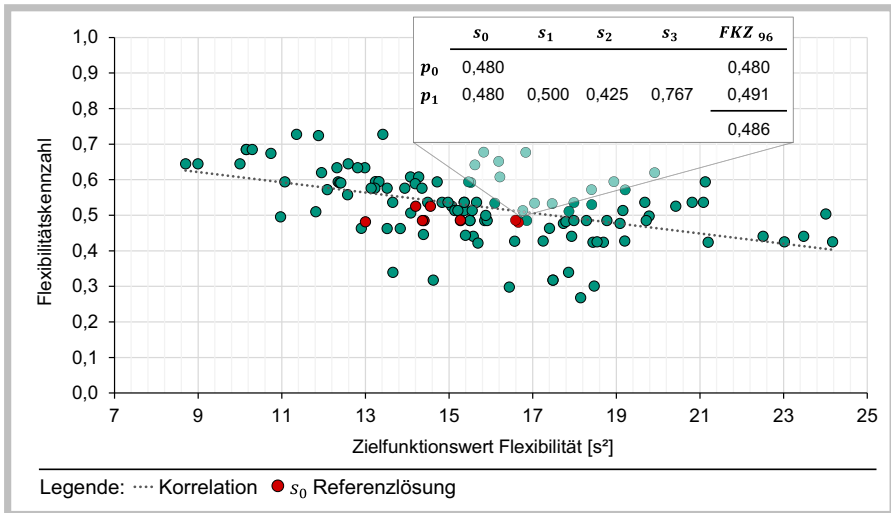


Abbildung 6.13: Ermittelte Werte der Flexibilitätskennzahl auf Basis der Zielfunktionswerte für Flexibilität

Es wird erwartet, dass ein niedriger (hoher) Zielfunktionswert der Flexibilität mit einer hohen (niedrigen) FKZ korreliert, da dieser eine geringe Schwankung der durchschnittlichen Arbeitszeit an einem Arbeitsplatz impliziert. Das Potential zur Taktzeitüberschreitung durch Veränderungen im Variantenmix wird somit reduziert. Die in Rot abgebildeten Werte repräsentieren Lösungsbündel, in denen die Referenzlösung für das Szenario s_0 herangezogen wird. Da w_0 eine vergleichsweise hohe Gewichtung darstellt, erscheint die hohe Konzentration der Lösungsbündel plausibel. Der Korrelationskoeffizient beträgt $-0,483$ und deutet somit auf eine negative Korrelation der FKZ mit dem Zielfunktionswert der Flexibilität hin.

In Abbildung 6.14 ist die FKZ über der Anzahl an Arbeitsplätzen abgetragen. Dabei ist ersichtlich, dass die FKZ für eine steigende Arbeitsplatzanzahl in s_0 und s_2 zunimmt. Dies wird darauf zurückgeführt, dass sich die gesamte Arbeitszeit auf eine größere Anzahl an Arbeitsplätzen verteilt, was zu einer Verringerung der durchschnittlichen Auslastung je Arbeitsplatz und somit einer verringerten Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen der Bearbeitungszeit führt.

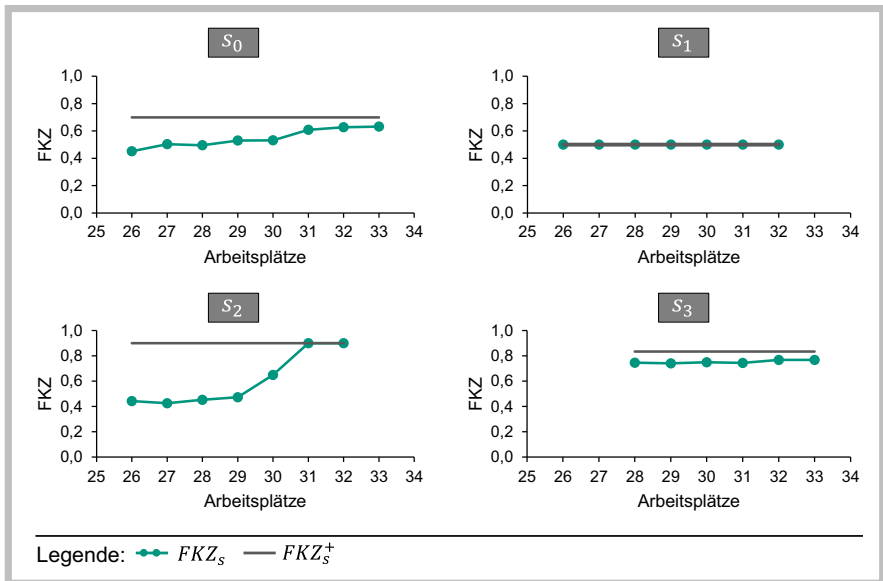


Abbildung 6.14: Flexibilitätskennzahl in Abhängigkeit der Arbeitsplätze

In s_3 wird eine konstant hohe FKZ festgestellt, die eine zu vernachlässigende Abhängigkeit von der Arbeitsplatzanzahl aufweist. Dies resultiert einerseits aus dem großen Potential zur Erhöhung des Anteils an Elektrofahrzeugen, die in Relation die geringere Gesamtbearbeitungszeit aufweisen. Andererseits ermöglicht die Festlegung des Anteils an Fahrzeugen mit Verbrennungsantrieb auf 50% das größte beidseitige Anpassungspotential. Da in s_1 lediglich ein Antriebskonzept existiert und der Betriebspunkt bei 100 % ICE liegt, ergibt sich die FKZ für jede Anzahl von Arbeitsplätzen zu 0,5 (vgl. Abbildung 6.14). Unter Vernachlässigung von Reihenfolge- und Parallelitätsrestriktionen sowie der Unteilbarkeit von Arbeitsvorgängen ergibt sich für die Szenarien s_0 , s_1 , und s_3 eine theoretische Untergrenze von 23 Arbeitsplätzen. Aufgrund des hohen Anteils elektrischer Fahrzeuge in s_2 ergibt sich hier eine theoretische Untergrenze von 22 Arbeitsplätzen. Die Untergrenzen der Arbeitsplätze im Rahmen der Erprobung sind in Abbildung 6.14 ersichtlich. Da die Zunahme an Arbeitsplätzen mit einer Kostenerhöhung einhergeht, wird ersichtlich, dass die Erhöhung der Flexibilität mit der Entstehung zusätzlicher Kosten verbunden ist.

6.3.4 Bewertung der Wandlungsfähigkeit

Da das Zielkriterium der Wandlungsfähigkeit die Bewertung des Betriebs von Fließbandabstimmungen in den Szenarien s_0 bis s_3 nach dem erwarteten Wandel einschließt (vgl. Kapitel 5.1.6.1), erfolgt hierfür analog zu Kapitel 6.3.2 die Bewertung der Kosten zur Kompensation entstehender Überlast.

Die in Kapitel 6.3.1 bestimmten Produktionsprogramme der Szenarien bilden die Grundlage zur Bestimmung der Überlast der Planungsperiode nach dem erwarteten Wandel p_1 . Aufgrund der Zusammensetzung eines Lösungsbündels aus Fließbandabstimmungen der Szenarien s_0 bis s_3 werden die jeweils ermittelten durchschnittlichen Überlasten anhand der in Kapitel 6.2.2.1 definierten Eintrittswahrscheinlichkeiten mit w_s gewichtet. Abbildung 6.15 stellt die gewichtete Überlast der Lösungsbündel aufsteigend sortiert dar und zeigt exemplarisch den Erwartungswert $\mu_{ol,s}$ und die Standardabweichung $\sigma_{ol,s}$ der szenariospezifischen Überlast sowie die Kosten der Überlastkompensation für das Lösungsbündel 96. Ist die Referenzlösung für Szenario s_0 Teil des Lösungsbündels (rot), so entsteht eine tendenziell höhere Überlast je Schicht wodurch höhere Kosten der Überlastkompensation resultieren. Im Vergleich mit der Planungsperiode p_0 ist festzustellen, dass die Überlastkompensation in Planungsperiode p_1 hö-

here Kosten verursacht. Dies kann auf die gegenüber Szenario s_0 erhöhte Zeitspreizung der Szenarien s_2 und s_3 (vgl. Kapitel 6.3.1) zurückgeführt werden, die in der Planungsperiode p_0 nicht zu berücksichtigen sind.

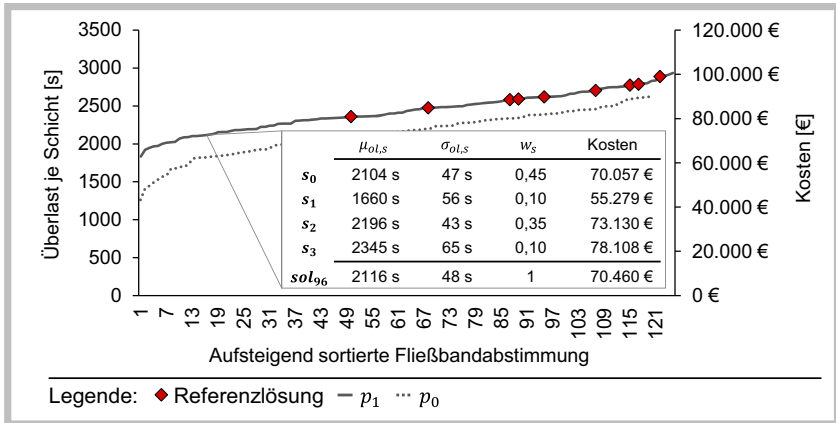


Abbildung 6.15: Kosten der Überlastkompensation anteilig gewichteter Szenarien s_0 bis s_3 für die Planungsperioden p_1 und p_0 in aufsteigender Sortierung

6.4 Entscheidungsphase

Nachdem die Lösungsbündel in Kapitel 6.2 erzeugt wurden und deren Bewertung in Kapitel 6.3 erweitert wurde, erfolgt in diesem Kapitel die Zusammenführung der Teilergebnisse.

6.4.1 Parametrisierung des Auswahlmodells

Bevor das Auswahlmodell zur Entscheidungsunterstützung angewandt wird, erfolgt dessen Parametrisierung. Um die Präferenz der Zielkriterien Greenfield-Kosten, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit abzubilden, wurden die Entscheidungsgewichte gemäß Tabelle 6.11 definiert.

Tabelle 6.11: Übersicht der Entscheidungsgewichte

Zielkriterium r	Zeichen	Entscheidungsgewicht w_r
Greenfield-Kosten	r_{gk}	0,6
Flexibilität	r_{flex}	0,25
Wandlungsfähigkeit	r_{wf}	0,15

Als Teil des Bezugssystems der Entscheidungsalternativen wird die beste Lösung (Idealpunkt) aus den besten Bewertungen der Zielkriterien konstruiert. Als beste Bewertung eines Zielkriteriums gilt das jeweilige Minimum oder Maximum entsprechend der in Kapitel 5.3.2 beschriebenen Optimierungsrichtung. Zur Vervollständigung des Bezugssystems wird entsprechend die schlechteste Lösung (Nadirpunkt) aus den schlechtesten Bewertungen der Zielkriterien erzeugt. Tabelle 6.12 stellt den Ideal- und Nadirpunkt mit den entsprechenden Ausprägungen der Zielkriterien dar.

Tabelle 6.12: Übersicht der nicht normierten Ausprägungen von Ideal- und Nadirpunkt

Zielkriterium r	Zeichen	Ausprägung Idealpunkt	Ausprägung Nadirpunkt
Greenfield-Kosten	r_{gk}	24.549.928 €	30.928.322 €
Flexibilität	r_{flex}	0,728	0,268
Wandlungsfähigkeit	r_{wf}	24.861.004 €	30.464.017 €

6.4.2 Rangfolge der Lösungsalternativen

Unter Anwendung des euklidischen Distanzmaßes wird die Rangfolge der Entscheidungsalternativen ermittelt. Tabelle 6.13 stellt die Ausprägungen der Zielkriterien für die zehn ranghöchsten Lösungsbündel dar. Das bestplazierte Lösungsbündel, das die Referenzlösung *REF* als Fließbandabstimmung des Szenarios s_0 ausweist, wird mit Rang 29 bewertet, was auf eine vergleichsweise schlechte Bewertung der Flexibilität zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 6.3.3).

Tabelle 6.13: Ausprägungen der Zielkriterien für die zehn ranghöchsten Entscheidungsalternativen

Rang	ID sol_{ev}	Greenfield-Kosten	Flexibilität	Wandlungsfähigkeit
1	47	24.549.928 €	0,604	24.861.004 €
2	52	25.465.446 €	0,670	28.088.620 €
3	50	25.713.260 €	0,673	27.694.419 €
4	12	25.630.628 €	0,608	25.847.487 €
5	11	25.666.363 €	0,608	25.833.989 €
6	64	25.656.607 €	0,594	26.163.514 €
7	73	24.886.156 €	0,571	27.458.933 €
8	82	25.656.323 €	0,589	26.180.226 €
9	49	26.468.352 €	0,728	28.127.145 €
10	112	25.664.563 €	0,591	26.963.206 €
29	<i>REF</i>	25.695.936 €	0,525	27.440.856 €

Die Platzierung des in Abbildung 6.16 dargestellten Lösungsbündels $sol_{ev,47}$ auf dem ersten Rang ergibt sich vorrangig aus den geringen Greenfield-Kosten, die im Wesentlichen aus der szenariospezifisch minimalen Anzahl an Arbeitsplätzen (26) verteilt auf die minimale Anzahl an Montagestationen (17) resultieren. Durch den Gewichtungsfaktor von $w_{r_{gk}} = 0,6$ fließen diese stark in die Gesamtbewertung ein.

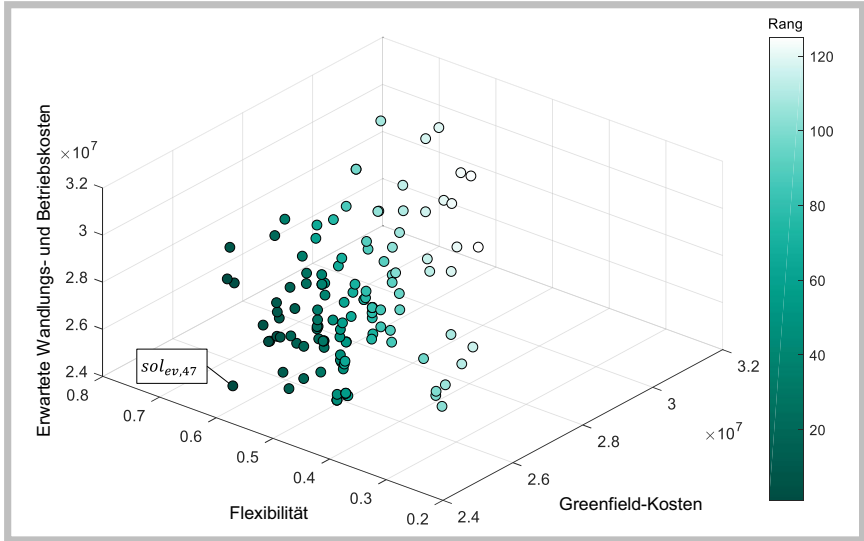


Abbildung 6.16: Punktwolke der Lösungsbündel sol_{ev}

Die Fließbandabstimmungen des Lösungsbündels $sol_{ev,47}$ sind in Abbildung 6.17 dargestellt. Hierbei wird ersichtlich, dass die verfügbare Taktzeit nahezu an jedem Arbeitsplatz zu einem hohen Anteil ausgenutzt wird. Kann im Optimierungsmodell der Fließbandabstimmung für vereinzelte Montagestationen keine höhere Auslastung erzielt werden, so werden durch den Lösungsalgorithmus besonders Arbeitsvorgänge mit hoher Zeitspreizung isoliert allokiert, was die Flexibilität der Fließbandabstimmung unterstützt. Beispiele hierfür sind Arbeitsvorgang 52 in s_2 (Zeitspreizung 3,54 s), 82 in s_3 (5,12 s) sowie 59 und 62 in s_1 (17,15 s). Positiv zu bewerten ist zudem die mehrheitlich gleiche Zuweisung kostenintensiver Betriebsmittel an den Stationen 1,2 und 9, wobei anzumerken ist, dass Arbeitsvorgang 1 und 2 in s_3 aufgrund der Taktzeitrestriktion keiner gemeinsamen Station zugewiesen werden können. Eine detaillierte Übersicht der zehn ranghöchsten Lösungsbündel findet sich in Anhang A.16.

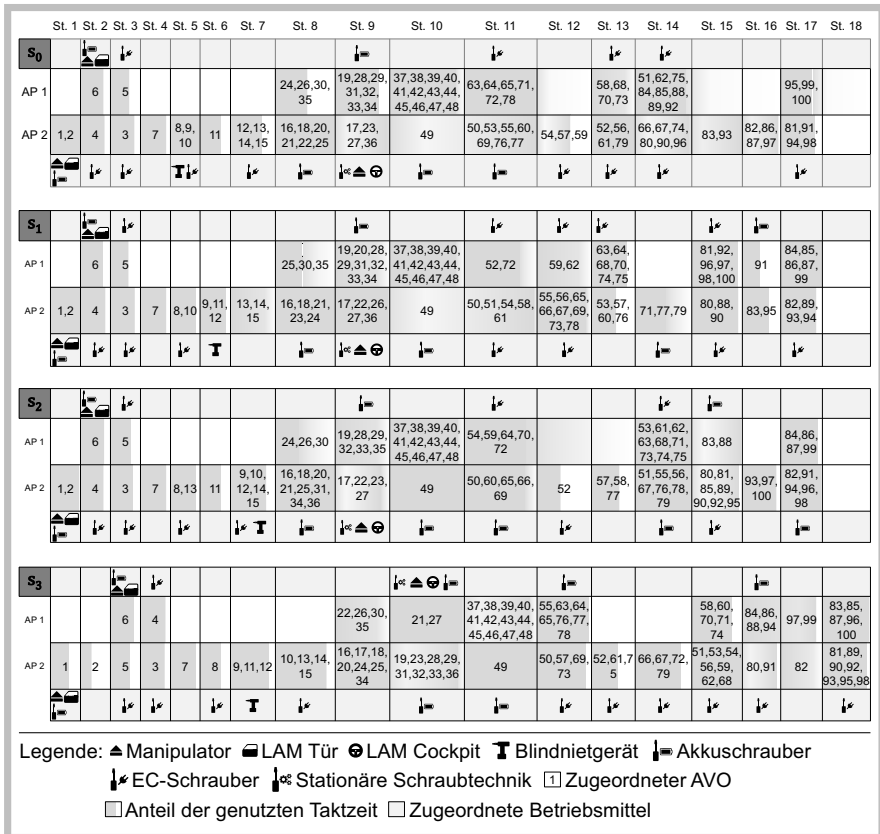


Abbildung 6.17: Szenariospezifische Fließbandabstimmungen des Lösungsbündels $sol_{ev,47}$

Abbildung 6.18 zeigt das gute Flexibilitätsverhalten des Lösungsbündels $sol_{ev,47}$ anhand der in Kapitel 5.2.4.2 definierten Kennzahlen der Lage Fl_L und Robustheit Fl_R . Hervorzuheben ist hierbei der Flexibilitätskorridor der Fließbandabstimmung in s_0 . Dieser ermöglicht ebenso die Ausführung des Variantenmix in s_2 , wodurch ein Wandel der Fließbandabstimmung nicht erforderlich ist. Der im Gegensatz zu den Fließbandabstimmungen in s_0 und s_2 vollständige Flexibilitätskorridor der Fließbandabstimmung in s_3 für die Antriebskonzepte ICE und BEV unter Berücksichtigung eines weiteren Antriebskonzepts ist auf die Erhöhung um zwei Arbeitsplätze zurückzuführen (vgl. Abbildung 6.17).

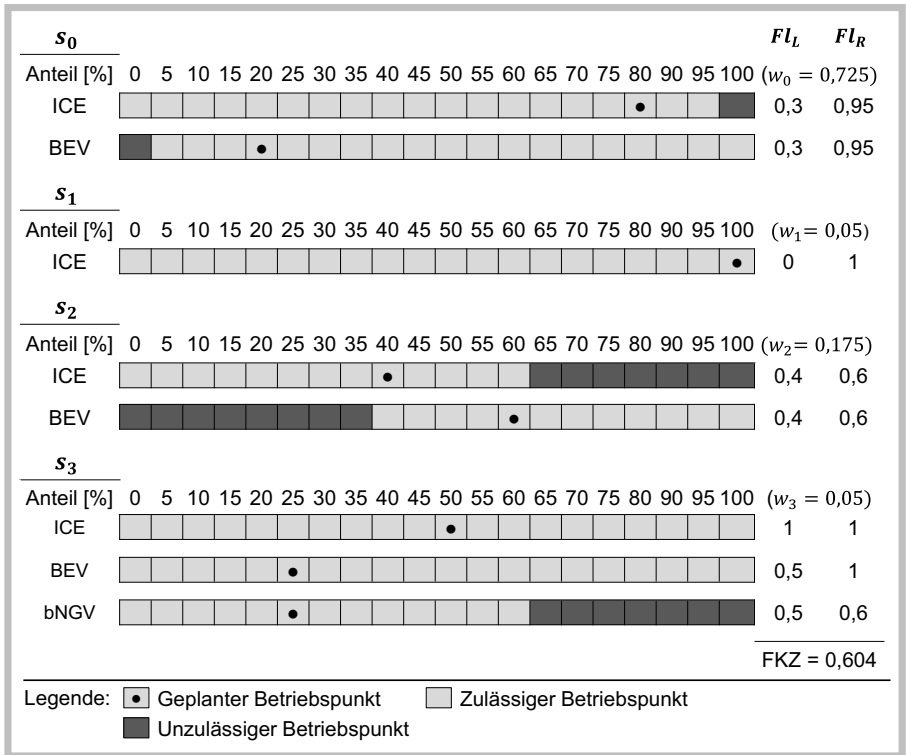


Abbildung 6.18: Ermittlung der FKZ des Lösungsbündels $sol_{ev,47}$

Zur Durchführung dieser Erhöhung wird eine weitere Montagestation erforderlich, sodass bei einem Wandel zusätzliche Stationskosten (SK) anfallen (vgl. Abbildung 6.19). Weiterhin ist ersichtlich, dass die Wandlungskosten wesentlich durch die Betriebskosten der Mitarbeiter getrieben sind, sodass besonders die Minimierung von Montagestationen und Arbeitsplätzen in Fließbandabstimmungen zu adressieren ist. Hinsichtlich s_2 ist anzumerken, dass der Vorteil geringerer Wandlungsobjektkosten (WOK) durch Desinvestitionen aufgrund weniger erforderlicher Betriebsmittel (vgl. Abbildung 6.17) durch die verbleibenden Wandlungskosten nicht aufgewogen wird. Den größten Reallokationsaufwand stellt der Wandel in s_3 dar. Es fallen hier sowohl die höchsten direkten Wandlungskosten (DWK) als auch die höchsten indirekten Wandlungskosten (IWK) an.

		Wandlungskosten [€]						Betriebskosten [€]		
		WOK		DWK				IWK	Mitarbeiter in p_1	Überlast- kompensation in p_1
		inv	desinv	plan	trans	int	desint			
s_0	s_0	-	-	-	-	-	-	-	24.011.145	102.170
	s_1	-	31.952	-	54.251	385	1.284	963	405.000	25.858.157
	s_2	-	7.100	-44.377	48.223	193	963	963	405.000	24.011.145
	s_3	193.100	2.367	-14.792	101.971	3.627	8.024	8.024	1.620.000	25.858.157

Abbildung 6.19: Bewertung der Wandlungsfähigkeit anhand der Wandlungs- und Betriebskosten für $sol_{ev,47}$

6.5 Prototypische Implementierung

Die Aufbereitung der Eingangsdaten der Fließbandabstimmung erfolgt in der Software Excel des Herstellers Microsoft. Über die Nutzung der Datenschnittstelle von MATLAB und Excel erfolgt ein automatisiertes Einlesen der benötigten Daten je nach Konfiguration des Optimierungsproblems. In Kapitel 5.1.6.3 wird der NSGA-II aus der Gruppe der evolutionären Algorithmen zur Optimierung der Fließbandabstimmung empfohlen. Die Umsetzung dieses Lösungsalgorithmus und einer grafischen Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 6.20) erfolgt in der Software MATLAB des Anbieters The MathWorks. Diese bietet eine Implementierung des NSGA-II-Algorithmus, die jedoch unter der Anwendung der Ganzzahligkeitsbedingung auf Entscheidungsvariablen die Formulierung von Nebenbedingungen ausschließt (The MathWorks 2018). Daher wird auf einen Ansatz der Implementierung des NSGA-II Algorithmus nach Lin zurückgegriffen, da hierbei keine Beschränkung der Nebenbedingungen für ganzzahlige Entscheidungsvariablen vorliegt (Lin 2011). Die Berechnungsvorschrift zur Erzeugung der Nachfahrenpopulation aus der Elterngeneration wird als Crossover-Operator bezeichnet (Herrera, Lozano & Sánchez 2003). In der Implementierung des NSGA-II nach Lin (2011) wird der Crossover-Operator für kontinuierliche Probleme durch eine Rundungsvorschrift für ganzzahlige Probleme erweitert. Diese Art der Reproduktion eignet sich nicht für Probleme der Fließbandabstimmung, da durch diese Art der Reproduktion Rundung von kontinuierlichen Variablen vorgenommen werden, womit unzulässige Lösungen erzeugt werden können (Chong, Omar & Bakar 2008). Daher wird der Crossover-Operator durch den häufig verwendeten One-Point-Crossover-Operator in Anlehnung an Bäck, Fogel & Michalewicz (2000) ersetzt. (A_Arslan 2017)

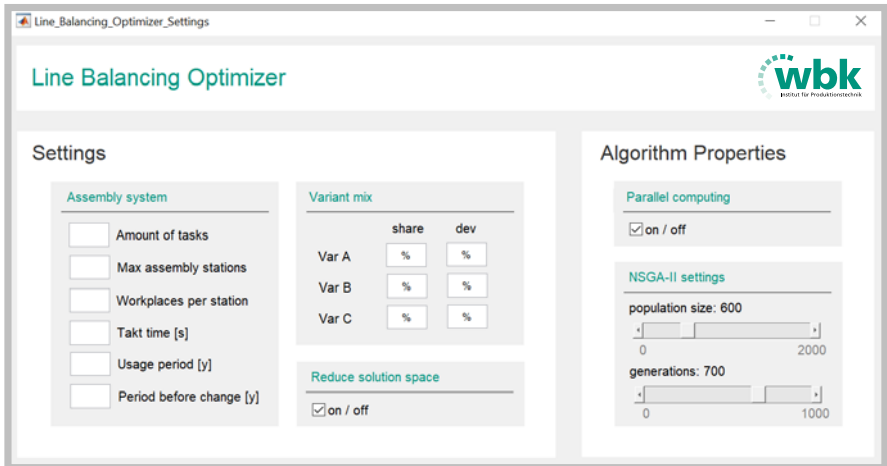


Abbildung 6.20: Konfigurationsansicht des genetischen Algorithmus zur Fließbandabstimmung

Die in den Anhängen A.2, A.3 und A.4 als Pseudocode dargestellten Algorithmen ergänzen die Parametrisierung des Optimierungsmodells zur Reihenfolgebildung und sind in der Skriptsprache Visual Basic for Applications (VBA) in der Software Excel implementiert. Zur Optimierung der Reihenfolgebildung wird der in 5.2.2.5 vorgeschlagene Automatic Search Algorithmus in der Software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio des Herstellers IBM implementiert. Dieser greift automatisiert auf die durch VBA erzeugten Parameter zurück.

Den Abschluss der entwickelten Methodik stellt die Ermittlung der Lösungsbündelrangfolge durch das TOPSIS-Verfahren dar. Dieses ist in der Software MATLAB implementiert und erfordert eine Bereitstellung der Entscheidungsalternativen in Excel.

7 Diskussion und Ausblick

In diesem Kapitel wird die entwickelte Methodik mit den in Kapitel 3.1 definierten Anforderungen abgeglichen (Kapitel 7.1). Nachfolgend wird unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der industriellen Erprobung der Methodik ein Ausblick auf weiterführende Forschungsthemen gegeben (Kapitel 7.2).

7.1 Diskussion und kritische Würdigung

Der entwickelte Lösungsansatz ermöglicht die Gestaltung einer Fließbandabstimmung unter Berücksichtigung zukünftiger Szenarien sowie der Präferenz eines Entscheiders im Zielkonflikt aus Kosten, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit. Die Erfüllung der in Kapitel 3.1 definierten Anforderungen durch den Lösungsansatz sowie dessen Erprobung wird nachfolgend diskutiert.

Die Berücksichtigung von Produktvarianten erfolgt sowohl anhand variantenspezifischer Bearbeitungszeiten und Betriebsmittelanforderungen von Arbeitsvorgängen sowie der Modellierung von Ausstattungsoptionen. Zur Erfüllung der Betriebsmittelanforderungen werden Betriebsmittel definiert und durch einen Optimierungsalgorithmus spezifischen Arbeitsvorgängen zugeordnet. Dabei sind Betriebsmittel durch geeignete Betriebsmittel derselben Klasse substituierbar und werden sowohl im Fall einer Greenfieldplanung als auch eines Wandels der Fließbandabstimmung durch ein Kostenmodell monetär bewertet. Um überlastorientierte Fließbandabstimmung vergleichend gegenüberzustellen, erfolgt die Bestimmung der spezifischen Überlast anhand eines Optimierungsmodells zur Reihenfolgebildung auf Grundlage variiertes Produktionsprogramme. Eine konkrete Einsatzplanung der Unterstützungsmitarbeiter findet dabei nicht statt, sodass eine vereinfachte Kostenbewertung vorliegt. Die Allokation von Arbeitsvorgängen und Betriebsmitteln zu einem Arbeitsplatz einer Montagestation wird als mathematisches Optimierungsproblem formuliert. Dieses ist als Mehrzielproblem

ausgestaltet und ermöglicht somit die nachgelagerte Auswahl einer Alternative basierend auf der Präferenz eines Entscheiders. Zur Ausprägung der Flexibilität von Fließbandabstimmungen werden szenariospezifisch robuste Bearbeitungszeiten von Arbeitsvorgängen gebildet. Durch die Zielfunktion der Varianz wird die Bildung von Arbeitsplätzen mit hoher Zeitspreizung unterdrückt und die stochastische Abhängigkeit von Arbeitsvorgängen berücksichtigt. Die Bewertung der hierdurch erzielten Flexibilität wird anschließend durch die Flexibilitätskennzahl vorgenommen. Die Wandlungsfähigkeit von Fließbandabstimmungen wird durch die entstehenden Kosten einer Reallokation von Arbeitsvorgängen und Betriebsmitteln bewertet, die durch eine entsprechende Formulierung im Optimierungsmodell der Fließbandabstimmung ermittelt werden. Die entwickelte Methodik beschreibt die integrierte Neuplanung und Umplanung von Fließbandabstimmungen. So umfasst jedes Lösungsbündel sowohl eine Fließbandabstimmung der Neuplanung als auch Fließbandabstimmungen zur szenariospezifischen Umplanung. Eine monetäre Bewertung von Fließbandabstimmungen wird im Rahmen der Ermittlung einer optimalen Fließbandabstimmung vorgenommen. Diese Bewertung wird nachfolgend durch die Kosten zur Kompensation entstehender Überlast ergänzt. Ebenso erfolgt eine Bewertung der Flexibilität durch die Flexibilitätskennzahl sowie der Wandlungsfähigkeit anhand der Kosten für Wandel und Betrieb in zukünftigen Szenarien. Der Trade-off von Kosten und Veränderungsfähigkeit wird durch den Zielfunktionsvektor des Optimierungsmodells der Fließbandabstimmung modelliert. Durch das multikriterielle Auswahlmodell wird nach Präferenz eines Entscheiders eine Auswahlentscheidung durch die Erstellung einer Rangfolge der alternativen Lösungsbündel herbeigeführt. Die Unsicherheit ob der zukünftigen Entwicklung wird dabei durch Szenarien abgebildet, die einen Eingangsfaktor zur Bestimmung der Lösungsbündel bilden.

Durch das modellgestützte Vorgehen werden somit sowohl die in Kapitel 3.1 definierten Anforderungen erfüllt, als auch die in Kapitel 1.1 aufgeworfenen forschungsleitenden Fragestellungen beantwortet. Hierdurch wird das in Kapitel 3.3 beschriebene Forschungsdefizit geschlossen.

Wie in der Erprobung ersichtlich, kann das Modell auch verwendet werden, um bestehende Fließbandabstimmungen zu bewerten. Dies erfordert eine manuelle Formulierung der Datengrundlage sowie deren Integration in das Optimierungsmodell durch Festlegung der Fließbandabstimmung für das Szenario s_0 . Dieses Vorgehen kann ebenfalls verwendet werden, um für bestehende Fließbandabstimmungen die Wandlungskosten für bisher nicht berücksichtigte Szenarien zu bewerten. In diesem Fall ist

die Datengrundlage des Szenarios entsprechend anzupassen. Zur Bestimmung gültiger Lösungen fordert das Optimierungsproblem aufgrund seines außerordentlich großen Lösungsraums erhebliche Rechnerleistungen. Dabei hat die Modellierung der Karosserieansprache- und Vorrangsrestriktionen als Nebenbedingungen einen wesentlichen Einfluss auf die Zusammensetzung des Lösungsraums. Sind die Start- und Endzeitpunkte in Abhängigkeit des genannten Restriktionen für jeden Arbeitsvorgang stationsintern explizit zu bestimmen, so erfordert dies typischerweise eine dedizierte Entscheidungsvariable, was wiederum zu einer, je nach Granularität der Zeitpunkte, maßgeblichen Vergrößerung des Lösungsraums führt. Einen weiteren wesentlichen Einfluss auf den Lösungsraum bildet die Granularität von Arbeitsvorgängen. Sind Arbeitsvorgänge aus praktischen Gründen unmittelbar nacheinander auszuführen, bietet sich eine Modellierung als gemeinsamer Arbeitsvorgang an, um die Größe des Lösungsraums zu beschränken. Die Güte des Optimierungsergebnisses orientiert sich an der Qualität der zugrundeliegenden Eingabedaten. Besonders die Bestimmung der Bearbeitungszeiten je Arbeitsvorgang ist sorgfältig durchzuführen, da der Optimierungsalgorithmus basierend auf diesen über die Einhaltung der Taktzeit entscheidet und somit nachträgliche Montageprozessverbesserungen, die zu einer Einhaltung der Taktzeit führen würden, nicht berücksichtigt. Liegt eine sorgfältig geprüfte und aufbereitete Datengrundlage vor, ermögliche die entwickelte Methodik die systematische Gestaltung veränderungsfähiger Fließbandabstimmungen.

7.2 Ausblick

Aus der entwickelten und erprobten Methodik ergeben sich Potentiale für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten. Diese werden nachfolgend beschrieben.

Hinsichtlich der Kostenbewertung zur Kompensation von Überlast bietet sich eine Detaillierung des vereinfachten Kostenmodells an. Eine integrierte Einsatzplanung von Unterstützern ermöglicht hierbei eine gesteigerte Transparenz der Kostenbewertung und kann als Ausgangsbasis für den operativen Betrieb genutzt werden. Weitere Potentiale eröffnet der Ansatz Montagestationsmitarbeiter für Unterstützereinsätze heranzuziehen, da somit die Leerzeit von Mitarbeitern reduziert werden kann. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass eine sequentielle Durchführung von Fließbandabstimmung und Reihenfolgebildung den Zielkonflikt der Nutzung der verfügbaren Mitarbeiterzeit für regulär vorgesehene oder unterstützende Montagetätigkeiten nicht abbildet.

Weiteres Potential bietet die Erweiterung der Fließbandabstimmungsrestriktionen um Beschränkungen der Intralogistik. Ein möglicher Modellierungsaspekt ist hierbei die Beschränkung von Teilestellflächen je Montagearbeitsplatz, sodass eine gemeinsame Arbeitsplatzallokation von stellflächenintensiven Arbeitsvorgängen ausgeschlossen wird.

Die vorliegende Arbeit fokussiert einen einmaligen Wandel der Fließbandabstimmung. Mögliche Erweiterungen der entwickelten Methodik können sich mit der Identifikation optimaler Wandlungspfade von Fließbandabstimmungen beschäftigen. Eine praktische Relevanz besteht hierbei insbesondere für Unternehmen die von einer hohen Marktvolatilität betroffen sind. Eine vergleichsweise kostengünstigere Möglichkeit zur Beherrschung volatiler Veränderungen kann in der punktuellen Veränderung des Automatisierungsgrades von Betriebsmitteln liegen, falls hierdurch eine Veränderung der arbeitsvorgangsspezifischen Bearbeitungszeiten erwirkt werden kann. Eine mögliche Erweiterung des entwickelten Optimierungsmodells zur Fließbandabstimmung besteht hierfür in der Manipulation der Zielfunktion f_{wf} sodass diese anstelle der Reallokationskosten die Kosten des Automatisierungsgrades optimiert.

Erfolgt ein Übertrag auf weitere Anwendungsgebiete, ist zu prüfen, ob sich die zur Verfügung stehenden Betriebsmittel gegenseitig ausschließen. Dies kann beispielsweise aufgrund einer jeweiligen intensiven Flächenanforderung oder sich ausschließender Prozesseigenschaften gegeben sein. Die hieraus entstehenden Restriktionen sind entsprechend in das Optimierungsmodell der Fließbandabstimmung zu integrieren.

Zukünftige Arbeiten können sich zudem mit der Gestaltung veränderungsfähiger Montagesysteme ohne definierte Taktzeit und Montageband beschäftigen. In diesen Systemen ist ebenfalls zu bestimmen wie der Zielkonflikt möglichst niedriger Kosten bei hoher Flexibilität und Wandlungsfähigkeit zu gestalten ist. Zur Bewertung der Zielkriterien kann auf die in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Flexibilitätskennzahl sowie das Kostenmodell zur Bestimmung von Wandlungskosten aufgebaut werden.

8 Zusammenfassung

Produzierende Unternehmen der Automobilindustrie sind mit der Herausforderung konfrontiert die Marktdurchdringung elektrisch angetriebener PKW wirtschaftlich zu gestalten. Die Prognose der zukünftigen Jahresabsatzzahlen unterschiedlicher Antriebskonzepte unterliegt einer hohen Unsicherheit, sodass die schnelle und wirtschaftliche Reaktion von Unternehmen auf Veränderungen zu einem wesentlichen Erfolgsfaktor wird. Die Montage von PKW erfolgt üblicherweise in getakteten Fließmontagesystemen, in denen durch die Fließbandabstimmung eine lineare Abfolge von Montagetätigkeiten definiert ist. Die Fließbandabstimmung wird typischerweise anhand eines durchschnittlichen Variantenmix ermittelt und ist u.a. aufgrund der Systemkomplexität sowie installierter Betriebsmittel nicht aufwandsneutral anpassbar.

Im Stand der Forschung wurde dargestellt, dass sowohl die Gestaltung veränderungsfähiger Systeme als auch die mathematische Optimierung von Fließbandabstimmungen Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Arbeiten ist. Bisherige Arbeiten zur Gestaltung von Fließbandabstimmungen beschäftigen sich hierbei zwar auch mit vorgehaltener Flexibilität, stellen diese jedoch nicht in Wechselwirkung mit systeminhärenter Wandlungsfähigkeit. Zudem greifen bestehende Ansätze der Fließbandabstimmungsoptimierung hinsichtlich einer umfassenden Kostenbewertung von Wandlungsvorgängen zu kurz, da kein Ansatz zur Bewertung der Reallokation von Betriebsmitteln identifiziert werden konnte. Es wurde daher festgehalten, dass kein Ansatz für die Gestaltung von Fließbandabstimmungen existiert, der den Zielkonflikt aus Kosten und Veränderungsfähigkeit unter Berücksichtigung möglicher zukünftiger Entwicklungen modelliert und bezüglich der Präferenz eines Entscheiders in eine Entscheidungsgrundlage überführt. Dieses Forschungsdefizit bildet die wissenschaftliche Zielsetzung der vorliegenden Arbeit.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht daher in der Entwicklung einer Methodik zur Fließbandabstimmung, die sowohl Flexibilität und Wandlungsfähigkeitsanforderungen aufgrund Veränderungen im Variantenmix berücksichtigt, als auch eine Bewertung der

resultierenden Kosten ermöglicht. Hierzu erfolgt die Entwicklung eines multikriteriellen Optimierungsmodells, das in Abhängigkeit möglicher zukünftiger Szenarien veränderungsfähige Fließbandabstimmungen erzeugt. Da Flexibilitätsuntersuchungen und die monetäre Bewertung zur Auflösung von Überlast erst nach erfolgter Reihenfolgeplanung durchzuführen sind, wird eine der Optimierung nachgelagerte Bewertung der Fließbandabstimmungen vorgenommen. Aufgrund der konkurrierenden Zielkriterien von Kosten, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit schließt die Methodik mit einer multikriteriellen Auswahlentscheidung alternativer Fließbandabstimmungen. Das Ergebnis der Methodik ist ein Bündel von Fließbandabstimmungen, das eine konkret ausgeprägte Fließbandabstimmung je Szenario beinhaltet und im Zielkonflikt von Kosten, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der Präferenz eines Entscheiders entspricht. Der Ansatz wurde im Rahmen des BMBF-geförderten Forschungsverbundprojekts EFFECT 360° entwickelt und ausführlich mit den Projektpartnern diskutiert. Zur Erhöhung der Praxistauglichkeit wurde der Ansatz als Softwareprototyp implementiert und erprobt. Zusammenfassend leistet die entwickelte Methodik einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von Fließbandabstimmungen im unsicheren Marktumfeld durch den zielgerichteten Einsatz von Veränderungsfähigkeit.

Literaturverzeichnis

Literaturquellen nach dem Schema A_Name (Jahr) beziehen sich auf studentische Arbeiten am wbk Institut für Produktionstechnik, die durch den Autor der Dissertation angeleitet wurden.

A_Arndt, C. (2016), *Aufbau, Simulation und Bewertung alternativer Montagestrukturkonzepte für die Endmontage elektrifizierter Automobilvarianten*, Masterarbeit, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.

A_Arslan, A. (2017), *Erarbeitung eines Optimierungskonzepts zur Planung von wandlungsfähigen Endmontagesystemen am Beispiel alternativer Antriebssysteme*, Masterarbeit, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.

A_Exner, Y. (2018), *Multikriterielle Optimierung der Fließbandabstimmung zur robusten Ausstattung von wandlungsfähigen Variantenfließmontagesystemen*, Bachelorarbeit, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.

A_Heinzelmann, J. P. (2018), *Minimierung der Überlast einer Montagesequenz unter Einbeziehung von Driftbereichen in der Variantenfließfertigung*, Bachelorarbeit, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.

A_Hellweg, T. (2017), *Methodik zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von wandlungsfähigen Variantenfließmontagesystemen am Beispiel der Automobilendmontage*, Masterarbeit, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.

A_Hort, S. (2018), *Reduktion des Lösungsraums eines genetischen Algorithmus*, Seminararbeit, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.

Abele, E.; Kuske, P. & Lang, H. (2011), *Schutz vor Produktpiraterie. Ein Handbuch für den Maschinen- und Anlagenbau*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642192807.

Abele, E.; Liebeck, T. & Wörn, A. (2007), „Flexibilität im Investitionsentscheidungsprozess“, *wt Werkstattstechnik online*, Vol. 97, 1/2, 85 f.

- Adolf, J. & Rommerskirchen, S. (2014), *Shell PKW-Szenarien bis 2040. Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität*, Shell. https://www.shell.de/promos/media/shell-passenger-car-scenarios-to-2040/_jcr_content.stream/1455700315660/b2e5b602c04e57cf59e2f047567f2510b8780ef8b9984ec1abd365706996f98e/shell-pkw-szenarien-bis-2040-vollversion.pdf [21 Januar 2019].
- Ahmadi, R. H. & Wurgaft, H. (1994), „Design for synchronized flow manufacturing“, *Management Science*, Vol. 40, Nr. 11, S. 1469–1483.
- Aissi, H.; Bazgan, C. & Vanderpooten, D. (2009), „Min–max and min–max regret versions of combinatorial optimization problems. A survey“, *European Journal of Operational Research*, Vol. 197, Nr. 2, S. 427–438.
- Alden, J. M.; Costy, T. & Inman, R. R. (2002), „Product-to-plant allocation assessment in the automotive industry“, *Journal of manufacturing systems*, Vol. 21, Nr. 1, S. 1–13.
- Altemeier, S. (2009), *Kostenoptimale Kapazitätsabstimmung in der getakteten Variantenfließlinie*. Dissertation, Universität Paderborn.
- Arora, R. & Kaushik, S. C. (2015), „Multi-objective and multi-parameter optimization of two-stage thermoelectric generator in electrically series and parallel configurations through NSGA-II“, *Energy*, Vol. 91, S. 242–254.
- Askar, G. (2008), *Optimierte Flexibilitätsnutzung in Automobilwerken*. Dissertation, Technische Universität Clausthal.
- Auer, B. & Rottmann, H. (2012), *Statistik und Ökonometrie für Wirtschaftswissenschaftler. Eine anwendungsorientierte Einführung*, Gabler Verlag, Wiesbaden. ISBN: 9783834969262.
- Azab, A. & ElMaraghy, H. A. (2007), „Mathematical modeling for reconfigurable process planning“, *CIRP Annals*, Vol. 56, Nr. 1, S. 467–472.
- Bäck, T.; Fogel, D. B. & Michalewicz, Z. (2000), *Evolutionary computation 1. Basic algorithms and operators*, CRC press, Bristol, Philadelphia. ISBN: 9781482268713.
- Balzert, H. (2011), *Lehrbuch der Objektmodellierung. Analyse und Entwurf mit der UML 2*, Spektrum, Heidelberg. ISBN: 9783827429032.
- Bartels, J.-H. (2009), *Anwendung von Methoden der ressourcenbeschränkten Projektplanung mit multiplen Ausführungsmodi in der betriebswirtschaftlichen Praxis*, Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783834916969.

- Battaia, O. & Dolgui, A. (2013), „A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches“, *International Journal of Production Economics*, Vol. 142, Nr. 2, S. 259–277.
- Bauer, C. (2014), *Untersuchung des Einflusses einzelner Rohstoffe auf die Absatzentwicklung alternativer PKW-Antriebskonzepte bis 2030*. Dissertation, Technische Universität Wien.
- Baumgärtel, H. (1999), *Verteiltes Lösen von Constraint-Problemen in Multitangenten-Systemen zur optimierten Planung in einer Fließfertigung*. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Bautista Valhondo, J. & Cano, J. (2006), „Heuristics and hiperheuristics for sequencing mixed model assembly lines minimizing work overload“, *Second International Conference on Knowledge Engineering and Decision Support*, S. 235–241.
- Baybars, İ. (1986), „A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem“, *Management Science*, Vol. 32, Nr. 8, S. 909–932.
- Becker, C. (2007), *Abstimmung flexibler Endmontagefließbänder in der Automobilindustrie*, Books on Demand, Norderstedt. ISBN: 9783837012439.
- Becker, C. & Scholl, A. (2006), „A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing“, *European Journal of Operational Research*, Vol. 168, Nr. 3, S. 694–715.
- Becker, C. & Scholl, A. (2009), „Balancing assembly lines with variable parallel workplaces. Problem definition and effective solution procedure“, *European Journal of Operational Research*, Vol. 199, Nr. 2, S. 359–374.
- Benkamoun, N. (2016), *Systemic design methodology for changeable manufacturing systems*. Dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.
- Benker, H. (2013), *Mathematische Optimierung mit Computeralgebrasystemen. Einführung für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Wirtschaftswissenschaftler unter Anwendung von MATHEMATICA, MAPLE, MATHCAD, MATLAB und EXCEL*, Springer, Berlin. ISBN: 9783642557361.
- Bertram, M. & Bongard, S. (2013), *Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr: Grundlagen, Einflussfaktoren und Wirtschaftlichkeitsvergleich*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 9783658022648.

- Bertsch, S. & Nyhuis, P. (2012), „Gestaltung und Nutzung produktionslogistischer Wandlungsfähigkeit“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Vol. 107, Nr. 6, S. 437–442.
- Bleymüller, J.; Weißbach, R.; Gehlert, G. & Gülicher, H. (2015), *Statistik für Wirtschaftswissenschaftler*, Vahlen, München. ISBN: 9783800649617.
- BMW (2016), *Kabinett beschließt Förderung von Elektroautos*. <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2016/20160518-kabinett-beschliesst-foerderung-von-elektroautos.html> [21 Januar 2019].
- Bokranz, R. & Landau, K. (2006), *Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen. MTM-Handbuch*, Schäffer-Poeschel, Stuttgart. ISBN: 9783791021331.
- Bosch, K. (2015), *Großes Lehrbuch der Statistik*, Oldenbourg Verlag Wien München. ISBN: 9783486788600.
- Bossert, B. (2013), *Einlastungsplanung flexibler Fertigungssysteme. Entscheidungsunterstützung unter Mehrzielaspekten*, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden. ISBN: 9783322933614.
- Boucher, T. O. (1987), „Choice of assembly line design under task learning“, *International Journal of Production Research*, Vol. 25, Nr. 4, S. 513–524.
- Boysen, N. (2005), *Variantenfließfertigung*, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden. ISBN: 9783835000582.
- Boysen, N.; Fliedner, M. & Scholl, A. (2007), „A classification of assembly line balancing problems“, *European Journal of Operational Research*, Vol. 183, Nr. 2, S. 674–693.
- Boysen, N.; Fliedner, M. & Scholl, A. (2008), „Assembly line balancing: Which model to use when?“, *International Journal of Production Economics*, Vol. 111, Nr. 2, S. 509–528.
- Boysen, N.; Fliedner, M. & Scholl, A. (2009a), „Production planning of mixed-model assembly lines: overview and extensions“, *Production Planning & Control*, Vol. 20, Nr. 5, S. 455–471.
- Boysen, N.; Fliedner, M. & Scholl, A. (2009b), „Sequencing mixed-model assembly lines. Survey, classification and model critique“, *European Journal of Operational Research*, Vol. 192, Nr. 2, S. 349–373.

- Braess, H.-H. & Seiffert, U. (2013), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 9783658016913.
- Buchholz, L. & Gerhards, R. (2016), *Internes Rechnungswesen. Kosten- und Leistungsrechnung, Betriebsstatistik und Planungsrechnung*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662484050.
- Bukchin, J. & Tzur, M. (2000), „Design of flexible assembly line to minimize equipment cost“, *IIE Transactions*, Vol. 32, Nr. 7, S. 585–598.
- Bullinger, H.-J. & Lung, M. M. (1994), *Planung der Materialbereitstellung in der Montage*, Springer, Wiesbaden. ISBN: 9783663110460.
- Bürgin, J. (2018), *Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken. Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen*, Shaker, Herzogenrath. ISBN: 9783844062373.
- Burkert, A. (2017), „Die Elektromobilität fordert ihren Tribut“, *MTZ-Motortechnische Zeitschrift*, Vol. 78, Nr. 2, S. 8–13.
- Buttelmann, M. & Lohmann, B. (2004), „Optimierung mit Genetischen Algorithmen und eine Anwendung zur Modellreduktion“, *at-Automatisierungstechnik*, Vol. 52, Nr. 4, S. 151–163.
- BuW (2017), *Abschlussbericht der Begleit- und Wirkungsforschung 2017. Schaufenster-Programm Elektromobilität*. https://schaufenster-elektromobilitaet.org/media/media/documents/dokumente_der_begleit__und_wirkungsforschung/EP30_Abschlussbericht_2017_der_Begleit-_und_Wirkungsforschung.pdf [21 Januar 2019].
- Chakravarty, A. K. (1988), „Line Balancing With Task Learning Effects“, *IIE Transactions*, Vol. 20, Nr. 2, S. 186–193.
- Chong, K. E.; Omar, M. K. & Bakar, N. A. (2008), „Solving assembly line balancing problem using genetic algorithm with heuristics-treated initial population“, *Proceedings of the World Congress on Engineering*.
- Claus, T.; Herrmann, F. & Manitz, M. (2015), *Produktionsplanung und –steuerung. Forschungsansätze, Methoden und deren Anwendungen*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662435427.
- Damisch, P. N. (2013), *Wertorientiertes Flexibilitätsmanagement durch den Realoptionsansatz*, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden. ISBN: 9783824406494.

- Dangelmaier, W. (2017), *Produktionstheorie 2. Statische Konstruktionen*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3662549209.
- Danner, F. (2017), *Befähigung zur effizienzsteigernden Produktion von Fahrzeugen mit konventionellen und elektrifizierten Antriebssystemen durch innovative Prüf- und Inbetriebnahmeverfahren*, Apprimus Wissenschaftsverlag, Aachen. ISBN: 9783863595562.
- Deb, K. (2001), *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, Wiley, New Jersey. ISBN: 9780471873396.
- Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S. & Meyarivan, T. (2002), „A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II“, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, Nr. 2, S. 182–197.
- Decker, M. (2013), *Variantenfließfertigung*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642524011.
- Denkena, B. & Drabow, G. (2005), „Gestaltung und Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Betriebsmitteln“, *Wiendahl H, Nofen D, Klußmann JH, Breitenbach F, Denkena B, ua, editors. Planung modularer Fabriken: Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. Carl Hanser, München, Wien*, S. 68–92.
- Deuse, J. & Busch, F. (2012), „Zeitwirtschaft in der Montage“ in *Montage in der industriellen Produktion*, Hrsg. B. Lotter & H.-P. Wiendahl, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 79–108.
- DIN 8593 (2003), *Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Beuth Verlag, Nr. 8593.
- Dombrowski, U. & Medo, M. (2006), „Varianten im Takt – Gift für die Produktivität?“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Vol. 101, Nr. 12, S. 715–718.
- Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R. & Scholl, A. (2015), *Einführung in Operations Research*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662482162.
- Domschke, W.; Scholl, A. & Voß, S. (1997), *Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte : mit 134 Abbildungen und 48 Tabellen*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York. ISBN: 9783540635604.
- Dörmer, J. (2013), *Produktionsprogrammplanung bei variantenreicher Fließproduktion: Untersucht am Beispiel der Automobilendmontage*, Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783658020927.

- D'Souza, D. F. & Wills, A. C. (1998), *Objects, components and frameworks with UML. The catalysis approach*, Addison-Wesley, Boston. ISBN: 9780201310122.
- EIMaraghy, H. A. (2005), „Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms“, *International journal of flexible manufacturing systems*, Vol. 17, Nr. 4, S. 261–276.
- EIMaraghy, H. A. (2009), *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, Springer, London. ISBN: 9781848820678.
- Eppink, D. J. (1978), „Planning for strategic flexibility“, *Long Range Planning*, Vol. 11, Nr. 4, S. 9–15.
- Europäische Union (2009), *Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. Verordnung Nr. 443/2009.*
- Eversheim, W. (1996), *Organisation in der Produktionstechnik Band 1. Grundlagen*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642877377.
- Eversheim, W. (2011), *Organisation in der Produktionstechnik Band 4. Fertigung und Montage*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642648007.
- Eversheim, W. & Abels, I. (2003), „Simulationsgestützte Personaleinsatzplanung in der Pkw-Endmontage“ in *Simulation in der Automobilproduktion*, Hrsg. J. Bayer, T. Collisi & S. Wenzel, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 61–70.
- Fisel, J.; Arslan, A. & Lanza, G. (2017), „Changeability focused planning method for multi model assembly systems in automotive industry“, *Procedia CIRP*, Vol. 63, S. 515–520.
- Fisel, J.; Exner, Y.; Stricker, N. & Lanza, G. (2018), „Variant flexibility in assembly line balancing under the premise of feasibility robustness“, *Procedia CIRP*, Vol. 64, 774-779.
- Fisel, J. & Lanza, G. (2016), „Planning approach for a changeable multi model assembly system“. *2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 212–216.

Foith-Förster, P. & Bauernhansl, T. (2015), „Changeable and reconfigurable assembly systems—A structure planning approach in automotive manufacturing“, *15. Internationales Stuttgarter Symposium*, S. 1173–1192.

Franz, C. (2014), *Driftorientierte Einsteuerung von Aufträgen auf Variantenfließlinien in der Automobilindustrie*. Dissertation, Universität Paderborn.

Freye, D. (1997), *Reihenfolgeplanung in einem variantenreichen Fließfertigungssystem*. Dissertation, Universität Göttingen.

Gagsch, B. (2002), *Wandlungsfähigkeit von Unternehmen. Konzept für ein kontextgerechtes Management des Wandels*, Lang, Bern. ISBN: 9783631395691.

Gamberini, R.; Gebennini, E.; Grassi, A. & Regattieri, A. (2009), „A multiple single-pass heuristic algorithm solving the stochastic assembly line rebalancing problem“, *International Journal of Production Research*, Vol. 47, Nr. 8, S. 2141–2164.

Gamberini, R.; Grassi, A. & Rimini, B. (2006), „A new multi-objective heuristic algorithm for solving the stochastic assembly line re-balancing problem“, *International Journal of Production Economics*, Vol. 102, Nr. 2, S. 226–243.

Gans, J. E. (2009), *Neu- und Anpassungsplanung der Struktur von getakteten Fließproduktionssystemen für variantenreiche Serienprodukte in der Montage*. Dissertation, Universität Paderborn.

Gans, J. E.; Lanza, G.; Müller, R.; Peters, S. & Schoen, L. (2011), „Prognose des Driftverhaltens getakteter Montagelinien“, *wt Werkstattstechnik online*, Nr. 3, S. 162–166.

Gausemeier, J.; Fink, A. & Schlake, O. (1995), *Szenario-Management. Planen und Führen mit Szenarien*, Carl Hanser, München. ISBN: 9783446181694.

Gehring, H. & Schütz, G. (1994), „Zwei genetische Algorithmen zur Lösung des Bandabgleichproblems“ in *Operations Research Reflexionen aus Theorie und Praxis*, Hrsg. B. Werners & R. Gabriel, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 85–128.

Geldermann, J. & Lerche, N. (2014), „Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung. Methode: PROMETHEE“, *Leitfaden*, Georg-August-Universität Göttingen.

Gerwin, D. (1993), „Manufacturing flexibility. A strategic perspective“, *Management Science*, Vol. 39, Nr. 4, S. 395–410.

- Glaser, H.; Schröder, E. F. & Werder, A. von (1998), *Organisation im Wandel der Märkte*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 9783322869920.
- Göpfert, I.; Braun, D. & Schulz, M. (2013), *Automobillogistik*, Springer, Wiesbaden. ISBN: 9783658015824.
- Gottlieb, J.; Puchta, M. & Solnon, C. (2003), „A Study of Greedy, Local Search, and Ant Colony Optimization Approaches for Car Sequencing Problems“. *Applications of Evolutionary Computing*, Hrsg. S. Cagnoni, C. G. Johnson, J. J. R. Cardalda, E. Marchiori, D. W. Corne, J.-A. Meyer, J. Gottlieb, M. Middendorf, A. Guillot, G. R. Raidl & E. Hart, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 246–257. ISBN: 9783540366058.
- Gottschalk, S. F. (2006), *Dedicated Flexibility. Komplexitätsoptimale Gestaltung manueller Serienmontage*, Shaker, Aachen. ISBN: 9783832254858.
- Götze, U. (2014), *Investitionsrechnung. Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-54622-8.
- Greco, S.; Figueira, J. & Ehrgott, M. (2005), *Multiple criteria decision analysis*, Springer, New York. ISBN: 9780387230818.
- Große-Heitmeyer, V. (2013), „Logistik“ in *Variantenbeherrschung in der Montage. Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe*, Hrsg. H.-P. Wiendahl, D. Gerst & L. Keunecke, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 67–76.
- Grundig, C.-G. (2014), *Fabrikplanung. Planungssystematik-Methoden-Anwendungen*, Carl Hanser, München. ISBN: 9783446441576.
- Hahn, D. & Kaufmann, L. (2013), *Handbuch Industrielles Beschaffungsmanagement. Internationale Konzepte—Innovative Instrumente—Aktuelle Praxisbeispiele*, Springer, Wiesbaden. ISBN: 9783322994622.
- Hahn, R. (1972), *Produktionsplanung bei Linienfertigung*, Walter de Gruyter, Berlin. ISBN: 9783110038408.
- Haller, M. (1999), *Bewertung der Flexibilität automatisierter Materialflußsysteme der variantenreichen Großserienproduktion*, Herbert Utz, München. ISBN: 9783896756725.
- Halubek, P. (2012), *Simulationsbasierte Planungsunterstützung für Variantenfließfertigungen*, Vulkan, Essen. ISBN: 9783802783166.

- Hansmann, K.-W. (2006), *Industrielles Management*, Walter de Gruyter, Berlin. ISBN: 9783486580587.
- Hartkopf, M. (2013), *Systematik für eine kontinuierliche und langfristig ausgerichtete Planung technologischer und kapazitiver Werksentwicklungen*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- Hazır, Ö. & Dolgui, A. (2013), „Assembly line balancing under uncertainty. Robust optimization models and exact solution method“, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 65, Nr. 2, S. 261–267.
- Heger, C. L. (2007), *Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten*. Dissertation, Leibniz Universität Hannover.
- Heinen, T.; Rimpau, C. & Wörn, A. (2008), „Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung“ in *Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten*, Hrsg. P. Nyhuis, G. Reinhart & E. Abele, Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; PZH Produktionstechnisches Zentrum, Hannover, Garbsen, S. 19–32.
- Heisel, U.; Klocke, F.; Uhlmann, E. & Spur, G. (2014), *Handbuch Spanen und Abtragen*, Carl Hanser, München. ISBN: 9783446436992.
- Henking, A.; Bluhm, C. & Fahrmeir, L. (2006), *Kreditrisikomessung. Statistische Grundlagen, Methoden und Modellierung*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540321460.
- Hernández Morales, R. (2003), *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*, VDI-Verlag, Düsseldorf. ISBN: 9783183149162.
- Herrera, F.; Lozano, M. & Sánchez, A. M. (2003), „A taxonomy for the crossover operator for real-coded genetic algorithms. An experimental study“, *International Journal of Intelligent Systems*, Vol. 18, Nr. 3, S. 309–338.
- Hillier, F. S. & Lieberman, G. J. (2015), *Introduction to operations research*, McGraw-Hill Education, New York. ISBN: 9781259253188.
- Hochdörffer, J. (2018), *Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken*, Shaker, Aachen. ISBN: 9783844058451.
- Holtbrügge, D. & Puck, J. F. (2005), *Personalmanagement*, Springer Gabler, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540278566.

Hu, S. J.; Ko J.; Weyand, L.; ElMaraghy, H. A.; Lien, T. K.; Koren, Y.; Bley, H.; Chryssolouris, G.; Nasr, N. & Shpitalni, M. (2011), „Assembly system design and operations for product variety“, *CIRP Annals*, Vol. 60, Nr. 2, S. 715–733.

Huang, I. B.; Keisler, J. & Linkov, I. (2011), „Multi-criteria decision analysis in environmental sciences. Ten years of applications and trends“, *The Science of the total environment*, Vol. 409, Nr. 19, S. 3578–3594.

IG Metall (2018a), *Die Tarifrunden in der Metall- und Elektroindustrie seit 1990*. https://www.gesammetall.de/sites/default/files/downloads/broschuere_-_tarifentgelte_1990-2018.pdf [21 November 2018].

IG Metall (2018b), *Metall- und Elektroindustrie: Monatsentgelte, Ausbildungsvergütungen, Urlaub und mehr*. <https://www.igmetall.de/metall-und-elektro-monatsentgelte-907.htm> [21 November 2018].

ILOG (2007), *Release Notes*. <http://www-eio.upc.es/lceio/manuals/cplex-11/pdf/relnotescplex.pdf> [27 Oktober 2018].

Jacob, H. (1990), „Flexibilität und ihre Bedeutung für die Betriebspolitik“ in *Integration und Flexibilität: Eine Herausforderung für die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, Hrsg. D. Adam, K. Backhaus, H. Meffert & H. Wagner, Gabler Verlag, Wiesbaden, S. 15–60.

Jacob, H. (2013), *Investitionsplanung und Investitionsentscheidung mit Hilfe der Linearprogrammierung*, Gabler Verlag, Wiesbaden. ISBN: 9783663132769.

Janssen, H. (1997), *Flexibilitätsmanagement. Theoretische Fundierung und Gestaltungsmöglichkeiten in strategischer Perspektive*, Schäffer-Poeschel, Stuttgart. ISBN: 9783791011745.

Kallrath, J. (2013), *Gemischt-ganzzahlige Optimierung. Modellierung in der Praxis: mit Fallstudien aus Chemie, Energiewirtschaft, Metallgewerbe, Produktion und Logistik*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 9783322802194.

Kaluza, B. & Behrens, S. (2005), *Erfolgsfaktor Flexibilität. Strategien und Konzepte für wandlungsfähige Unternehmen*, Schmidt, Berlin. ISBN: 9783503083671.

Kampker, A. (2012), „Integration der E-Produktion in die laufende Serie“, *WZL RWTH Aachen Vortrag*. <https://docplayer.org/10590931-Integration-der-e-produktion-in-die-laufende-serie.html> [21 Januar 2019].

- Kampker, A. (2014), *Elektromobilproduktion*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 9783642420221.
- Kampker, A.; Burggräf, P.; Gartzen, T.; Swist, M.; Bäumers, Y. & Petersohn, G. (2012), „Herausforderungen bei der Montage von E-Fahrzeugen“, *wt Werkstattstechnik online*, Vol. 102, Nr. 9, S. 550–555.
- Kampker, A.; Schuh, G.; Swist, M. & Ivanescu, S. (2011), „Future assembly structures for electric vehicles“, *ATZautotechnology*, Vol. 11, Nr. 2, S. 58–63.
- Karp, R. M. (1972), „Reducibility among combinatorial problems“ in *Complexity of computer computations*, Hrsg. R. Miller, Springer, Boston, S. 85–103.
- Keckl, S.; Abou-Haydar, A. & Westkämper, E. (2016), „Complexity-focused Planning and Operating of Mixed-model Assembly Lines in Automotive Manufacturing“, *Procedia CIRP*, Vol. 57, S. 333–338.
- Keckl, S.; Kern, W.; Abou-Haydar, A. & Westkämper, E. (2016), „An analytical framework for handling production time variety at workstations of mixed-model assembly lines“, *Procedia CIRP*, Vol. 41, S. 201–206.
- Kern, W.; Rusitschka, F. & Bauernhansl, T. (2016), „Planning of workstations in a modular automotive assembly system“, *Procedia CIRP*, Vol. 57, S. 327–332.
- Kilbridge, L. W. M. & Wester, L. (1963), „The assembly line mixed-model sequencing problem“, *Proceedings of the third international conference on Operations Research*, S. 247–260.
- Klein, R. & Scholl, A. (2012), *Planung und Entscheidung. Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse*, Franz Vahlen, München. ISBN: 9783800638857.
- Klemke, T. (2014), *Planung der systemischen Wandlungsfähigkeit von Fabriken*, TEWISS, Garbsen. ISBN: 9783944586502.
- Klenke, H. (1977), *Ablaufplanung bei Fließfertigung*, Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783322917287.
- Klug, F. (2010), *Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642052934.
- Kluge, S. (2011), *Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme*. Dissertation, Universität Stuttgart.

- Koch, S. (2011), *Methodik zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit von Fabriken im Maschinen- und Anlagenbau*, Apprimus Wissenschaftsverlag, Aachen. ISBN: 9783863590468.
- Koren, Y. (2005), „Reconfigurable Manufacturing and Beyond. Keynote“. *Proceedings of the 3rd International conference on Reconfigurable Manufacturing*, Hrsg. Y. Koren.
- Koren, Y. (2006), „General RMS characteristics. Comparison with dedicated and flexible systems“ in *Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories*, Hrsg. A. Dashchenko, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 27–45.
- Koren, Y.; Gu, X. & Guo, W. (2017), „Reconfigurable manufacturing systems. Principles, design, and future trends“, *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol. 13, Nr. 2, S. 121–136.
- Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F.; Moriwaki, T.; Pritschow, G.; Ulsoy, G. & van Brussel, H. (1999), „Reconfigurable manufacturing systems“, *CIRP Annals*, Vol. 48, Nr. 2, S. 527–540.
- Koren, Y. & Shpitalni, M. (2010), „Design of reconfigurable manufacturing systems“, *Journal of manufacturing systems*, Vol. 29, Nr. 4, S. 130–141.
- Koste, L. L. & Malhotra, M. K. (1999), „A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility“, *Journal of operations management*, Vol. 18, Nr. 1, S. 75–93.
- Kraftfahrtbundesamt (2017), *Glossar*, Kraftfahrtbundesamt. https://www.kba.de/DE/Service/Glossar/glossar_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=13 [22 April 2018].
- Kratzsch, S. (2000), *Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen*, Vulkan, Essen. ISBN: 9783802786549.
- Kropik, M. (2009), *Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540889915.
- Krüger, A. (2004), *Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme*, Herbert Utz, München. ISBN: 9783831603718.
- Kruschwitz, L. (2014), *Investitionsrechnung*, Oldenbourg Verlag, München. ISBN: 9783110371734.

- Küber, C. (2017), *Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen in der variantenreichen Serienmontage. Am Beispiel der Automobilindustrie*, Fraunhofer Verlag, Stuttgart. ISBN: 9783839612323.
- Küber, C.; Westkämper, E.; Keller, B. & Jacobi, H.-F. (2016), „Method for a cross-architecture assembly line planning in the automotive industry with focus on modularized, order flexible, economical and adaptable assembly processes“, *Procedia CIRP*, Vol. 57, S. 339–344.
- Kuhn, H. (2013), *Fließproduktionssysteme. Leistungsbewertung, Konfigurations- und Instandhaltungsplanung*, Physica-Verlag, Heidelberg. ISBN: 9783642524226.
- Laborie, P.; Rogerie, J.; Shaw, P. & Vilím, P. (2018), „IBM ILOG CP optimizer for scheduling“, *Constraints*, Vol. 23, Nr. 2, S. 210–250.
- Lafou, M.; Mathieu, L.; Pois, S. & Alochet, M. (2015), „Manufacturing System Configuration. Flexibility Analysis For automotive Mixed-Model Assembly Lines“, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48, Nr. 3, S. 94–99.
- Landherr, M. H. (2014), *Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration für die variantenreiche Serienfertigung*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- Laux, H.; Gillenkirch, R. M. & Schenk-Mathes, H. Y. (2014), *Entscheidungstheorie*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642552588.
- Laux, H. & Schabel, M. M. (2008), *Subjektive Investitionsbewertung, Marktbewertung und Risikoteilung. Grenzpreise aus Sicht börsennotierter Unternehmen und individueller Investoren im Vergleich*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540852728.
- Leisten, R. & Krcal, H.-C. (2013), *Nachhaltige Unternehmensführung. Systemperspektiven*, Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783663108610.
- Lesert, A.; Alpan, G.; Frein, Y. & Noire, S. (2011), „Definition of spacing constraints for the car sequencing problem“, *International Journal of Production Research*, Vol. 49, Nr. 4, S. 963–994.
- Lin, S. (2011), *NGPM -- A NSGA-II Program in Matlab v1.4*. <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/31166-ngpm-a-nsga-ii-program-in-matlab-v1-4> [31 März 2018].

- Löffler, C. (2011), *Systematik der strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serienfertigung*, Jost-Jetter, Stuttgart. ISBN: 9783939890904.
- Lotter, B. (2012a), „Einführung“ in *Montage in der industriellen Produktion*, Hrsg. H.-P. Wiendahl & B. Lotter, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 1–8.
- Lotter, B. (2012b), „Manuelle Montage von Großgeräten“ in *Montage in der industriellen Produktion*, Hrsg. H.-P. Wiendahl & B. Lotter, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 147–165.
- Makssoud, F.; Battaïa, O. & Dolgui, A. (2013), „An exact method for the assembly line re-balancing problem“, *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*, S. 159–166.
- März, L.; Krug, W.; Rose, O. & Weigert, G. (2010), *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642145360.
- März, L. & Langsdorff, P. (2001), „Flexibilität und Marktorientierung in der Montage“ in *Montageplanung — effizient und marktgerecht*, Hrsg. E. Westkämper, H.-J. Bullinger, P. Horváth & E. Zahn, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 3–10.
- März, L.; Mayrhofer, W. & Sihn, W. (2012), „Beyond human tetris: simulation-based optimization of personnel assignment planning in sequenced commercial vehicle assembly.“. *Technologies and Systems for Assembly Quality, Productivity and Customization. Proceedings of the 4th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*, Hrsg. S. J. Hu, University of Michigan - Mechanical Engineering, S. 175–178.
- März, L.; Pröpster, M. & Röser, S. (2012), „Simulationsgestützte Bewertung getakteter Linien“, *Werkstatttechnik online*, Vol. 102, Nr. 3, S. 145–151.
- Maschke, P. (2010), „Herausforderungen In Der Montage Von Elektrofahrzeugen“, *ATZproduktion*, Vol. 3, Nr. 3, S. 24–27.
- Matanachai, S. & Yano, C. A. (2001), „Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload“, *IIE Transactions*, Vol. 33, Nr. 1, S. 29–42.
- Medo, M. (2010), *Kontinuierliche Planung der Fließfertigung von Varianten*, Shaker, Aachen. ISBN: 9783832295462.
- Mehnen, J. (2005), *Mehrkriterielle Optimierverfahren für produktionstechnische Prozesse*, Vulkan, Essen. ISBN: 9783802787607.

- Meißner, S. (2009), *Logistische Stabilität in der automobilen Variantenfließfertigung*. Dissertation, Technische Universität München.
- Merengo, C.; Nava, F. & Pozzetti, A. (1999), „Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines“, *International Journal of Production Research*, Vol. 37, Nr. 12, S. 2835–2860.
- Milani, A. S.; Shanian, A.; Madoliat, R. & Nemes, J. A. (2005), „The effect of normalization norms in multiple attribute decision making models. A case study in gear material selection“, *Structural and multidisciplinary optimization*, Vol. 29, Nr. 4, S. 312–318.
- Milberg, J.; Reinhart, G. & Spath, D. (1999), „Produktionssystemplanung“ in *Produktion und Management 3: Gestaltung von Produktionssystemen*, Hrsg. W. Eversheim & G. Schuh, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 118–244.
- Möller, N. (2008), *Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme*, Herbert Utz, München. ISBN: 9783831607785.
- Mosadegh, H.; Fatemi Ghomi, S. & Süer, G. A. (2016), „Heuristic approaches for mixed-model sequencing problem with stochastic processing times“, *International Journal of Production Research*, Vol. 55, Nr. 10, S. 2857–2880.
- Moser, E. (2018), *Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke. Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger*, Shaker, Aachen. ISBN: 9783844057973.
- Moser, R. (2014), *Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke. Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung*, Shaker, Aachen. ISBN: 9783844028232.
- Motzer, D. (2015), *Strukturalternative für die Aggregateaufrüstung einer automobilen Fertigung*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 9783658088057.
- Müller-Merbach, H. (1971), *Operations Research. Methoden und Modelle der Optimalplanung*, Vahlen, München. ISBN: 9783800601271.
- Narain, R.; Yadav, R. C.; Sarkis, J. & Cordeiro, J. J. (2000), „The strategic implications of flexibility in manufacturing systems“, *International Journal of Agile Management Systems*, Vol. 2, Nr. 3, S. 202–213.

- Nationale Plattform Elektromobilität (2014), *Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung*. https://www.bmbf.de/files/NPE_Fortschrittsbericht_2014_barrierefrei.pdf [21 Januar 2019].
- Nickel, S.; Stein, O. & Waldmann, K. H. (2014), *Operations Research*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642543678.
- Niemann, J. & Westkämper, E. (2004), „Investitionskosten versus Betriebskosten“, *Wt Werkstattstechnik Online, Düsseldorf*, Nr. 3, S. 43–47.
- Nyhuis, P. (2010), *Wandlungsfähige Produktionssysteme*, GITO Verlag, Berlin. ISBN: 9783942183154.
- Olson, D. L. (2004), „Comparison of weights in TOPSIS models“, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 40, 7-8, S. 721–727.
- Oprićović, S. & Tzeng, G.-H. (2004), „Compromise solution by MCDM methods. A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS“, *European Journal of Operational Research*, Vol. 156, Nr. 2, S. 445–455.
- Ormećić, M.; Dai, J. G. & Vate, J. V. (2008), „Impulse control of Brownian motion. The constrained average cost case“, *Operations Research*, Vol. 56, Nr. 3, S. 618–629.
- Pachow-Frauenhofer, J. (2012), *Planung veränderungsfähiger Montagesysteme*, PZH Produktionstechnisches Zentrum, Garbsen. ISBN: 9783943104578.
- Papula, L. (2014), *Mathematische Formelsammlung*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 9783834823113.
- Paul, S. & Harms, P. J. (2004), „Variantenmanagement“, *Automotive Management–Strategie und Marketing in der Automobilindustrie, Berlin/Heidelberg*, S. 324–334.
- Peters, M. L. & Zelewski, S. (2007), „TOPSIS als Technik zur Effizienzanalyse“, *WiSt-Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, Vol. 36, Nr. 1, S. 9–15.
- Plötz, P.; Gnann, T.; Kühn, A. & Wietschel, M. (2013), „Markthochlaufszszenarien für elektrofahrzeuge“, *Study commissioned by the National Academy of Science and Engineering and Working Group*, Vol. 7.
- Prasch, M. (2010), *Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage*, Herbert Utz, München. ISBN: 9783831640331.
- Pröpster, M. (2016), *Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus*, Herbert Utz. ISBN: 9783831645473.

Pröpster, M. & Reinhart, G. (2013), „Dynamic Reaction to Fluctuations in Demand through Line Balancing in Commercial Vehicle Manufacturing“ in *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Proceedings of the 5th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2013)*, Hrsg. M. F. Zäh, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 177–182.

Rachamadugu, R. & Talbot, B. (1991), „Improving the equality of workload assignments in assembly lines“, *International Journal of Production Research*, Vol. 29, Nr. 3, S. 619–633.

Reeve, N. R. & Thomas, W. H. (1973), „Balancing stochastic assembly lines“, *AIIE Transactions*, Vol. 5, Nr. 3, S. 223–229.

Reeves, C. R. & Beasley, J. E. (1993), „Introduction“ in *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*, Hrsg. C. R. Reeves, Wiley, New York, S. 1–19.

REFA (1990), *Methodenlehre der Betriebsorganisation – Planung und Betrieb komplexer Produktionssysteme*, Carl Hanser, München. ISBN: 9783446159679.

REFA (1992), *Methodenlehre des Arbeitsstudiums*, Carl Hanser, München. ISBN: 9783446115903.

Reinhart, G. & Schneider, B. (1996), „Montage“ in *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*, Hrsg. W. Kern, Schäffer-Poeschel, Stuttgart, S. 1236–1247.

Reinhart, G. & Zäh, M. F. (2008), „Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der Montage“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Vol. 98, Nr. 9, S. 657.

Richter, M. (2012), „Gestaltung der Montageorganisation“ in *Montage in der industriellen Produktion*, Hrsg. H.-P. Wiendahl & B. Lotter, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 95–125.

Rogalski, S. (2009), *Entwicklung einer Methodik zur Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen. Messung von Mengen-, Mix- und Erweiterungsflexibilität zur Bewältigung von Planungsunsicherheiten in der Produktion*, Universitätsverlag, Karlsruhe. ISBN: 9783866443839.

Roscher, J. (2008), *Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie*. Dissertation, Universität Stuttgart.

- Rosenkranz, F. & Missler-Behr, M. (2005), *Unternehmensrisiken erkennen und managen. Einführung in die quantitative Planung*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540265139.
- Sauer, A. (2017), *Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge*, Shaker, Aachen. ISBN: 9783844049978.
- Schade, W.; Zanker, C.; Kühn, A. & Hettesheimer, T. (2014), *Sieben Herausforderungen für die deutsche Automobilindustrie. Strategische Antworten im Spannungsfeld von Globalisierung, Produkt- und Dienstleistungsinnovationen bis 2030*, Edition Sigma, Berlin. ISBN: 9783836081405.
- Schenk, M.; Wirth, S. & Müller, E. (2014), *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642054594.
- Schira, J. (2009), *Statistische Methoden der VWL und BWL. Theorie und Praxis*, Pearson Studium, München. ISBN: 9783868940206.
- Schneeweiß, C. & Söhner, V. (2013), *Kapazitätsplanung bei moderner Fließfertigung*, Physica-Verlag, Heidelberg. ISBN: 9783662121368.
- Schneider, H. M.; Buzacott, J. A. & Rücker, T. (2005), *Operative Produktionsplanung und -steuerung. Konzepte und Modelle des Informations- und Materialflusses in komplexen Fertigungssystemen*, De Gruyter, Berlin. ISBN: 9783486700312.
- Scholl, A. (1999), *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*, Physica-Verlag, Heidelberg. ISBN: 9783790811803.
- Scholl, A. (2001), *Robuste Planung und Optimierung – Grundlagen, Konzepte und Methoden, Experimentelle Untersuchungen*, Physica-Verlag, Heidelberg. ISBN: 9783790814088.
- Scholl, A. & Becker, C. (2006), „State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing“, *European Journal of Operational Research*, Vol. 168, Nr. 3, S. 666–693.
- Schuh, G.; Arnoscht, J.; Bohl, A.; Kupke, D.; Nußbaum, C.; Quick, J. & Vorspel-Rüter, M. (2011), „Assessment of the scale-scope dilemma in production systems. An integrative approach“, *Production engineering*, Vol. 5, Nr. 4, S. 341–350.

- Schuh, G.; Wemhöner, N. & Kampker, A. (2004), „Lebenszyklusbewertung flexibler Produktionssysteme. Kennzahlen und Verfahren für langfristig optimale Entscheidungen in einer dynamischen Umwelt“, *wt Werkstattstechnik online*, Vol. 4, Nr. 2004, S. 116–121.
- Schühle, F. (2014), *Die Marktdurchdringung der Elektromobilität in Deutschland. Eine Akzeptanz- und Absatzprognose*, Rainer Hampp, München. ISBN: 9783957100009.
- Schwenkert, R. & Stry, Y. (2015), *Operations Research kompakt*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662483978.
- Sesterhenn, M. (2003), *Bewertungssystematik zur Gestaltung struktur- und betriebsvariabler Produktionssysteme*, Shaker, Aachen. ISBN: 9783832210663.
- Sethi, A. K. & Sethi, S. P. (1990), „Flexibility in manufacturing. A survey“, *International journal of flexible manufacturing systems*, Vol. 2, Nr. 4, S. 289–328.
- Shih, H.-S.; Shyur, H.-J. & Lee, E. S. (2007), „An extension of TOPSIS for group decision making“, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 45, 7-8, S. 801–813.
- Solnon, C.; van Cung, D.; Nguyen, A. & Artigues, C. (2008), „The car sequencing problem. Overview of state-of-the-art methods and industrial case-study of the ROADEF'2005 challenge problem“, *European Journal of Operational Research*, Vol. 191, Nr. 3, S. 912–927.
- Spur, G. & Helwig, H. J. (1986), „Einführung in die Montagetechnik“ in *Handbuch der Fertigungstechnik. Fügen, Handhaben und Montieren*, Hrsg. G. Spur & T. Stöferle, Carl Hanser, München, S. 591–606.
- Statista (2018), *Prognose zur Entwicklung der Inflationsrate in Deutschland bis 2020*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5851/umfrage/prognose-zur-entwicklung-der-inflationsrate-in-deutschland/> [16 Oktober 2018].
- Steffen, R. (2013), *Produktionsplanung bei Fließbandfertigung*, Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783322879394.
- Stein, O. (2018), *Grundzüge der Nichtlinearen Optimierung*, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662555934.
- Stricker, N. (2016), *Robustheit verketteter Produktionssysteme. Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit*, Shaker, Aachen. ISBN: 9783844048018.

- Sumichrast, R. T. & Russell, R. S. (1990), „Evaluating mixed-model assembly line sequencing heuristics for just-in-time production systems“, *Journal of operations management*, Vol. 9, Nr. 3, S. 371–390.
- Swist, M. (2014), *Taktverlustprävention in der integrierten Produkt- und Prozessplanung*, Apprimus Wissenschaftsverlag, Aachen. ISBN: 9783863592271.
- Tahriri, F.; Zawiah Md Dawal, S. & Taha, Z. (2014), „Multiobjective Fuzzy Mixed Assembly Line Sequencing Optimization Model“, *Journal of Applied Mathematics*, Vol. 2014, Nr. 2, S. 1–19.
- Tang, J.; Wang, D. W.; Fung, R. Y. K. & Yung, K.-L. (2004), „Understanding of fuzzy optimization: theories and methods“, *Journal of Systems Science and Complexity*, Vol. 17, Nr. 1, S. 117–136.
- Tempelmeier, H. (2003), „Practical considerations in the optimization of flow production systems“, *International Journal of Production Research*, Vol. 41, Nr. 1, S. 149–170.
- The MathWorks (2018), *gamultiobj*. <https://de.mathworks.com/help/gads/gamultiobj.html#description> [31 März 2018].
- Thomopoulos, N. T. (1967), „Line balancing-sequencing for mixed-model assembly“, *Management Science*, Vol. 14, Nr. 2, B59-B75.
- Thomopoulos, N. T. (1970), „Mixed model line balancing with smoothed station assignments“, *Management Science*, Vol. 16, Nr. 9, S. 593–603.
- Tidd, J. (1997), „Key Characteristics of Assembly Automation Systems“ in *Transforming Automobile Assembly*, Hrsg. K. Shimokawa, U. Jürgens & T. Fujimoto, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 46–60.
- Tietze, J. (2014), *Einführung in die Finanzmathematik. Klassische Verfahren und neuere Entwicklungen; Effektivzins- und Renditeberechnung, Investitionsrechnung, Derivative Finanzinstrumente*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 9783658071561.
- Toni, A. de & Tonchia, S. (1998), „Manufacturing flexibility. A literature review“, *International Journal of Production Research*, Vol. 36, Nr. 6, S. 1587–1617.
- Tscheikner-Gratl, F.; Egger, P.; Rauch, W. & Kleidorfer, M. (2017), „Comparison of multi-criteria decision support methods for integrated rehabilitation prioritization“, *Water*, Vol. 9, Nr. 2, S. 68.

- van Basshuysen, R. (2015), *Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb. Wege zur klimaneutralen Mobilität*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 9783658071592.
- van Zante-de Fokkert, J. I. & Kok, T. G. d. (1997), „The mixed and multi model line balancing problem. A comparison“, *European Journal of Operational Research*, Vol. 100, Nr. 3, S. 399–412.
- VDI (1978), *Richtlinie 2815 - Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung. Blatt 1 - Einführung und Grundlagen.*, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- VDI (1990), *Richtlinie 2860 - Montage-und Handhabungstechnik*, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Velasquez, M. & Hester, P. T. (2013), „An analysis of multi-criteria decision making methods“, *International Journal of Operations Research*, Vol. 10, Nr. 2, S. 56–66.
- Volberda, H. W. (1996), „Toward the flexible form. How to remain vital in hypercompetitive environments“, *Organization science*, Vol. 7, Nr. 4, S. 359–374.
- Wang, W. & Koren, Y. (2012), „Scalability planning for reconfigurable manufacturing systems“, *Journal of manufacturing systems*, Vol. 31, Nr. 2, S. 83–91.
- Warnecke, H. J.; Löhr, H. G. & Kiener, W. (1975), *Montagetechnik. Schwerpunkt der Rationalisierung*, Krausskopf, Mainz. ISBN: 9783783000986.
- Warnecke, H.-J. (2013), *Der Produktionsbetrieb. Eine Industriebetriebslehre für Ingenieure*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662065419.
- Wedeniowski, S. (2015), *Mobilitätsrevolution in der Automobilindustrie*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662447833.
- Weicker, K. (2015), *Evolutionäre Algorithmen*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 9783658099589.
- Weiß, C. (2000), *Methodengestützte Planung und Analyse von Endmontagelinien in der Automobilindustrie*. Dissertation, Universität Karlsruhe.
- Westkämper, E. (2006), *Einführung in die Organisation der Produktion*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540307648.
- Westkämper, E., Bullinger, H.-J., Horváth, P. & Zahn, E. (Hrsg.) (2001), *Montageplanung — effizient und marktgerecht*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642564383.

- Westkämper, E. & Zahn, E. (2009), *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540218890.
- Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P. & Tilebein, M. (2000), „Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen: Ein Bezugsrahmen für die Unternehmensentwicklung im turbulenten Umfeld“, *wt Werkstattstechnik online*, Vol. 90, 1/2, S. 22–26.
- Weyand, L. (2010), *Risikoreduzierte Endmontageplanung am Beispiel der Automobilindustrie*. Dissertation, Universität des Saarlands.
- Wiendahl, H.-P. (2002), „Wandlungsfähigkeit – Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik“, *wt Werkstattstechnik online*, Vol. 92, Nr. 4, S. 122–127.
- Wiendahl, H.-P. (2014), *Betriebsorganisation für Ingenieure*, Carl Hanser, München. ISBN: 9783446441019.
- Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N. & Brieke, M. (2007), „Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation“, *CIRP Annals*, Vol. 56, Nr. 2, S. 783–809.
- Wiendahl, H.-P. & Heger, C. L. (2004), „Justifying changeability. A methodical approach to achieving cost effectiveness“, *Journal for Manufacturing Science and Production*, Vol. 6, 1-2, S. 33–40.
- Wiendahl, H.-P. & Hernández, R. (2002), „Fabrikplanung im Blickpunkt-Herausforderung Wandlungsfähigkeit“, *wt Werkstattstechnik online*, Vol. 92, Nr. 4, S. 133–138.
- Wiendahl, H.-P., Nyhuis, P., Fiebig, C. & Hernández, R. (Hrsg.) (2002), *The Transformable and Reconfigurable Factory. Strategies, Methods and Case Study*, ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition.
- Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J. & Nyhuis, P. (2014), *Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*, Carl Hanser, München. ISBN: 9783446437029.
- Wiesbeck, M. (2014), *Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung*, Herbert Utz, München. ISBN: 9783831643691.
- Wittek, K. (2013), *Standortübergreifende Programmplanung in flexiblen Produktionsnetzwerken der Automobilindustrie*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 9783658018382.

Yang, C.; Gao, J. & Sun, L. (2013), „A multi-objective genetic algorithm for mixed-model assembly line rebalancing“, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 65, Nr. 1, S. 109–116.

Zäh, M. F.; Möller, N. & Vogl, W. (2005), „Symbiosis of changeable and virtual production-the emperor's new clothes or key factor for future success“. *Proceedings (CD) of the international conference on changeable, agile, reconfigurable and virtual production, München*.

Zäh, M. F.; Müller, N.; Prasch, M. & Sudhoff, W. (2004), „Methodik zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Vol. 99, Nr. 4, S. 173–177.

Zanakis, S. H.; Solomon, A.; Wishart, N. & Dublisch, S. (1998), „Multi-attribute decision making. A simulation comparison of select methods“, *European Journal of Operational Research*, Vol. 107, Nr. 3, S. 507–529.

Zerres, C. & Hünerberg, R. (2011), „Preis-Promotions im Automobilhandel. Preiswissen und Informationsaufwand als Einflussfaktoren der Nutzenwahrnehmung“, *der markt*, Vol. 50, Nr. 2, S. 109–120.

Zimmermann, H.-J. & Gutsche, L. (Hrsg.) (1991), *Multi-Criteria Analyse. Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642581984.

Zimmermann, W. & Stache, U. (2001), *Operations-Research. Quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung*, Oldenbourg, München, Wien. ISBN: 9783486258165.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Organisationsformen der Montage (in Anlehnung an Spur & Helwig (1986) und Milberg, Reinhart & Spath (1999))	7
Abbildung 2.2: Klassifikation von Fließmontagelinien (in Anlehnung an Scholl (1999) und Boysen (2005))	9
Abbildung 2.3: Exemplarischer Prozess der Automobilmontage (in Anlehnung an Roscher)	11
Abbildung 2.4: Planungssystem der Variantenfließfertigung (in Anlehnung an Boysen (2005))	12
Abbildung 2.5: Beispielhafter Montagevorranggraph (in Anlehnung an Scholl (1999) und Wiesbeck (2014))	15
Abbildung 2.6: Ansätze zur Auslegung der repräsentativen Bearbeitungszeit bei der Bildung von Mischgraphen (in Anlehnung an Pröpster (2016) und Altemeier (2009))	17
Abbildung 2.7: Einfluss von Schwankungen im Variantenmix auf die Auslastung von Montagestationen (in Anlehnung an Pröpster (2016) und Pröpster & Reinhart (2013))	17
Abbildung 2.8: Abgrenzung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit (in Anlehnung an Wiendahl, Reichardt & Nyhuis (2014); Nyhuis (2010) und Zäh, Möller & Vogl (2005))	22
Abbildung 2.9: Schematische Klassifikation der MCDA-Methoden (in Anlehnung an Zimmermann & Gutsche (1991) und Geldermann & Lerche (2014))	28
Abbildung 2.10: Klassifikation von Optimierungsmodellen (in Anlehnung an Domschke et al. (2015))	29

Abbildung 2.11: MILP-Lösungsverfahren mit Beispielen (in Anlehnung an Kallrath (2013) und Domschke et al. (2015))	31
Abbildung 2.12: Arten des SALBP (in Anlehnung an Boysen (2005))	33
Abbildung 3.1: Übersicht bestehender Ansätze zur Gestaltung veränderungsfähiger Fließbandabstimmungen	46
Abbildung 4.1: Übersicht des Lösungsansatzes	51
Abbildung 5.1: Übersicht der Struktur des Fließmontagesystems	57
Abbildung 5.2: Systematischer und unsystematischer Teil des Montagerisikos	59
Abbildung 5.3: Exemplarische Dichtefunktionen normalverteilter Variantenmixanteile	63
Abbildung 5.4: Algorithmus zur szenariospezifischen Anpassung der Bearbeitungszeit von Arbeitsvorgängen (in Anlehnung an Fisel et al. (2018))	64
Abbildung 5.5: Modulare Systematik der Kosten eines Wandlungsvorgangs	70
Abbildung 5.6: Prinzip der Umcodierung von Entscheidungsvariablen	91
Abbildung 5.7: Übersicht des Bewertungsmoduls	94
Abbildung 5.8: Ansatz zur Kostenbewertung von Überlastkompensation	94
Abbildung 5.9: Vorgehensmodell zur Bestimmung von Überlast (in Anlehnung an A_Heinzelmann (2018))	96
Abbildung 5.10: Übersicht möglicher Ausprägungen von Driftbereichen (in Anlehnung an A_Heinzelmann (2018))	97
Abbildung 5.11: Reduktion des Untersuchungsraums am Beispiel von $DC = 3$ Antriebskonzepten für den Betriebspunkt $sh1 = 30\%$, $sh2 = 20\%$, $sh3 = 50\%$	106
Abbildung 5.12: Konzept zur Identifikation der zu prüfenden Variantenverhältnisse	107
Abbildung 5.13: Kennzahlen der Robustheit und Lage	110

Abbildung 6.1: Karosserieansprachepunkte zur Verrichtung von Arbeitsvorgängen	116
Abbildung 6.2: Klasse der Arbeitsvorgänge	118
Abbildung 6.3: Klasse der Betriebsmittel	119
Abbildung 6.4: Dichtefunktionen der Antriebskonzepte je Szenario	121
Abbildung 6.5: Szenariobaum des Planungsproblems	122
Abbildung 6.6: Abweichungen der robusten szenariospezifischen Bearbeitungszeiten zur Referenz „Focus ICE“	123
Abbildung 6.7: Punktwolke der Lösungsbündel des multikriteriellen Optimierungsproblems und exemplarische Detailansicht des Lösungsbündels 96	127
Abbildung 6.8: Übersicht der Fließbandabstimmungen des Lösungsbündels 96	128
Abbildung 6.9: Kostenfaktoren der Wandlungskosten ohne Betriebskosten	130
Abbildung 6.10: Übersicht der Wandlungsobjektkosten und direkten Wandlungskosten	131
Abbildung 6.11: Durchschnittliche Bearbeitungszeit von Produktionsaufträgen nach Szenarien	133
Abbildung 6.12: Aufsteigend sortierte Kosten der Überlastkompensation des Szenarios s_0 für Planungsperiode p_0	134
Abbildung 6.13: Ermittelte Werte der Flexibilitätskennzahl auf Basis der Zielfunktionswerte für Flexibilität	135
Abbildung 6.14: Flexibilitätskennzahl in Abhängigkeit der Arbeitsplätze	136
Abbildung 6.15: Aufsteigend sortierte Kosten der Überlastkompensation anteilig gewichteter Szenarien s_0 bis s_3 für die Planungsperioden p_1 und p_0	138
Abbildung 6.16: Punktwolke der Lösungsbündel <i>solev</i>	140
Abbildung 6.17: Szenariospezifische Fließbandabstimmungen des Lösungsbündels <i>solev</i> , 47	141

Abbildung 6.18: Ermittlung der FKZ des Lösungsbündels <i>solev</i> , 47	142
Abbildung 6.19: Bewertung der Wandlungsfähigkeit anhand der Wandlungs- und Betriebskosten für <i>solev</i> , 47	143
Abbildung 6.20: Konfigurationsansicht des genetischen Algorithmus zur Fließbandabstimmung	144
Abbildung A.1: Klassen der Veränderungsfähigkeit (in Anlehnung an Wiendahl 2002; Wiendahl et al. 2007)	XLVII
Abbildung A.2: Algorithmus zur Bestimmung zufälliger Produktionsprogramme unter Berücksichtigung von Verbauquoten	XLIX
Abbildung A.3: Algorithmus zur Berechnung arbeitsplatz- und optionsspezifischer Bearbeitungszeiten (in Anlehnung an A_Heinzelmann (2018))	L
Abbildung A.4: Algorithmus zur Berechnung fließbandabstimmungsspezifischer Driftbereiche (in Anlehnung an A_Heinzelmann (2018))	LI
Abbildung A.5: Exemplarische Ausprägung von Ideal- und Nadirpunkt für zwei Zielkriterien (in Anlehnung an Arora & Kaushik (2015))	LIV
Abbildung A.6: Übersicht der Variantenintegrationsstrategien (in Anlehnung an Kampker (2012))	LVII
Abbildung A.7: Rangfolge der Zielkriterien	LXIX
Abbildung A.8: Wandlungskosten für den Wandel zu s_1 der Lösungsbündel 1 bis 32	LXX
Abbildung A.9: Wandlungskosten für den Wandel zu s_1 der Lösungsbündel 33 bis 79	LXXI
Abbildung A.10: Wandlungskosten für den Wandel zu s_1 der Lösungsbündel 80 bis 116 und der auf der Referenzlösung basierenden Lösungsbündel	LXXII
Abbildung A.11: Wandlungskosten für den Wandel zu s_2 der Lösungsbündel 1 bis 46	LXXIII
Abbildung A.12: Wandlungskosten für den Wandel zu s_2 der Lösungsbündel 47 bis 92	LXXIV

Abbildung A.13: Wandlungskosten für den Wandel zu s_2 der Lösungsbündel 93 bis 116 und der auf der Referenzlösung basierenden Lösungsbündel	LXXV
Abbildung A.14: Wandlungskosten für den Wandel zu s_3 der Lösungsbündel 1 bis 46	LXXVI
Abbildung A.15: Wandlungskosten für den Wandel zu s_3 der Lösungsbündel 47 bis 92	LXXVII
Abbildung A.16: Wandlungskosten für den Wandel zu s_3 der Lösungsbündel 93 bis 116 und der auf der Referenzlösung basierenden Lösungsbündel	LXXVIII
Abbildung A.17: Übersicht der Lösungsbündel 1 bis 35	LXXIX
Abbildung A.18: Übersicht der Lösungsbündel 36 bis 100	LXXX
Abbildung A.19: Übersicht der Lösungsbündel 101 bis 116 und der auf der Referenzlösung basierenden Lösungsbündel	LXXXI
Abbildung A.20: Übersicht des auf Rang 1 platzierten Lösungsbündels <i>solev, 47</i>	LXXXII
Abbildung A.21: Übersicht des auf Rang 2 platzierten Lösungsbündels <i>solev, 52</i>	LXXXIII
Abbildung A.22: Übersicht des auf Rang 3 platzierten Lösungsbündels <i>solev, 50</i>	LXXXIV
Abbildung A.23: Übersicht des auf Rang 4 platzierten Lösungsbündels <i>solev, 12</i>	LXXXV
Abbildung A.24: Übersicht des auf Rang 5 platzierten Lösungsbündels <i>solev, 11</i>	LXXXVI
Abbildung A.25: Übersicht des auf Rang 6 platzierten Lösungsbündels <i>solev, 64</i>	LXXXVII
Abbildung A.26: Übersicht des auf Rang 7 platzierten Lösungsbündels <i>solev, 73</i>	LXXXVIII
Abbildung A.27: Übersicht des auf Rang 8 platzierten Lösungsbündels <i>solev, 82</i>	LXXXIX
Abbildung A.28: Übersicht des auf Rang 9 platzierten Lösungsbündels <i>solev, 49</i>	XC

Abbildung A.29: Übersicht des auf Rang 10 platzierten Lösungsbündels <i>solev</i> , 112	XCI
Abbildung A.30: Übersicht des auf Rang 29 platzierten und auf der Referenzlösung basierenden Lösungsbündels	XCII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1: Wandlungsobjektkosten der Investition	71
Tabelle 5.2: Wandlungsobjektkosten der Desinvestition	72
Tabelle 5.3: Direkte Wandlungsprozesskosten der Integration	73
Tabelle 5.4: Direkte Wandlungsprozesskosten der Desintegration	73
Tabelle 5.5: Direkte Wandlungsprozesskosten des Transports	74
Tabelle 5.6: Direkte Wandlungsprozesskosten der Planung	74
Tabelle 5.7: Indirekte Wandlungsprozesskosten der entgangenen Erlöse	75
Tabelle 5.8: Alternative Zuordnungen eines geeigneten Betriebsmittels	76
Tabelle 5.9: Anzahl zu prüfender Betriebspunkte für ausgewählte Probleminstanzen	106
Tabelle 5.10: Anzahl der reduzierten zu prüfenden Betriebspunkte ausgewählter Probleminstanzen	108
Tabelle 5.11: Parameter der Zielkriterien des Auswahlproblems	113
Tabelle 6.1: Notation der verwendeten Dateitypen (Balzert 2011)	116
Tabelle 6.2: Konstanten zur Definition des Fließmontagesystems	117
Tabelle 6.3: Übersicht verfügbarer Betriebsmittel	119
Tabelle 6.4: Übersicht der Planungsszenarien	121
Tabelle 6.5: Übersicht der Kosten für Montagestationen und Arbeitsplätze	124
Tabelle 6.6: Übersicht der Wandlungsobjektkosten	125
Tabelle 6.7: Personalkosten für Planungstätigkeiten	125
Tabelle 6.8: Übersicht der direkten Wandlungskosten	126
Tabelle 6.9: Übersicht der indirekten Wandlungskosten	126

Tabelle 6.10: Vergleich des Algorithmus und der Referenzlösung für das Szenario s_0	129
Tabelle 6.11: Übersicht der Entscheidungsgewichte	138
Tabelle 6.12: Übersicht der nicht normierten Ausprägungen von Ideal- und Nadirpunkt	139
Tabelle 6.13: Ausprägungen der Zielkriterien für die zehn ranghöchsten Entscheidungsalternativen	139
Tabelle A.1: Übersicht der Arbeitsvorgänge	LVIII
Tabelle A.2: Vorrangrestriktion der Arbeitsvorgänge	LXI
Tabelle A.3: Übersicht der arbeitsvorgangsspezifischen Karosserieansprache	LXII
Tabelle A.4: Übersicht optionaler Ausstattungspakete	LXIV
Tabelle A.5: Übersicht optionaler Ausstattungsmerkmale	LXV
Tabelle A.6: Übersicht der robusten Bearbeitungszeiten je Szenario in Sekunden	LXVI

Anhang

A.1 Klassen der Veränderungsfähigkeit

Die Veränderungsfähigkeit kann nach Wiendahl (2002) in fünf hierarchisch gegliederte Klassen eingeteilt werden. Abbildung A.1 zeigt die diese Einteilung, die anhand der Dimensionen Produktionssystemebene und Marktleistungsebene vorgenommen wird.

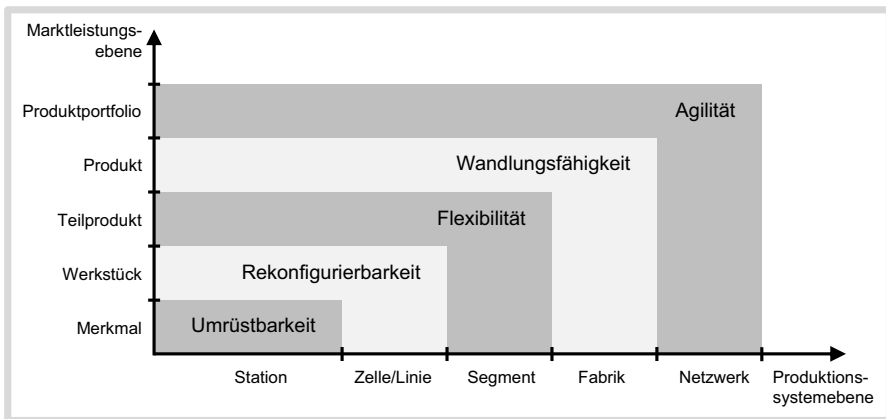


Abbildung A.1: Klassen der Veränderungsfähigkeit (in Anlehnung an Wiendahl 2002; Wiendahl et al. 2007)

Jeder Begriff schließt dabei alle ihm untergeordneten Begriffe ein. Die unterste Produktionssystemebene wird als Station bezeichnet und besteht meist aus einem Mitarbeiter und einer Maschine. Auf dieser Ebene bezeichnet die *Umrüstbarkeit* eine schnelle und aufwandsminimale Anpassung des Arbeitsplatzes oder der einer einzelnen Maschine an eine andere durchzuführende Operation. Die Zelle oder Linie als nächste Ebene entspricht Fertigungs- und Montagegruppen, in denen durch mehrere Operationen Werkstücke hergestellt werden. Die Fähigkeit einer Zelle oder Linie sich mit geringem Aufwand in kurzer Zeit auf unterschiedliche Werkstücke umstellen zu können wird als *Rekonfigurierbarkeit* bezeichnet. Durch Zusammenfassen mehrerer Zellen oder Linien

entstehen Segmente, in denen Teilprodukte hergestellt werden. Die aufwandsarme Umstellung der zu produzierenden Komponenten wird als *Flexibilität* bezeichnet. Mehrere Segmente können wiederum zur Ebene einer Fabrik zusammengefasst werden. Hier beschreibt *Wandlungsfähigkeit* die Befähigung zur Umstellung auf Ebene der Produkte, wobei die Produktfamilien jedoch meist Ähnlichkeit aufweisen. Hinsichtlich der Betrachtung ganzer Produktionsnetzwerke und der Veränderung auf Ebene von Produktportfolios benennen Wiendahl et al. (2007) die *Agilität* als höchste Stufe der Veränderungsfähigkeit. Diese beschreibt die Fähigkeit neue Märkte zu erschließen oder auch Produktionskapazitäten im Netzwerk aufzubauen. (Wiendahl 2002; Wiendahl et al. 2007; Wiendahl et al.)

A.2 Algorithmisches Vorgehen zur Bestimmung zufälliger Produktionsprogramme

Die Zielstellung des Algorithmus ist die Erzeugung eines Produktionsprogramms bestehend aus zufälligen Varianten eines Produkts wobei eine Variante durch ein Antriebskonzept sowie eine Kombination von Sonderausstattungen definiert ist. Eine Anforderung an den Algorithmus ist es dabei vorgegebene Verbauquoten von Antriebskonzepten und Sonderausstattungen abzubilden. Im ersten Teil des Algorithmus erfolgt die Erzeugung einer Variante mit zufälligem Antriebskonzept und zufälligen Sonderausstattungen. Die so erzeugten Varianten werden bei Überschreiten der festgelegten Verbauquoten als ungültig deklariert, infolgedessen eine neue Variante erzeugt wird. Ist die maximale Anzahl an Aufträgen im Produktionsprogramm erreicht, gilt es sicherzustellen, dass die Verbauquoten ebenso nicht unterschritten sind. Wird dies festgestellt, so wird die betreffende Sonderausstattung so lange zufälligen Varianten hinzugefügt, bzw. das Antriebskonzept neu zugewiesen, bis die jeweilige Verbauquote erreicht ist. Dieses Vorgehen ist vereinfacht in Abbildung A.2 durch Pseudo-Code dargestellt.

```
initialize all parameters
while (orders < orders_max)
    generate random variant
    for (all drive concepts and optional equipment)
        if (share > share_max) then continue with next while iteration
    next
    save generated order
    orders++
loop
for (all drive concepts and optional equipment)
    while (share != share_max)
        add optional equipment to random variant / change drive concept
        share++
    loop
next
```

Abbildung A.2: Algorithmus zur Bestimmung zufälliger Produktionsprogramme unter Berücksichtigung von Verbauquoten

A.3 Algorithmisches Vorgehen zur Berechnung arbeitsplatz- und optionsspezifischer Bearbeitungszeiten

Der in Abbildung A.3 als Pseudo-Code dargestellte Algorithmus dient in Anlehnung an die vom Autor angeleitete studentische Arbeit A_Heinzelmann (2018) zur Berechnung der Bearbeitungszeit t aller Kombinationen von Antriebskonzepten und Ausstattungsoptionen. Eine Variante im Sinn des Algorithmus besteht aus einem Antriebskonzept sowie einer beliebigen Anzahl an Ausstattungsoptionen.

```
initialize all parameters
while (combination i ≤ combination_max)
  get drive concept and optional equipment
  for (all variants of drive concept)
    for (all assembly stations)
      for (amount of workplaces per assembly station)
        for (all allocated assembly tasks)
          get assembly time based on drive concept
          create all valid combinations if optional equipment
          for (all optional equipment combinations)
            ti= assembly time of drive concept + equipment
            i++
          next
        next
      next
    next
  next
  drive concept ++
loop
```

Abbildung A.3: Algorithmus zur Berechnung arbeitsplatz- und optionsspezifischer Bearbeitungszeiten (in Anlehnung an A_Heinzelmann (2018))

A.4 Algorithmisches Vorgehen zur Berechnung fließbandabstimmungsspezifischer Driftbereiche

Der in Abbildung A.4 als Pseudo-Code dargestellte Algorithmus dient in Anlehnung an die vom Autor angeleitete studentische Arbeit A_Heinzelmann (2018) zur Bestimmung des Driftbereichs $t_{dr,j,k}$ des Arbeitsplatzes j an der rechten Stationsgrenze von Montagestation k und der linken Stationsgrenze von $k + 1$.

```

initialize all parameters
while (not all workplaces at all assembly stations run through)
  for (all assembly stations)
    if (last assembly station) then
      for (all workplaces)
         $t_{dr,j,k} = 0$ 
      next
    end
    for (all workplaces)
      if (workplace empty) then
        if (workplace at next station able to drift) then
           $t_{dr,j,k} = C/2$ 
        else
           $t_{dr,j,k} = 0$ 
        end
      next workplace
    end
    get last assembly task of workplace  $avo_{last}$ 
    if ( $avo_{last}$  not able to drift) then
       $t_{dr,j,k} = 0$ 
    else
      get first task of workplace at next station  $avo_{first}$ 
      if ( $avo_{first}$  not able to drift) then
         $t_{dr,j,k} = 0$ 
      else
        if ( $\max \text{Drift}(avo_{last}) \leq \max \text{Drift}(avo_{first})$ ) then
           $t_{dr,j,k} = \max \text{Drift}(avo_{last})$ 
        else
           $t_{dr,j,k} = \max \text{Drift}(avo_{first})$ 
        end
      end
    end
  next
next
loop

```

Abbildung A.4: Algorithmus zur Berechnung fließbandabstimmungsspezifischer Driftbereiche (in Anlehnung an A_Heinzelmann (2018))

A.5 TOPSIS

TOPSIS stellt ein Werkzeug zur Bewertung der relativen Effizienz von Entscheidungsalternativen dar. Die Anwendung der Methodik erfolgt nach Olson (2004) in fünf Schritten. In einem ersten Schritt gilt es die Zielkriterien festzulegen und die Ausprägungen dieser Kriterien hinsichtlich der Auswahlalternativen zu erheben. Im zweiten Schritt sind die Gewichtungen der Zielkriterien durch den Entscheider festzulegen. Nachfolgend ist ein Bezugssystem der Lösungen durch die theoretisch beste und schlechteste Alternative zu bestimmen. Um die Vergleichbarkeit von Alternativen in diesem Bezugssystem zu ermöglichen, wird eine Distanzmetrik entwickelt. Durch die sukzessive Bestimmung der Distanzen aller Alternativen zu den theoretisch besten und schlechtesten Alternativen wird abschließend eine Rangfolge der Alternativen erstellt. (Olson 2004)

(1) Zielkriterien

Die Bewertung erfolgt auf Basis der Auswahl und Evaluation α geeigneter Entscheidungsalternativen EA_α , welche durch die Ausprägungen von β Zielkriterien $r_{\alpha\kappa}$ beschrieben werden. Diese können grundsätzlich in Kostenkriterien und Nutzenkriterien unterschieden werden. Hinsichtlich der Kostenkriterien entspricht der minimale (maximale) Wert der besten (schlechtesten) Kriterienausprägung, wohingegen der minimale (maximale) Wert eines Nutzenkriteriums der schlechtesten (besten) Kriterienausprägung entspricht. (Peters & Zelewski 2007) Die Struktur des Auswahlproblems kann durch die in Formel A.1 dargestellte Entscheidungsmatrix ED beschrieben werden (Shih, Shyr & Lee 2007).

$$ED = \begin{matrix} EA_1 \\ EA_2 \\ \vdots \\ EA_t \\ \vdots \\ EA_\alpha \end{matrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1\kappa} & \cdots & r_{1\beta} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2\kappa} & \cdots & r_{2\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{t1} & r_{t2} & \cdots & r_{t\kappa} & \cdots & r_{t\beta} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{\alpha 1} & r_{\alpha 2} & \cdots & r_{\alpha\kappa} & \cdots & r_{\alpha\beta} \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Um die Vergleichbarkeit der Zielkriterien zu erhöhen, erfolgt eine Normierung der Kriterienausprägungen. Eine Normierung dient der Etablierung eines Bezugssystems zur Einordnung und Vergleichbarkeit von Ergebnissen (Laux, Gillenkirch & Schenk-Mathes 2014). Üblicherweise wird hierzu im Rahmen der Anwendung des TOPSIS-Verfahrens die euklidische Norm verwendet (Zanakis et al. 1998), wobei anzumerken ist, dass Milani et al. (2005) die Verwendung alternativer Normen diskutieren. Da deren Anwendung jedoch weitestgehend keinen Einfluss auf die Gestaltung der Rangfolge aufweist,

wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die euklidische Norm verwendet (siehe Formel A.2). Damit ergeben sich die normierten Ausprägungen der Zielkriterien $n_{i\kappa}$ zu:

$$n_{i\kappa} = \frac{r_{i\kappa}}{\sqrt{\sum_{l=1}^{\alpha} r_{il}^2}} \quad (\text{A.2})$$

(2) Gewichtung

Abseits der Ausprägungen der Zielkriterien wirkt sich auch deren Gewichtung auf die Entscheidungsfindung aus. Hierbei gilt es den Entscheidungsträger zu involvieren, da die Festlegung der Gewichte w_{κ} subjektiven Einflüssen unterliegt (Olson 2004), wobei deren Bestimmung auf paarweisen Vergleichen beruht (Geldermann & Lerche 2014). Liegen die Gewichte vor, so kann die normalisierte, gewichtete Entscheidungsmatrix ND erzeugt werden (Milani et al. 2005). Diese ist in Formel A.3 dargestellt.

$$ND = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} & \cdots & n_{1\kappa} \\ n_{21} & n_{22} & \cdots & n_{2\kappa} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{i1} & n_{i2} & \cdots & n_{i\kappa} \end{pmatrix} * \text{diag}(w_1, w_2, \dots, w_{\kappa}) \quad (\text{A.3})$$

(3) Bezugssystem der Lösungen

Nachfolgend gilt es den Idealpunkt ϑ^+ als Repräsentation der idealen Alternative (siehe Formel A.4) sowie den Nadirpunkt ϑ^- als Vereinigung der schlechtesten Ausprägungen der Zielkriterien (siehe Formel A.5) zu bestimmen. Dabei stellt K^{ZN} die Menge der Zielkriterien des Nutzens und K^{ZK} die Menge der Zielkriterien der Kosten dar. Die hierdurch repräsentierten Alternativen sind in der Regel fiktiv und dienen als Referenzpunkte der Entscheidungsalternativen. Es gilt (Milani et al. 2005):

$$\begin{aligned} \vartheta^+ &= \{ND_1^+, \dots, ND_{\beta}^+\} \\ &= \left\{ \left(\max_{\kappa \in K^{ZN}} ND_{i\kappa} \mid \kappa \in K^{ZN} \right), \left(\min_{\kappa \in K^{ZK}} ND_{i\kappa} \mid \kappa \in K^{ZK} \right) \right\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, \alpha \quad (\text{A.4}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vartheta^- &= \{ND_1^-, \dots, ND_{\beta}^-\} \\ &= \left\{ \left(\min_{\kappa \in K^{ZN}} ND_{i\kappa} \mid \kappa \in K^{ZN} \right), \left(\max_{\kappa \in K^{ZK}} ND_{i\kappa} \mid \kappa \in K^{ZK} \right) \right\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, \alpha \quad (\text{A.5}) \end{aligned}$$

Abbildung A.5 veranschaulicht exemplarische den Ideal- und Nadirpunkt für ein auf zwei Zielkriterien basierendem Entscheidungsproblem. Im gewählten Beispiel gilt für beide Zielkriterien, dass die jeweils maximale Kriteriumsausprägung als bester Wert interpretiert wird.

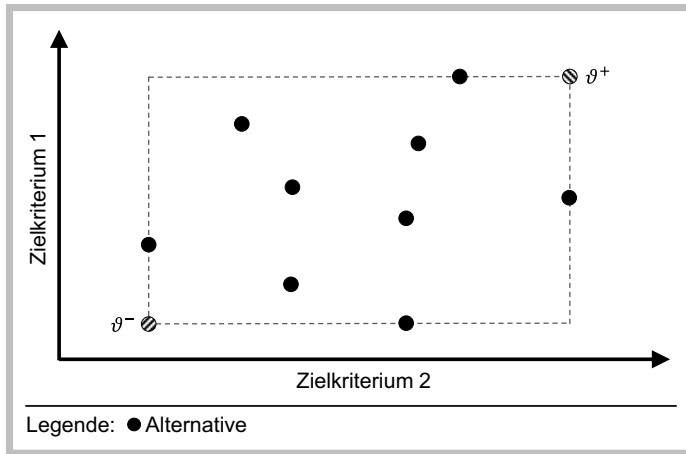


Abbildung A.5: Exemplarische Ausprägung von Ideal- und Nadirpunkt für zwei Zielkriterien (in Anlehnung an Arora & Kaushik (2015))

(4) Distanzmaß

Die Bewertung der Alternativen erfolgt auf Basis ihrer Distanzen zum Ideal- und Nadirpunkt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird zur Bestimmung der Distanzen jeweils das für TOPSIS typische euklidische Distanzmaß verwendet (Olson 2004). Für die Distanz einer Alternative zum Idealpunkt d_i^+ (siehe Formel A.6) sowie zum Nadirpunkt d_i^- , $i = 1, 2, \dots, \alpha$ (siehe Formel A.7) gilt (Shih, Shyr & Lee 2007):

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{\kappa=1}^{\beta} (ND_{i\kappa} - ND_{\kappa}^+)^2} \quad \forall i = 1, 2, \dots, \alpha \quad (\text{A.6})$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{\kappa=1}^{\beta} (ND_{i\kappa} - ND_{\kappa}^-)^2} \quad \forall i = 1, 2, \dots, \alpha \quad (\text{A.7})$$

(5) Rangfolge

Um die Vergleichbarkeit der Alternativen herzustellen, werden nachfolgend die Distanzen d_i^+ und d_i^- zur Kennzahl der relativen Nähe rc_i vereinigt (siehe Formel A.8), wobei gilt $0 \leq rc_i \leq 1$. Die relative Nähe wird wie folgt bestimmt (Opricovic & Tzeng 2004):

$$rc_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad \forall i = 1, 2, \dots, \alpha \quad (\text{A.8})$$

Die Präferenzordnung der Auswahlentscheidung kann abschließend durch Sortieren der Alternativen nach der relativen Nähe bestimmt werden. Die Alternative der höchsten relativen Nähe stellt dabei die präferierte Alternative der Auswahlentscheidung dar.

A.6 Variantenintegrationsstrategien der Automobilendmontage

Da die Montage kleiner Stückzahlen auf dedizierten Linien als kaum rentabel betrachtet wird, strebt eine Vielzahl von Automobilherstellern eine Integration neuer Varianten in bestehende Montagelinien an (Kampker et al. 2012). Die Wahl einer geeigneten Integrationsstrategie ist maßgeblich vom Differenzierungsgrad der Fahrzeuge abhängig (Kampker 2012). Daher werden zunächst mit dem Conversion Design und dem Purpose Design zwei Entwicklungsansätze von Fahrzeugstrukturen beschrieben. Das Conversion Design beschreibt den Ansatz, neue Komponenten in bestehende Fahrzeugstrukturen zu integrieren. Dem entgegen steht das Purpose Design, das die Neuentwicklung eines Fahrzeuges bezeichnet, dessen Design auf die Anforderungen eines alternativen Antriebsstrangs abgestimmt ist (Schade et al. 2014). Ein Beispiel für die Anwendung des Conversion Designs stellt die Elektrifizierung des Antriebsstranges der B-Klasse des Herstellers Mercedes-Benz dar. Aufgrund der als Sandwich-Boden bezeichneten Struktur, die bei Bedarf im Fond verbaut wird, besteht hier eine vergleichsweise einfache Integrationsmöglichkeit der Traktionsbatterie. Als Beispiel einer Anwendung des Purpose Designs kann der BMW i3 angeführt werden, der eine Neuentwicklung und somit im Rahmen der beschriebenen Klassifizierung weder eine Fahrzeugvariante noch ein Derivat darstellt (A_Arndt 2016). Die Wahl eines Conversion oder Purpose Designs wirkt sich auf das Integrationspotential der Variante aus. Aufgrund der unveränderten Karosseriestruktur im Rahmen der Anwendung eines Conversion Designs, ergibt sich ein hohes Potential zur Weiterverwendung bestehender Montagestrukturen, Betriebsmitteln und Prozessen. Die Nutzung des Purpose Design-Ansatzes geht häufig mit der Nutzung neuer Technologien und Prozessen einher, so dass ein hoher Fokus auf die Entwicklung des Montageprozesses zu legen ist (Kampker 2012). Wie in Abbildung A.6 dargestellt, können hinsichtlich der Variantenintegration in der Automobilindustrie drei Strategien unterschieden werden: Vollintegration, Bypass-Produktion, sowie parallele Produktion. Die Vollintegration beschreibt eine Strategie in der keine zusätzlichen Stationen zur Bewältigung der bisherigen sowie zusätzlichen Arbeitsumfänge im Rahmen der Variantenintegration erforderlich sind (Danner 2017). Da bestehende Montagelinien nur über ein begrenztes Anpassungspotential verfügen (Kampker et al. 2011), eignet sich die Vollintegration unter Vorliegen eines geringen Differenzierungsgrades der Varianten. Die Bypass-Produktion ermöglicht die partiell

parallele Durchführung von Montageumfängen durch eine Entkopplung des Montageflusses in Form von Bypässen oder Vormontagen. Diese Strategie birgt dann Vorteile, wenn vereinzelt Abweichungen im Differenzierungsgrad zu integrieren sind (Kampker 2012). Überschreitet der Differenzierungsgrad jedoch den ökonomisch sinnvollen Rahmen der Bypass-Produktion, so empfiehlt sich die parallele Produktion der Varianten (Kampker 2014). Die unveränderte Karosseriestruktur im Rahmen der Anwendung des Conversion Designs weist auf einen geringen Differenzierungsgrad hin, wodurch die Vollintegration und die Bypass-Produktion attraktive Optionen darstellen. Im Gegensatz hierzu kann aufgrund der Neuentwicklung der Karosseriestruktur beim Purpose Design von weitläufigeren Veränderungen im Montageprozess ausgegangen werden, so dass eine Bypass- oder parallele Produktion als sinnvolle Alternativen betrachtet werden können (Kampker 2012).

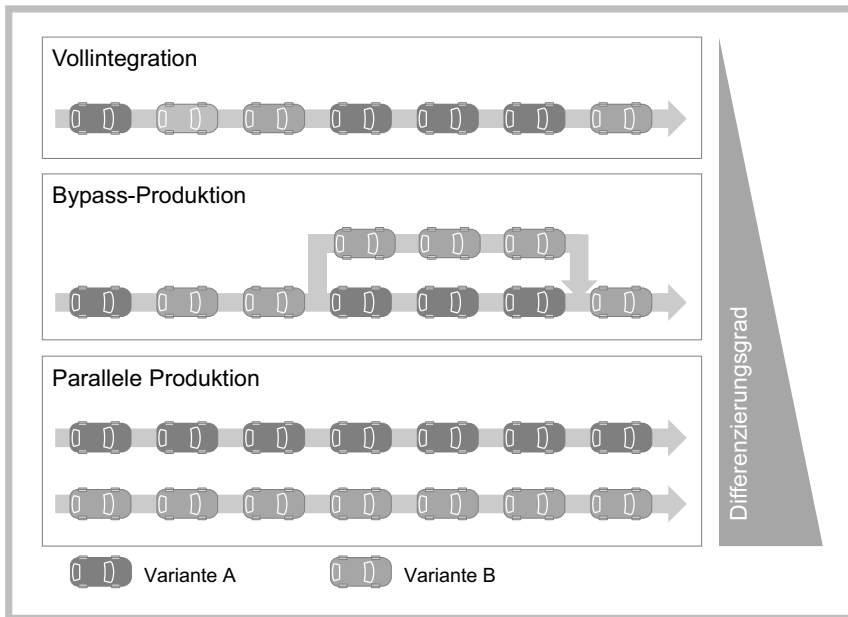


Abbildung A.6: Übersicht der Variantenintegrationsstrategien (in Anlehnung an Kampker (2012))

A.7 Übersicht der Arbeitsvorgänge

Tabelle A.1 stellt eine Übersicht der Arbeitsvorgänge dar, die durch die Optimierung der Fließbandabstimmung in eine lineare Abfolge zu bringen sind. Weiterhin sind die Bearbeitungszeiten der Varianten Verbrennungsmotor (t_{ICE}), batterieelektrischer Antrieb (t_{BEV}) und bivalenter Erdgasmotor (t_{bNGV}) aufgeführt.

Tabelle A.1: Übersicht der Arbeitsvorgänge

Nummer	Bezeichnung	t_{ICE} [s]	t_{BEV} [s]	t_{bNGV} [s]
AVO 1	Tür abschlagen links	74,99	70,99	74,99
AVO 2	Warenkorb	43,14	43,76	45,50
AVO 3	Abdämpfung 1	99,67	79,30	99,67
AVO 4	Abdämpfung 2	100,89	79,65	100,89
AVO 5	Lager 1	71,74	83,61	71,74
AVO 6	Tür abschlagen rechts	91,09	99,35	91,09
AVO 7	Pedalanlage 1	105,72	105,72	105,72
AVO 8	Pedalanlage 2	81,36	71,35	81,36
AVO 9	Pedalanlage 3	14,24	14,24	14,24
AVO 10	Gerätekasten	23,88	23,88	23,88
AVO 11	Leitungssatz 1	81,22	83,03	81,22
AVO 12	Pedalanlage 4	5,36	5,36	5,36
AVO 13	Wischermotor	26,19	26,19	26,19
AVO 14	Standheizung	10,00	10,00	10,00
AVO 15	Pedalanlage 5	40,69	40,69	40,69
AVO 16	Abdämpfung 3	46,16	21,09	46,16
AVO 17	Cockpit 1	24,76	24,76	24,76
AVO 18	Cockpit 2	8,60	8,60	8,60
AVO 19	Abdämpfung 4	8,84	8,84	8,84
AVO 20	Setkiste 1	8,84	8,84	8,84
AVO 21	Abdämpfung 5	38,08	36,38	38,08
AVO 22	Abdämpfung 6	6,48	6,48	6,48
AVO 23	Leuchten 1	10,00	10,00	10,00
AVO 24	Abdämpfung 7	14,07	10,00	14,07
AVO 25	Abdämpfung 8	10,00	11,19	10,00
AVO 26	Abdämpfung 9	5,30	5,30	5,30
AVO 27	Cockpit 3	76,84	76,84	76,84
AVO 28	Rückwand 1	28,65	28,65	28,65
AVO 29	Abdämpfung 10	28,28	28,28	28,28
AVO 30	Abdämpfung 11	28,28	28,28	28,28
AVO 31	Cockpit 4	10,00	10,00	10,00
AVO 32	Ersatzradmulde 1	7,08	7,08	7,08
AVO 33	Ersatzradmulde 2	10,00	16,75	10,00

Nummer	Bezeichnung	t_{ICE} [s]	t_{BEV} [s]	t_{bNGV} [s]
AVO 34	Tank 1	2,36	2,36	2,36
AVO 35	Abdämpfung 12	15,35	15,35	15,35
AVO 36	Abdämpfung 13	2,71	2,71	2,71
AVO 37	Abdämpfung 14	5,66	5,66	5,66
AVO 38	Abdämpfung 15	10,51	10,51	10,51
AVO 39	Windschutzscheibe 1	10,02	10,02	10,02
AVO 40	Ersatzradmulde 3	10,00	14,73	10,00
AVO 41	Abdämpfung 16	7,08	7,08	7,08
AVO 42	Tank 2	7,73	7,73	7,73
AVO 43	Packtuch 1	9,40	9,40	9,40
AVO 44	Steuergerät 1	1,77	1,77	1,77
AVO 45	Windschutzscheibe 2	10,02	10,02	10,02
AVO 46	Sperrdifferenzial	15,22	15,22	15,22
AVO 47	Abdämpfung 17	10,60	10,00	10,60
AVO 48	Abdämpfung 18	7,08	7,08	7,08
AVO 49	Steuergerät 2	120,00	120,00	120,00
AVO 50	Steuergerät 3	40,62	40,62	40,62
AVO 51	Wischwasser 1	4,70	4,70	4,70
AVO 52	Leitungssatz 2	53,91	50,37	53,91
AVO 53	Bussystem	7,24	10,00	23,19
AVO 54	Leitungssatz 3	20,53	20,53	20,53
AVO 55	Start/Stop 1	5,75	5,75	5,75
AVO 56	Start/Stop 2	10,00	10,00	10,00
AVO 57	Packtuch 2	31,26	31,26	33,62
AVO 58	Kabelkanal 1	36,53	36,53	36,53
AVO 59	Massestelle Motor	23,86	13,15	26,22
AVO 60	Kondenswasser	11,08	11,08	11,08
AVO 61	Kabelkanal 2	10,66	10,66	10,66
AVO 62	Stopfen 1	3,54	10,00	3,54
AVO 63	Entlüftungsklappe 1	12,73	12,73	12,73
AVO 64	Längsträger	14,61	14,61	43,83
AVO 65	Abdämpfung 19	13,14	13,14	13,14
AVO 66	Getriebe	14,08	14,08	14,08
AVO 67	Abdämpfung 20	4,48	4,48	4,48
AVO 68	PTC-Zuheizer	25,92	10,00	40,66
AVO 69	Leitungssatz 4	20,11	20,11	20,11
AVO 70	Abdämpfung 21	13,55	10,00	13,55
AVO 71	Entlüftungsklappe 2	11,55	11,55	11,55
AVO 72	Massestelle Sitz 1	35,81	33,45	35,81
AVO 73	Sidebag 1	13,65	13,65	13,65
AVO 74	Abdämpfung 21	23,04	23,04	23,04
AVO 75	Windschutzscheibe 3	10,00	10,00	10,00
AVO 76	NOx-Sensor	19,46	19,46	19,46

Nummer	Bezeichnung	t_{ICE} [s]	t_{BEV} [s]	t_{bNGV} [s]
AVO 77	Luffilter	10,00	10,00	10,00
AVO 78	Wischwasser 2	26,49	26,49	26,49
AVO 79	Starterbatterie	43,65	44,65	43,65
AVO 80	Massestelle Sitz 2	54,29	51,93	54,29
AVO 81	Sidebag 2	9,65	9,65	9,65
AVO 82	Abdämpfung 22	28,16	23,04	28,16
AVO 83	Kabelkanal 3	73,22	64,03	73,22
AVO 84	Kraftstoffpumpe	11,79	0,00	11,79
AVO 85	Leitungssatz 5	10,32	10,32	10,32
AVO 86	Parkbremse	34,23	34,23	34,23
AVO 87	Setkiste 2	5,09	5,09	5,09
AVO 88	Motorhaube	45,24	52,32	45,24
AVO 89	ESP	6,24	6,24	6,24
AVO 90	Abdämpfung 23	11,96	9,60	11,96
AVO 91	Schaltung	56,67	43,60	56,67
AVO 92	Abdämpfung 24	12,37	10,00	12,37
AVO 93	Hinweisschilder	48,11	27,83	48,11
AVO 94	Stopfen 2	21,60	22,84	21,60
AVO 95	Tank 3	11,14	11,72	11,14
AVO 96	Heckleuchten	7,66	7,66	7,66
AVO 97	Leitungssatz 6	46,77	46,77	46,77
AVO 98	Dachrahmen 1	12,21	12,21	12,21
AVO 99	Dachrahmen 2	58,99	58,99	58,99
AVO 100	Rückwand 2	21,82	21,82	21,82

A.8 Vorrangrestriktionen

Tabelle A.2 zeigt das Vorliegen einer Vorrangsbeziehung zwischen nachfolgendem (Nummer) und vorausgehendem (Vorgänger) Arbeitsvorgang an.

Tabelle A.2: Vorrangrestriktion der Arbeitsvorgänge

Nummer	Vorgänger	Nummer	Vorgänger	Nummer	Vorgänger
AVO 1	-	AVO 35	6	AVO 69	50
AVO 2	1	AVO 36	6	AVO 70	6
AVO 3	2	AVO 37	6	AVO 71	40
AVO 4	2	AVO 38	6	AVO 72	6
AVO 5	2	AVO 39	20	AVO 73	49
AVO 6	2	AVO 40	32	AVO 74	69
AVO 7	2,3,4,5,6	AVO 41	6,19	AVO 75	52
AVO 8	7	AVO 42	6	AVO 76	6
AVO 9	8	AVO 43	27	AVO 77	6
AVO 10	8	AVO 44	27	AVO 78	49
AVO 11	8	AVO 45	20	AVO 79	48
AVO 12	AVO 8	AVO 46	27	AVO 80	6
AVO 13	8	AVO 47	6	AVO 81	61
AVO 14	8	AVO 48	6,19	AVO 82	70
AVO 15	9,10,11,12,13,14	AVO 49	20	AVO 83	50
AVO 16	15	AVO 50	49	AVO 84	50
AVO 17	16	AVO 51	49	AVO 85	50
AVO 18	16	AVO 52	49	AVO 86	50
AVO 19	6	AVO 53	49	AVO 87	84,85,86
AVO 20	18	AVO 54	49	AVO 88	79
AVO 21	16	AVO 55	49	AVO 89	79
AVO 22	6	AVO 56	55	AVO 90	6
AVO 23	11	AVO 57	50	AVO 91	66
AVO 24	15	AVO 58	50	AVO 92	6
AVO 25	15	AVO 59	6	AVO 93	88
AVO 26	15	AVO 60	50	AVO 94	88
AVO 27	17,22,24,25,26	AVO 61	50	AVO 95	71
AVO 28	20	AVO 62	42	AVO 96	6
AVO 29	20	AVO 63	40	AVO 97	22,46
AVO 30	6	AVO 64	40	AVO 98	97
AVO 31	20	AVO 65	6	AVO 99	97
AVO 32	20	AVO 66	65	AVO 100	97
AVO 33	32	AVO 67	66		
AVO 34	20	AVO 68	59		

A.10 Paketbildung von Ausstattungsmerkmalen

Im Rahmen der Erprobung wird berücksichtigt, dass optionale Ausstattungsmerkmale zu Paketen gebündelt angeboten werden. Tabelle A.4 stellt die für den betrachteten Abschnitt des Fließmontagesystems montageprozessrelevanten Ausstattungspakete sowie deren Buchungswahrscheinlichkeit P_{pac} dar.

Tabelle A.4: Übersicht optionaler Ausstattungspakete

ID	Bezeichnung	P_{pac}
0	Business	10 %
1	Outdoor	5 %
2	Klima	15 %

A.11 Übersicht optionaler Ausstattungsmerkmale

Ausstattungsmerkmale oe können entweder einzeln oder als Teil eines Ausstattungspakets pac bestellt werden. Ist ein Ausstattungsmerkmal nicht Teil eines Ausstattungspakets, so entspricht die Verbaurate VB_{oe} der Wahrscheinlichkeit einer Einzelbestellung des Ausstattungsmerkmals $P_{spe,oe}$. Ist ein Ausstattungsmerkmal jedoch Teil eines Ausstattungspakets, so wird die Verbaurate nach Formel A.9 bestimmt.

$$VB_{oe} = \left(100\% - \sum_{oe \in \text{pac}} P_{pac} \right) * P_{spe,oe} + \sum_{oe \in \text{pac}} P_{pac} \quad (\text{A.9})$$

Tabelle A.5 stellt die optionalen Ausstattungsmerkmale vor, die den betrachteten Abschnitt des Fließmontagesystems durch die Zuordnung eines zusätzlichen Betriebsmittels oder eine Veränderung der Montagezeit beeinflusst. Ausstattungsmerkmale die lediglich durch die Montage eines anderen Bauteils im unveränderten Montageprozess erzeugt werden können, werden nicht berücksichtigt.

Tabelle A.5: Übersicht optionaler Ausstattungsmerkmale

ID	Ausstattungsmerkmal oe	Ausstattungspaket	$P_{spe,oe}$	VB_{oe}
0	Parkassistent	0	20 %	28,0 %
1	Sitzheizung	0, 2	10 %	32,5 %
2	Rückfahrkamera	1	20 %	24,0 %
3	Anhängevorrichtung	1	10 %	14,5 %
4	Fondbank +	1	20 %	24,0 %
5	Klimaautomatik	2	75 %	76,3 %
6	Getriebe +	-	25 %	25,0 %
7	Panoramadach	-	15 %	15,0 %
8	Rechtslenker	-	25 %	25,0 %

A.12 Robuste Bearbeitungszeiten

Tabelle A.6 stellt eine Übersicht der robusten Bearbeitungszeiten je Szenario dar. Dabei sind die Varianten entsprechend ihrem Anteil im Variantenmix nach der Methode robuster Bearbeitungszeiten (vgl. Kapitel 5.1.4.1) berücksichtigt.

Tabelle A.6: Übersicht der robusten Bearbeitungszeiten je Szenario in Sekunden

Bezeichnung	Low EV	Focus ICE	High EV	Multi Concept
AVO 1	74,55	74,99	73,23	74,99
AVO 2	44,36	44,20	44,01	45,38
AVO 3	97,03	98,94	91,30	98,94
AVO 4	98,93	101,03	92,62	101,03
AVO 5	77,03	73,73	82,39	79,43
AVO 6	93,49	91,09	97,37	95,22
AVO 7	106,02	106,02	106,02	106,02
AVO 8	82,20	83,30	78,90	83,30
AVO 9	14,42	14,42	14,42	14,42
AVO 10	23,88	23,88	23,88	23,88
AVO 11	83,31	82,89	83,98	83,61
AVO 12	5,56	5,56	5,56	5,56
AVO 13	26,37	26,37	26,37	26,37
AVO 14	10,00	10,00	10,00	10,00
AVO 15	42,69	42,69	42,69	42,69
AVO 16	42,19	44,80	34,37	44,80
AVO 17	24,76	24,76	24,76	24,76
AVO 18	8,60	8,60	8,60	8,60
AVO 19	8,84	8,84	8,84	8,84
AVO 20	8,84	8,84	8,84	8,84
AVO 21	39,12	39,37	38,39	39,37
AVO 22	6,48	6,48	6,48	6,48
AVO 23	10,00	10,00	10,00	10,00
AVO 24	16,03	16,78	13,79	16,78
AVO 25	10,35	10,00	10,90	10,60
AVO 26	5,30	5,30	5,30	5,30
AVO 27	76,84	76,84	76,84	76,84
AVO 28	28,65	28,65	28,65	28,65
AVO 29	28,28	28,28	28,28	28,28
AVO 30	28,28	28,28	28,28	28,28
AVO 31	10,00	10,00	10,00	10,00
AVO 32	7,08	7,08	7,08	7,08
AVO 33	11,96	10,00	15,13	13,38
AVO 34	2,36	2,36	2,36	2,36
AVO 35	15,35	15,35	15,35	15,35

Bezeichnung	Low EV	Focus ICE	High EV	Multi Concept
AVO 36	2,71	2,71	2,71	2,71
AVO 37	5,66	5,66	5,66	5,66
AVO 38	10,51	10,51	10,51	10,51
AVO 39	10,02	10,02	10,02	10,02
AVO 40	11,37	10,00	13,59	12,37
AVO 41	7,08	7,08	7,08	7,08
AVO 42	7,73	7,73	7,73	7,73
AVO 43	9,70	9,70	9,70	9,70
AVO 44	1,77	1,77	1,77	1,77
AVO 45	10,02	10,02	10,02	10,02
AVO 46	15,40	15,40	15,40	15,40
AVO 47	10,53	10,60	10,34	10,60
AVO 48	7,08	7,08	7,08	7,08
AVO 49	120,00	120,00	120,00	120,00
AVO 50	41,69	41,69	41,69	41,69
AVO 51	4,50	4,50	4,50	4,50
AVO 52	53,52	53,91	52,35	53,91
AVO 53	9,23	7,24	9,34	15,91
AVO 54	20,53	20,53	20,53	20,53
AVO 55	5,81	5,81	5,81	5,81
AVO 56	10,00	10,00	10,00	10,00
AVO 57	31,47	31,26	31,26	32,44
AVO 58	36,53	36,53	36,53	36,53
AVO 59	22,68	23,86	19,15	25,04
AVO 60	11,08	11,08	11,08	11,08
AVO 61	10,66	10,66	10,66	10,66
AVO 62	5,41	3,54	8,45	6,77
AVO 63	12,73	12,73	12,73	12,73
AVO 64	15,42	12,79	12,79	27,40
AVO 65	13,14	13,14	13,14	13,14
AVO 66	13,51	13,51	13,51	13,51
AVO 67	4,48	4,48	4,48	4,48
AVO 68	25,91	26,39	19,18	33,76
AVO 69	20,11	20,11	20,11	20,11
AVO 70	13,16	13,55	11,99	13,55
AVO 71	11,55	11,55	11,55	11,55
AVO 72	36,56	36,82	35,78	36,82
AVO 73	13,65	13,65	13,65	13,65
AVO 74	23,04	23,04	23,04	23,04
AVO 75	10,00	10,00	10,00	10,00
AVO 76	19,46	19,46	19,46	19,46
AVO 77	10,00	10,00	10,00	10,00
AVO 78	26,49	26,49	26,49	26,49

Bezeichnung	Low EV	Focus ICE	High EV	Multi Concept
AVO 79	43,94	43,65	44,41	44,15
AVO 80	54,03	54,29	53,25	54,29
AVO 81	9,65	9,65	9,65	9,65
AVO 82	27,60	28,16	25,91	28,16
AVO 83	71,43	72,44	68,39	72,44
AVO 84	11,53	11,79	10,75	11,79
AVO 85	10,32	10,32	10,32	10,32
AVO 86	34,23	34,23	34,23	34,23
AVO 87	5,09	5,09	5,09	5,09
AVO 88	47,29	45,24	50,62	48,78
AVO 89	6,24	6,24	6,24	6,24
AVO 90	11,70	11,96	10,92	11,96
AVO 91	55,23	56,67	50,92	56,67
AVO 92	12,11	12,37	11,33	12,37
AVO 93	45,88	48,11	39,19	48,11
AVO 94	21,96	21,60	22,54	22,22
AVO 95	11,31	11,14	11,58	11,43
AVO 96	7,66	7,66	7,66	7,66
AVO 97	46,77	46,77	46,77	46,77
AVO 98	12,21	12,21	12,21	12,21
AVO 99	58,05	58,05	58,05	58,05
AVO 100	21,82	21,82	21,82	21,82

A.13 Rangfolgen der Zielkriterien

Abbildung A.7 stellt die Rangfolge von Lösungsbündeln (ID) anhand der Zielkriterien nach der Optimierungsphase (Rang ZFW) und der Bewertungsphase (Rang r) dar

ID	Rang ZFW			Rang r				gewichtet
	gk	flex	wf	gk	flex	wf		
1	113	1	89	115	10	89	105	
2	81	16	39	82	27	39	39	
3	113	2	90	114	10	90	104	
4	82	3	37	81	10	37	17	
5	123	9	111	124	27	111	123	
6	121	12	124	121	2	124	108	
7	2	123	5	11	104	5	45	
8	2	108	2	2	64	2	14	
9	2	94	3	10	104	4	44	
10	2	64	4	8	104	3	43	
11	22	35	11	32	20	11	5	
12	22	39	14	23	20	14	4	
13	2	120	9	17	114	9	58	
14	8	122	16	6	111	15	56	
15	22	55	33	29	64	33	31	
16	60	76	76	59	124	75	115	
17	57	30	49	65	100	49	84	
18	22	89	23	49	120	23	100	
19	57	32	85	70	118	85	109	
20	60	58	28	67	103	28	86	
21	22	116	18	45	120	18	99	
22	2	111	8	18	46	8	13	
23	102	66	63	102	46	63	95	
24	85	56	45	86	46	45	72	
25	85	85	53	89	56	53	76	
26	85	13	118	88	18	118	65	
27	85	34	101	91	36	101	69	
28	19	50	42	21	60	42	16	
29	107	27	95	108	24	95	90	
30	50	44	41	52	46	41	24	
31	111	117	112	112	36	112	110	
32	71	31	58	78	46	58	62	
33	96	28	81	99	24	81	67	
34	50	72	26	55	56	26	22	
35	72	26	80	79	36	80	37	
36	113	22	99	113	98	99	125	
37	110	87	84	110	98	84	118	
38	118	14	106	119	42	107	120	
39	123	99	113	123	42	113	124	
40	119	20	106	120	10	108	113	
41	119	19	108	118	45	106	122	
42	122	73	123	122	9	123	117	
43	100	95	105	100	55	105	103	
44	100	65	109	103	14	109	75	
45	57	119	97	68	27	98	28	
46	22	8	79	25	76	79	49	
47	1	75	1	1	23	1	1	
48	60	11	93	61	71	92	68	
49	60	10	92	63	1	93	9	
50	22	83	77	47	7	77	3	
51	60	36	102	60	72	102	70	
52	22	7	91	22	8	91	2	
53	8	93	75	3	70	76	19	
54	102	114	121	106	18	122	87	
55	85	68	115	92	6	115	36	
56	102	101	122	104	115	121	121	
57	85	104	114	95	115	114	112	
58	8	121	6	16	104	6	48	
59	22	82	25	35	64	25	27	
60	60	46	36	58	120	36	111	
61	60	42	48	66	102	48	88	
62	22	102	30	46	123	30	106	
63	85	56	44	87	46	44	73	

ID	Rang ZFW			Rang r				gewichtet
	gk	flex	wf	gk	flex	wf		
64	22	106	21	28	24	21	6	
65	85	74	47	93	20	47	50	
66	85	107	46	96	96	46	93	
67	60	90	29	69	96	29	71	
68	22	63	31	34	64	32	33	
69	60	51	51	62	64	51	66	
70	22	52	32	33	64	31	32	
71	60	33	83	64	100	83	85	
72	22	92	64	48	118	64	96	
73	8	110	66	13	44	66	7	
74	102	115	116	105	60	116	107	
75	85	124	110	94	73	110	91	
76	113	4	119	116	3	119	97	
77	82	23	94	83	15	94	35	
78	113	4	119	117	3	120	98	
79	82	6	103	84	3	103	21	
80	123	15	125	125	15	125	119	
81	8	67	10	14	117	10	60	
82	22	37	22	27	35	22	8	
83	8	125	13	9	111	13	57	
84	8	113	15	4	75	16	18	
85	8	103	12	5	111	12	55	
86	102	100	68	101	59	68	101	
87	85	88	61	90	58	61	79	
88	19	91	20	20	93	19	30	
89	108	82	87	109	32	87	89	
90	50	48	38	51	46	38	23	
91	111	118	117	111	46	117	116	
92	72	25	96	77	36	96	40	
93	96	21	104	98	15	104	61	
94	50	40	59	54	36	59	15	
95	72	29	82	80	36	82	38	
96	96	80	98	85	77	97	92	
97	72	78	60	76	77	60	78	
98	50	49	40	56	46	40	26	
99	19	97	27	19	125	27	102	
100	108	84	100	107	80	100	114	
101	96	69	69	97	80	69	94	
102	72	112	72	71	80	71	80	
103	72	105	54	72	80	54	77	
104	50	96	35	53	80	35	74	
105	72	60	70	74	80	72	82	
106	50	71	34	50	80	34	53	
107	72	98	73	75	80	73	83	
108	72	60	70	73	80	70	81	
109	22	47	57	26	27	57	11	
110	8	86	52	7	108	52	63	
111	22	109	67	30	108	67	74	
112	22	17	43	31	33	43	10	
113	60	18	86	57	33	86	25	
114	8	77	55	15	110	56	64	
115	8	70	56	12	74	55	20	
116	22	59	74	24	27	74	12	
Ref 1	22	24	78	36	94	78	59	
Ref 2	22	54	24	36	80	24	46	
Ref 3	22	43	62	36	80	62	52	
Ref 4	22	53	50	36	77	50	51	
Ref 5	22	45	65	36	60	65	29	
Ref 6	22	38	88	36	60	88	34	
Ref 7	22	81	7	36	95	7	47	
Ref 8	22	41	19	36	80	20	41	
Ref 9	22	79	17	36	92	17	42	

Abbildung A.7: Rangfolge der Zielkriterien

A.14 Übersicht der Wandlungskosten

Die zusätzlichen Stationskosten (SK), Wandlungsobjektkosten (WOK), direkten Wandlungskosten (DWK) und indirekten Wandlungskosten (IWK) der Lösungsbündel (ID) werden in Abbildung A.8, Abbildung A.9, Abbildung A.10, Abbildung A.11, Abbildung A.12, Abbildung A.13, Abbildung A.14, Abbildung A.15 und Abbildung A.16 dargestellt. Hinsichtlich der SK findet keine weitere Unterteilung statt. Die WOK ergeben sich aus den Kosten der Investition (inv) und Desinvestition (desinv) von Betriebsmitteln. Zur Ermittlung der DWK erfolgt eine Summierung der Kosten für Planung (plan), Integration (int), Desintegration (desint) und Transport von Betriebsmitteln. Die IWK werden ausschließlich aus den Opportunitätskosten des Umbaus (lost) ermittelt.

		Wandel $s_0 \rightarrow s_1$						
ID	SK	WOK		DWK			IWK	
	zus. Station	inv	desinv	plan	trans	int	desint	lost
1	- €	- €	- €	65.804,00 €	2.183,00 €	4.654,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
2	- €	29.584,75 €	- €	68.566,67 €	2.054,17 €	4.493,49 €	4.333,01 €	1.620.000,00 €
3	- €	29.585,00 €	- €	66.809,00 €	2.118,00 €	4.654,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €
4	- €	2.367,00 €	-14.792,00 €	64.799,00 €	2.247,00 €	4.975,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €
5	- €	29.585,00 €	- €	69.069,00 €	2.118,00 €	4.654,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €
6	- €	29.585,00 €	- €	66.306,00 €	2.054,00 €	4.493,00 €	4.333,00 €	1.620.000,00 €
7	- €	59.169,50 €	- €	79.868,87 €	2.246,75 €	5.135,42 €	4.814,46 €	1.620.000,00 €
8	- €	34.318,00 €	- €	82.380,00 €	2.375,00 €	5.617,00 €	5.135,00 €	1.620.000,00 €
9	- €	59.169,50 €	- €	79.366,55 €	2.182,55 €	4.974,94 €	4.653,97 €	1.620.000,00 €
10	- €	59.169,50 €	- €	79.366,55 €	2.182,55 €	4.974,94 €	4.653,97 €	1.620.000,00 €
11	- €	59.169,50 €	- €	80.120,03 €	2.182,55 €	4.974,94 €	4.653,97 €	1.620.000,00 €
12	- €	88.754,00 €	- €	80.120,00 €	2.183,00 €	5.135,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
13	- €	59.170,00 €	- €	79.367,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
14	- €	88.754,00 €	- €	77.357,00 €	2.118,00 €	4.975,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €
15	- €	88.754,25 €	- €	77.106,11 €	2.182,55 €	5.135,42 €	4.653,97 €	1.620.000,00 €
16	- €	29.585,00 €	- €	77.106,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
17	- €	29.584,75 €	- €	75.599,15 €	2.182,55 €	4.814,46 €	4.653,97 €	1.620.000,00 €
18	- €	29.584,75 €	- €	74.594,51 €	2.246,75 €	4.974,94 €	4.814,46 €	1.620.000,00 €
19	- €	- €	- €	77.106,00 €	2.183,00 €	4.654,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
20	- €	- €	- €	76.101,00 €	2.247,00 €	4.814,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €
21	- €	- €	- €	73.841,00 €	2.247,00 €	4.814,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €
22	- €	59.169,50 €	- €	76.101,47 €	2.246,75 €	5.135,42 €	4.814,46 €	1.620.000,00 €
23	- €	29.584,75 €	- €	75.850,31 €	2.310,94 €	5.135,42 €	4.974,94 €	1.620.000,00 €
24	- €	59.170,00 €	- €	73.841,00 €	2.247,00 €	5.135,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €
25	- €	59.170,00 €	- €	76.353,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
26	- €	88.754,00 €	- €	73.339,00 €	2.183,00 €	5.135,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
27	- €	88.754,00 €	- €	73.339,00 €	2.183,00 €	5.135,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
28	- €	59.170,00 €	- €	73.339,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
29	- €	29.585,00 €	- €	72.083,00 €	2.311,00 €	5.135,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €
30	- €	59.170,00 €	- €	70.827,00 €	2.247,00 €	5.135,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €
31	- €	59.170,00 €	- €	72.836,00 €	2.311,00 €	5.296,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €
32	- €	59.170,00 €	- €	73.841,00 €	2.247,00 €	5.135,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €

Abbildung A.8: Wandlungskosten für den Wandel zu s_1 der Lösungsbündel 1 bis 32

Wandel $s_0 \rightarrow s_1$									
	SK	WOK		DWK				IWK	
ID	zus. Station	inv	desinv	plan	trans	int	desint	lost	
33	- €	59.170,00 €	- €	78.613,00 €	2.375,00 €	5.456,00 €	5.135,00 €	1.620.000,00 €	
34	- €	59.170,00 €	- €	87.655,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
35	- €	59.170,00 €	- €	86.148,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
36	- €	59.170,00 €	- €	59.023,00 €	321,00 €	1.123,00 €	802,00 €	405.000,00 €	
37	- €	59.170,00 €	- €	58.269,00 €	321,00 €	1.123,00 €	802,00 €	405.000,00 €	
38	- €	59.170,00 €	- €	59.023,00 €	321,00 €	1.123,00 €	802,00 €	405.000,00 €	
39	- €	59.170,00 €	- €	57.516,00 €	321,00 €	1.123,00 €	802,00 €	405.000,00 €	
40	- €	59.170,00 €	- €	59.023,00 €	321,00 €	1.123,00 €	802,00 €	405.000,00 €	
41	- €	59.170,00 €	- €	59.023,00 €	321,00 €	1.123,00 €	802,00 €	405.000,00 €	
42	- €	59.170,00 €	- €	56.260,00 €	257,00 €	963,00 €	642,00 €	405.000,00 €	
43	386.201,00 €	59.170,00 €	- €	82.632,00 €	2.118,00 €	4.814,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €	
44	386.201,00 €	59.170,00 €	- €	84.390,00 €	2.247,00 €	5.135,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
45	386.201,00 €	29.585,00 €	- €	85.394,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
46	- €	59.170,00 €	- €	75.599,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
47	- €	31.952,00 €	- €	54.251,00 €	385,00 €	1.284,00 €	963,00 €	405.000,00 €	
48	- €	29.585,00 €	- €	78.613,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
49	- €	29.585,00 €	- €	79.115,00 €	2.247,00 €	4.975,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
50	- €	- €	- €	79.618,00 €	2.311,00 €	4.975,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
51	193.100,00 €	59.170,00 €	- €	84.139,00 €	2.311,00 €	5.296,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
52	- €	36.685,00 €	- €	78.864,00 €	2.311,00 €	5.617,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
53	- €	34.318,00 €	- €	79.367,00 €	2.375,00 €	5.617,00 €	5.135,00 €	1.620.000,00 €	
54	- €	- €	- €	75.097,00 €	2.311,00 €	4.975,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
55	- €	29.585,00 €	- €	76.604,00 €	2.118,00 €	4.654,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €	
56	- €	- €	- €	77.860,00 €	2.183,00 €	4.654,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
57	- €	- €	- €	77.106,00 €	2.183,00 €	4.654,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
58	- €	88.754,00 €	- €	77.357,00 €	2.118,00 €	4.975,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €	
59	- €	59.170,00 €	- €	78.111,00 €	2.118,00 €	4.814,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €	
60	- €	59.170,00 €	- €	76.604,00 €	2.118,00 €	4.814,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €	
61	193.100,00 €	29.585,00 €	- €	76.604,00 €	2.118,00 €	4.654,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €	
62	193.100,00 €	29.585,00 €	- €	77.106,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
63	- €	59.170,00 €	- €	73.841,00 €	2.247,00 €	5.135,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
64	- €	59.170,00 €	- €	74.595,00 €	2.247,00 €	5.135,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
65	- €	59.170,00 €	- €	77.106,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
66	- €	29.585,00 €	- €	76.101,00 €	2.247,00 €	4.975,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
67	- €	29.585,00 €	- €	75.348,00 €	2.247,00 €	4.975,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
68	- €	59.170,00 €	- €	77.106,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
69	- €	59.170,00 €	- €	76.353,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
70	- €	59.170,00 €	- €	74.846,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
71	193.100,00 €	29.585,00 €	- €	76.604,00 €	2.118,00 €	4.654,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €	
72	193.100,00 €	29.585,00 €	- €	84.139,00 €	2.311,00 €	5.135,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
73	193.100,00 €	88.754,00 €	- €	85.143,00 €	2.247,00 €	5.296,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
74	386.201,00 €	59.170,00 €	- €	84.139,00 €	2.311,00 €	5.296,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
75	386.201,00 €	88.754,00 €	- €	85.394,00 €	2.183,00 €	5.135,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
76	- €	29.585,00 €	- €	85.897,00 €	2.247,00 €	4.975,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
77	- €	59.170,00 €	- €	67.060,00 €	385,00 €	1.284,00 €	963,00 €	405.000,00 €	
78	- €	29.585,00 €	- €	85.897,00 €	2.247,00 €	4.975,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
79	- €	29.585,00 €	- €	84.390,00 €	2.247,00 €	4.975,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	

Abbildung A.9: Wandlungskosten für den Wandel zu s_1 der Lösungsbündel 33 bis 79

		Wandel $s_0 \rightarrow s_1$							
		SK		WOK		DWK			IWK
ID	zus. Station	inv	desinv	plan	trans	int	desint	lost	
80	- €	29.585,00 €	- €	68.316,00 €	449,00 €	1.284,00 €	1.123,00 €	405.000,00 €	
81	- €	118.339,00 €	- €	85.394,00 €	2.183,00 €	5.296,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
82	- €	118.339,00 €	- €	86.650,00 €	2.247,00 €	5.456,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
83	- €	118.339,00 €	- €	85.394,00 €	2.183,00 €	5.296,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
84	- €	147.924,00 €	- €	85.394,00 €	2.183,00 €	5.456,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
85	- €	118.339,00 €	- €	85.394,00 €	2.183,00 €	5.296,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
86	193.100,00 €	59.170,00 €	- €	84.390,00 €	2.247,00 €	5.135,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
87	193.100,00 €	88.754,00 €	- €	85.143,00 €	2.247,00 €	5.296,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
88	- €	59.170,00 €	- €	73.339,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
89	- €	29.585,00 €	- €	72.083,00 €	2.311,00 €	5.135,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
90	- €	59.170,00 €	- €	70.827,00 €	2.247,00 €	5.135,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
91	- €	59.170,00 €	- €	72.836,00 €	2.311,00 €	5.296,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
92	- €	59.170,00 €	- €	73.841,00 €	2.247,00 €	5.135,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
93	- €	59.170,00 €	- €	78.613,00 €	2.375,00 €	5.456,00 €	5.135,00 €	1.620.000,00 €	
94	- €	59.170,00 €	- €	70.827,00 €	2.247,00 €	5.135,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
95	- €	59.170,00 €	- €	73.841,00 €	2.247,00 €	5.135,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
96	- €	34.318,00 €	- €	74.846,00 €	2.375,00 €	5.617,00 €	5.135,00 €	1.620.000,00 €	
97	- €	88.754,00 €	- €	75.097,00 €	2.311,00 €	5.456,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
98	- €	29.585,00 €	- €	71.078,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
99	- €	59.170,00 €	- €	75.348,00 €	2.247,00 €	5.135,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
100	- €	59.170,00 €	- €	73.590,00 €	2.311,00 €	5.296,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
101	- €	88.754,00 €	- €	73.088,00 €	2.247,00 €	5.296,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
102	- €	88.754,00 €	- €	72.836,00 €	2.311,00 €	5.456,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
103	- €	88.754,00 €	- €	76.855,00 €	2.247,00 €	5.296,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
104	- €	59.170,00 €	- €	76.604,00 €	2.311,00 €	5.296,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
105	- €	88.754,00 €	- €	70.074,00 €	2.247,00 €	5.296,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
106	- €	59.170,00 €	- €	74.092,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
107	- €	88.754,00 €	- €	72.836,00 €	2.311,00 €	5.456,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
108	- €	88.754,00 €	- €	70.074,00 €	2.247,00 €	5.296,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
109	193.100,00 €	88.754,00 €	- €	87.906,00 €	2.311,00 €	5.456,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
110	193.100,00 €	88.754,00 €	- €	85.897,00 €	2.247,00 €	5.296,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
111	193.100,00 €	88.754,00 €	- €	87.906,00 €	2.311,00 €	5.456,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
112	193.100,00 €	88.754,00 €	- €	86.650,00 €	2.247,00 €	5.296,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
113	193.100,00 €	88.754,00 €	- €	86.650,00 €	2.247,00 €	5.296,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
114	193.100,00 €	88.754,00 €	- €	87.404,00 €	2.247,00 €	5.296,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
115	193.100,00 €	88.754,00 €	- €	87.404,00 €	2.247,00 €	5.296,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
116	193.100,00 €	118.339,00 €	- €	88.157,00 €	2.247,00 €	5.456,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
Ref 1	193.100,00 €	59.170,00 €	- €	101.469,00 €	3.370,00 €	7.543,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €	
Ref 2	- €	29.585,00 €	- €	76.855,00 €	1.444,00 €	3.370,00 €	3.210,00 €	1.620.000,00 €	
Ref 3	386.201,00 €	88.754,00 €	- €	99.459,00 €	3.306,00 €	7.543,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €	
Ref 4	193.100,00 €	59.170,00 €	- €	101.469,00 €	3.370,00 €	7.543,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €	
Ref 5	- €	59.170,00 €	- €	75.599,00 €	1.380,00 €	3.370,00 €	3.049,00 €	1.620.000,00 €	
Ref 6	386.201,00 €	88.754,00 €	- €	99.459,00 €	3.306,00 €	7.543,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €	
Ref 7	- €	29.585,00 €	- €	76.855,00 €	1.444,00 €	3.370,00 €	3.210,00 €	1.620.000,00 €	
Ref 8	- €	59.170,00 €	- €	72.083,00 €	1.316,00 €	3.210,00 €	2.889,00 €	1.620.000,00 €	
Ref 9	- €	59.170,00 €	- €	75.599,00 €	1.380,00 €	3.370,00 €	3.049,00 €	1.620.000,00 €	

Abbildung A.10: Wandlungskosten für den Wandel zu s_1 der Lösungsbündel 80 bis 116 und der auf der Referenzlösung basierenden Lösungsbündel

		Wandel $s_0 \rightarrow s_2$						
		SK	WOK		DWK			IWK
ID	zus. Station	inv	desinv	plan	trans	int	desint	lost
1	- €	- €	-29.585,00 €	68.316,00 €	2.118,00 €	4.493,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €
2	- €	- €	-14.792,38 €	64.799,27 €	2.054,17 €	4.333,01 €	4.493,49 €	1.620.000,00 €
3	- €	- €	-14.792,00 €	66.809,00 €	2.118,00 €	4.493,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
4	- €	2.367,00 €	-44.377,00 €	67.562,00 €	2.118,00 €	4.654,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €
5	- €	- €	-14.792,00 €	69.069,00 €	2.118,00 €	4.493,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
6	- €	29.585,00 €	- €	47.218,00 €	2.118,00 €	4.654,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €
7	- €	- €	- €	82.882,79 €	2.246,75 €	4.814,46 €	4.814,46 €	1.620.000,00 €
8	- €	7.100,00 €	-29.585,00 €	82.632,00 €	2.311,00 €	5.456,00 €	5.296,00 €	1.620.000,00 €
9	- €	- €	- €	81.626,99 €	2.182,55 €	4.653,97 €	4.653,97 €	1.620.000,00 €
10	- €	- €	- €	81.626,99 €	2.182,55 €	4.653,97 €	4.653,97 €	1.620.000,00 €
11	- €	- €	- €	78.613,07 €	2.182,55 €	4.653,97 €	4.653,97 €	1.620.000,00 €
12	- €	29.585,00 €	- €	79.367,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
13	- €	29.585,00 €	- €	83.134,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
14	- €	29.585,00 €	- €	83.134,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
15	- €	29.584,75 €	- €	72.334,07 €	2.246,75 €	4.974,94 €	4.814,46 €	1.620.000,00 €
16	- €	- €	- €	78.613,00 €	2.183,00 €	4.654,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
17	- €	- €	-14.792,38 €	65.050,43 €	2.182,55 €	4.653,97 €	4.814,46 €	1.620.000,00 €
18	- €	- €	-14.792,38 €	43.701,84 €	385,16 €	962,89 €	1.123,37 €	405.000,00 €
19	386.201,00 €	- €	- €	76.604,00 €	2.118,00 €	4.493,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €
20	- €	- €	-14.792,00 €	79.618,00 €	2.118,00 €	4.493,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
21	- €	- €	-14.792,00 €	78.111,00 €	2.118,00 €	4.493,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
22	- €	29.584,75 €	- €	75.599,15 €	2.182,55 €	4.814,46 €	4.653,97 €	1.620.000,00 €
23	- €	- €	- €	78.361,91 €	2.246,75 €	4.814,46 €	4.814,46 €	1.620.000,00 €
24	- €	29.585,00 €	- €	77.106,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
25	- €	29.585,00 €	- €	77.860,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
26	579.301,00 €	88.754,00 €	- €	79.618,00 €	2.118,00 €	4.975,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €
27	193.100,00 €	- €	- €	73.088,00 €	2.247,00 €	4.814,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €
28	- €	- €	-14.792,00 €	77.608,00 €	2.247,00 €	4.814,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €
29	- €	- €	- €	60.278,00 €	385,00 €	963,00 €	963,00 €	405.000,00 €
30	- €	29.585,00 €	- €	59.525,00 €	385,00 €	1.123,00 €	963,00 €	405.000,00 €
31	- €	29.585,00 €	- €	81.376,00 €	2.247,00 €	4.975,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €
32	- €	29.585,00 €	- €	60.278,00 €	385,00 €	1.123,00 €	963,00 €	405.000,00 €
33	- €	29.585,00 €	- €	58.771,00 €	385,00 €	1.123,00 €	963,00 €	405.000,00 €
34	- €	- €	- €	87.906,00 €	2.311,00 €	4.975,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €
35	193.100,00 €	- €	-14.792,00 €	62.037,00 €	321,00 €	802,00 €	963,00 €	405.000,00 €
36	- €	29.585,00 €	- €	79.618,00 €	2.311,00 €	5.135,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €
37	- €	29.585,00 €	- €	77.357,00 €	2.311,00 €	5.135,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €
38	- €	29.585,00 €	- €	79.618,00 €	2.311,00 €	5.135,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €
39	- €	29.585,00 €	- €	79.618,00 €	2.311,00 €	5.135,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €
40	- €	29.585,00 €	- €	79.618,00 €	2.311,00 €	5.135,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €
41	- €	29.585,00 €	- €	80.371,00 €	2.311,00 €	5.135,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €
42	- €	88.754,00 €	- €	67.813,00 €	2.054,00 €	4.814,00 €	4.333,00 €	1.620.000,00 €
43	193.100,00 €	29.585,00 €	- €	59.023,00 €	321,00 €	963,00 €	802,00 €	405.000,00 €
44	193.100,00 €	- €	- €	77.860,00 €	2.183,00 €	4.654,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
45	193.100,00 €	- €	- €	80.622,00 €	2.247,00 €	4.814,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €
46	- €	88.754,00 €	- €	76.604,00 €	2.118,00 €	4.975,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €

Abbildung A.11: Wandlungskosten für den Wandel zu s_2 der Lösungsbündel 1 bis 46

		Wandel $s_0 \rightarrow s_2$							
		SK	WOK		DWK			IWK	
ID	zus. Station	inv	desinv	plan	trans	int	desint	lost	
47	- €	7.100,00 €	-44.377,00 €	48.223,00 €	193,00 €	963,00 €	963,00 €	405.000,00 €	
48	- €	59.170,00 €	- €	80.874,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
49	- €	59.170,00 €	- €	77.357,00 €	2.118,00 €	4.814,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €	
50	- €	29.585,00 €	- €	77.106,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
51	- €	59.170,00 €	- €	78.111,00 €	2.118,00 €	4.814,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €	
52	579.301,00 €	63.903,00 €	- €	82.632,00 €	2.311,00 €	5.617,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
53	579.301,00 €	61.536,00 €	- €	86.650,00 €	2.439,00 €	5.777,00 €	5.296,00 €	1.620.000,00 €	
54	579.301,00 €	29.585,00 €	- €	79.367,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
55	579.301,00 €	59.170,00 €	- €	78.613,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
56	579.301,00 €	29.585,00 €	- €	79.367,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
57	579.301,00 €	29.585,00 €	- €	78.613,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
58	579.301,00 €	88.754,00 €	- €	84.641,00 €	2.183,00 €	5.135,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
59	- €	59.170,00 €	- €	77.357,00 €	2.118,00 €	4.814,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €	
60	- €	59.170,00 €	- €	76.604,00 €	2.118,00 €	4.814,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €	
61	- €	29.585,00 €	- €	77.860,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
62	- €	29.585,00 €	- €	80.622,00 €	2.247,00 €	4.975,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
63	- €	29.585,00 €	- €	77.106,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
64	- €	29.585,00 €	- €	77.860,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
65	- €	- €	- €	48.976,00 €	385,00 €	963,00 €	963,00 €	405.000,00 €	
66	- €	- €	-14.792,00 €	45.209,00 €	385,00 €	963,00 €	1.123,00 €	405.000,00 €	
67	- €	- €	-14.792,00 €	45.962,00 €	385,00 €	963,00 €	1.123,00 €	405.000,00 €	
68	- €	- €	- €	67.813,00 €	2.247,00 €	4.814,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
69	- €	- €	- €	68.064,00 €	2.183,00 €	4.654,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
70	- €	- €	- €	71.581,00 €	2.247,00 €	4.814,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
71	- €	29.585,00 €	- €	77.860,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
72	386.201,00 €	- €	-29.585,00 €	54.502,00 €	321,00 €	802,00 €	1.123,00 €	405.000,00 €	
73	386.201,00 €	- €	- €	77.860,00 €	2.183,00 €	4.654,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
74	386.201,00 €	- €	-29.585,00 €	81.125,00 €	2.311,00 €	4.975,00 €	5.296,00 €	1.620.000,00 €	
75	386.201,00 €	- €	-14.792,00 €	75.850,00 €	2.311,00 €	4.975,00 €	5.135,00 €	1.620.000,00 €	
76	- €	- €	-44.377,00 €	82.883,00 €	2.247,00 €	4.814,00 €	5.296,00 €	1.620.000,00 €	
77	- €	- €	-29.585,00 €	80.622,00 €	2.247,00 €	4.814,00 €	5.135,00 €	1.620.000,00 €	
78	- €	- €	-44.377,00 €	82.883,00 €	2.247,00 €	4.814,00 €	5.296,00 €	1.620.000,00 €	
79	- €	- €	-44.377,00 €	82.883,00 €	2.247,00 €	4.814,00 €	5.296,00 €	1.620.000,00 €	
80	- €	- €	-44.377,00 €	82.129,00 €	2.247,00 €	4.814,00 €	5.296,00 €	1.620.000,00 €	
81	- €	- €	- €	77.860,00 €	2.183,00 €	4.654,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
82	- €	- €	- €	78.613,00 €	2.183,00 €	4.654,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
83	- €	- €	- €	79.869,00 €	2.247,00 €	4.814,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
84	- €	29.585,00 €	- €	79.367,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
85	- €	- €	- €	77.106,00 €	2.183,00 €	4.654,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
86	- €	- €	- €	78.362,00 €	2.247,00 €	4.814,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
87	- €	29.585,00 €	- €	77.106,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €	
88	- €	- €	- €	87.153,00 €	2.311,00 €	4.975,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €	
89	- €	- €	-14.792,00 €	87.153,00 €	2.311,00 €	4.975,00 €	5.135,00 €	1.620.000,00 €	
90	- €	29.585,00 €	- €	59.525,00 €	385,00 €	1.123,00 €	963,00 €	405.000,00 €	
91	- €	29.585,00 €	- €	81.376,00 €	2.247,00 €	4.975,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €	
92	- €	- €	-14.792,00 €	80.371,00 €	2.311,00 €	4.975,00 €	5.135,00 €	1.620.000,00 €	

Abbildung A.12: Wandlungskosten für den Wandel zu s_2 der Lösungsbündel 47 bis 92

Wandel $s_0 \rightarrow s_2$								
	SK	WOK		DWK				IWK
ID	zus. Station	inv	desinv	plan	trans	int	desint	lost
93	- €	- €	-14.792,00 €	82.380,00 €	2.375,00 €	5.135,00 €	5.296,00 €	1.620.000,00 €
94	- €	- €	-14.792,00 €	79.869,00 €	2.247,00 €	4.814,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €
95	- €	- €	-14.792,00 €	80.371,00 €	2.311,00 €	4.975,00 €	5.135,00 €	1.620.000,00 €
96	- €	31.952,00 €	- €	82.632,00 €	2.504,00 €	5.777,00 €	5.456,00 €	1.620.000,00 €
97	- €	59.170,00 €	- €	62.539,00 €	385,00 €	1.284,00 €	963,00 €	405.000,00 €
98	- €	- €	- €	59.023,00 €	321,00 €	802,00 €	802,00 €	405.000,00 €
99	- €	29.585,00 €	- €	60.278,00 €	385,00 €	1.123,00 €	963,00 €	405.000,00 €
100	- €	- €	- €	82.632,00 €	2.311,00 €	4.975,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €
101	- €	29.585,00 €	- €	63.543,00 €	321,00 €	963,00 €	802,00 €	405.000,00 €
102	- €	29.585,00 €	- €	83.636,00 €	2.247,00 €	4.975,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €
103	- €	29.585,00 €	- €	63.292,00 €	385,00 €	1.123,00 €	963,00 €	405.000,00 €
104	- €	- €	- €	61.785,00 €	385,00 €	963,00 €	963,00 €	405.000,00 €
105	- €	29.585,00 €	- €	80.874,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
106	- €	- €	- €	62.037,00 €	321,00 €	802,00 €	802,00 €	405.000,00 €
107	- €	29.585,00 €	- €	84.390,00 €	2.247,00 €	4.975,00 €	4.814,00 €	1.620.000,00 €
108	- €	29.585,00 €	- €	80.874,00 €	2.183,00 €	4.814,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
109	- €	29.585,00 €	- €	70.074,00 €	2.054,00 €	4.493,00 €	4.333,00 €	1.620.000,00 €
110	- €	29.585,00 €	- €	61.785,00 €	2.054,00 €	4.493,00 €	4.333,00 €	1.620.000,00 €
111	- €	29.585,00 €	- €	66.306,00 €	2.054,00 €	4.493,00 €	4.333,00 €	1.620.000,00 €
112	193.100,00 €	59.170,00 €	- €	59.274,00 €	257,00 €	963,00 €	642,00 €	405.000,00 €
113	193.100,00 €	59.170,00 €	- €	78.613,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
114	193.100,00 €	59.170,00 €	- €	77.106,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
115	193.100,00 €	59.170,00 €	- €	77.860,00 €	2.183,00 €	4.975,00 €	4.654,00 €	1.620.000,00 €
116	193.100,00 €	88.754,00 €	- €	78.864,00 €	2.118,00 €	4.975,00 €	4.493,00 €	1.620.000,00 €
Ref 1	- €	59.170,00 €	- €	89.664,00 €	3.306,00 €	7.382,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €
Ref 2	- €	- €	- €	93.432,00 €	3.306,00 €	7.061,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €
Ref 3	193.100,00 €	29.585,00 €	- €	95.441,00 €	3.370,00 €	7.382,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €
Ref 4	193.100,00 €	29.585,00 €	- €	96.194,00 €	3.370,00 €	7.382,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €
Ref 5	386.201,00 €	- €	-14.792,00 €	95.692,00 €	3.306,00 €	7.061,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €
Ref 6	386.201,00 €	- €	-14.792,00 €	95.692,00 €	3.306,00 €	7.061,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €
Ref 7	- €	- €	- €	75.599,00 €	1.380,00 €	3.049,00 €	3.049,00 €	1.620.000,00 €
Ref 8	- €	- €	- €	77.106,00 €	1.380,00 €	3.049,00 €	3.049,00 €	1.620.000,00 €
Ref 9	- €	- €	- €	75.599,00 €	1.380,00 €	3.049,00 €	3.049,00 €	1.620.000,00 €

Abbildung A.13: Wandlungskosten für den Wandel zu s_2 der Lösungsbündel 93 bis 116 und der auf der Referenzlösung basierenden Lösungsbündel

		Wandel $s_0 \rightarrow s_3$						
	SK	WOK		DWK			IWK	
ID	zus. Station	inv	desinv	plan	trans	int	desint	lost
1	- €	- €	-29.585,00 €	71.581,00 €	1.444,00 €	3.210,00 €	3.531,00 €	1.620.000,00 €
2	- €	- €	-14.792,38 €	96.194,27 €	3.370,12 €	7.221,68 €	7.382,17 €	1.620.000,00 €
3	- €	- €	-14.792,00 €	70.827,00 €	1.444,00 €	3.210,00 €	3.370,00 €	1.620.000,00 €
4	- €	- €	-15.976,00 €	75.097,00 €	1.701,00 €	3.852,00 €	4.173,00 €	1.620.000,00 €
5	193.100,00 €	- €	-14.792,00 €	87.655,00 €	3.434,00 €	7.382,00 €	7.543,00 €	1.620.000,00 €
6	193.100,00 €	- €	-14.792,00 €	104.483,00 €	3.563,00 €	7.703,00 €	7.864,00 €	1.620.000,00 €
7	- €	- €	- €	88.659,47 €	3.370,12 €	7.221,68 €	7.221,68 €	1.620.000,00 €
8	- €	2.367,00 €	- €	90.418,00 €	3.499,00 €	7.703,00 €	7.543,00 €	1.620.000,00 €
9	- €	- €	- €	88.910,63 €	3.305,93 €	7.061,20 €	7.061,20 €	1.620.000,00 €
10	- €	- €	- €	89.664,11 €	3.305,93 €	7.061,20 €	7.061,20 €	1.620.000,00 €
11	- €	- €	- €	88.910,63 €	3.305,93 €	7.061,20 €	7.061,20 €	1.620.000,00 €
12	- €	29.585,00 €	- €	90.418,00 €	3.306,00 €	7.222,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €
13	- €	- €	- €	89.413,00 €	3.370,00 €	7.222,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €
14	579.301,00 €	- €	- €	100.715,00 €	3.370,00 €	7.222,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €
15	- €	- €	- €	90.919,91 €	3.370,12 €	7.221,68 €	7.221,68 €	1.620.000,00 €
16	- €	- €	-14.792,00 €	91.673,00 €	3.370,00 €	7.222,00 €	7.382,00 €	1.620.000,00 €
17	- €	- €	-29.584,75 €	92.175,71 €	3.434,31 €	7.382,17 €	7.703,13 €	1.620.000,00 €
18	- €	- €	-29.584,75 €	68.817,84 €	1.572,72 €	3.530,60 €	3.851,57 €	1.620.000,00 €
19	579.301,00 €	- €	-14.792,00 €	100.464,00 €	3.434,00 €	7.382,00 €	7.543,00 €	1.620.000,00 €
20	579.301,00 €	- €	- €	100.715,00 €	3.370,00 €	7.222,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €
21	386.201,00 €	- €	-14.792,00 €	76.353,00 €	1.573,00 €	3.531,00 €	3.691,00 €	1.620.000,00 €
22	- €	- €	- €	89.664,11 €	3.305,93 €	7.061,20 €	7.061,20 €	1.620.000,00 €
23	- €	- €	-14.792,38 €	91.171,07 €	3.305,93 €	7.061,20 €	7.221,68 €	1.620.000,00 €
24	- €	- €	- €	92.678,00 €	3.306,00 €	7.061,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €
25	386.201,00 €	59.170,00 €	- €	100.213,00 €	3.499,00 €	7.864,00 €	7.543,00 €	1.620.000,00 €
26	386.201,00 €	- €	- €	102.473,00 €	3.306,00 €	7.061,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €
27	579.301,00 €	59.170,00 €	- €	100.213,00 €	3.499,00 €	7.864,00 €	7.543,00 €	1.620.000,00 €
28	- €	- €	-14.792,00 €	55.004,00 €	1.252,00 €	2.728,00 €	2.889,00 €	1.620.000,00 €
29	- €	- €	-29.585,00 €	59.776,00 €	1.380,00 €	3.049,00 €	3.370,00 €	1.620.000,00 €
30	- €	- €	-14.792,00 €	55.506,00 €	1.316,00 €	2.889,00 €	3.049,00 €	1.620.000,00 €
31	- €	- €	-14.792,00 €	75.599,00 €	3.242,00 €	6.901,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €
32	- €	- €	-14.792,00 €	55.255,00 €	1.380,00 €	3.049,00 €	3.210,00 €	1.620.000,00 €
33	- €	- €	-14.792,00 €	55.758,00 €	1.444,00 €	3.210,00 €	3.370,00 €	1.620.000,00 €
34	193.100,00 €	29.585,00 €	- €	83.385,00 €	3.370,00 €	7.382,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €
35	193.100,00 €	29.585,00 €	- €	83.385,00 €	3.370,00 €	7.382,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €
36	- €	29.585,00 €	- €	88.911,00 €	3.306,00 €	7.222,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €
37	- €	29.585,00 €	- €	88.911,00 €	3.306,00 €	7.222,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €
38	- €	29.585,00 €	- €	87.404,00 €	3.306,00 €	7.222,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €
39	- €	29.585,00 €	- €	88.157,00 €	3.306,00 €	7.222,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €
40	- €	29.585,00 €	- €	87.404,00 €	3.306,00 €	7.222,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €
41	- €	29.585,00 €	- €	90.418,00 €	3.306,00 €	7.222,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €
42	- €	29.585,00 €	- €	102.976,00 €	3.563,00 €	7.864,00 €	7.703,00 €	1.620.000,00 €
43	386.201,00 €	- €	-14.792,00 €	77.860,00 €	1.573,00 €	3.531,00 €	3.691,00 €	1.620.000,00 €
44	193.100,00 €	- €	-29.585,00 €	99.711,00 €	3.434,00 €	7.382,00 €	7.703,00 €	1.620.000,00 €
45	386.201,00 €	- €	-29.585,00 €	97.952,00 €	3.499,00 €	7.543,00 €	7.864,00 €	1.620.000,00 €
46	579.301,00 €	29.585,00 €	- €	100.464,00 €	3.434,00 €	7.543,00 €	7.382,00 €	1.620.000,00 €

Abbildung A.14: Wandlungskosten für den Wandel zu s_3 der Lösungsbündel 1 bis 46

		Wandel $s_0 \rightarrow s_3$						
	SK	WOK		DWK			IWK	
ID	zus. Station	inv	desinv	plan	trans	int	desint	lost
47	193.100,00 €	2.367,00 €	-14.792,00 €	101.971,00 €	3.627,00 €	8.024,00 €	8.024,00 €	1.620.000,00 €
48	579.301,00 €	- €	- €	101.217,00 €	3.434,00 €	7.382,00 €	7.382,00 €	1.620.000,00 €
49	579.301,00 €	- €	- €	100.464,00 €	3.434,00 €	7.382,00 €	7.382,00 €	1.620.000,00 €
50	579.301,00 €	- €	-14.792,00 €	100.464,00 €	3.434,00 €	7.382,00 €	7.543,00 €	1.620.000,00 €
51	579.301,00 €	- €	- €	76.855,00 €	1.637,00 €	3.691,00 €	3.691,00 €	1.620.000,00 €
52	- €	2.367,00 €	- €	93.180,00 €	3.563,00 €	7.864,00 €	7.703,00 €	1.620.000,00 €
53	- €	- €	- €	90.920,00 €	3.563,00 €	7.703,00 €	7.703,00 €	1.620.000,00 €
54	579.301,00 €	- €	-29.585,00 €	102.222,00 €	3.178,00 €	6.740,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €
55	579.301,00 €	- €	-14.792,00 €	101.217,00 €	3.242,00 €	6.901,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €
56	579.301,00 €	- €	-29.585,00 €	100.213,00 €	3.306,00 €	7.061,00 €	7.382,00 €	1.620.000,00 €
57	579.301,00 €	- €	-29.585,00 €	100.213,00 €	3.306,00 €	7.061,00 €	7.382,00 €	1.620.000,00 €
58	- €	- €	- €	88.911,00 €	3.306,00 €	7.061,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €
59	579.301,00 €	- €	-14.792,00 €	90.920,00 €	3.370,00 €	7.222,00 €	7.382,00 €	1.620.000,00 €
60	579.301,00 €	- €	-14.792,00 €	91.673,00 €	3.370,00 €	7.222,00 €	7.382,00 €	1.620.000,00 €
61	- €	- €	-29.585,00 €	91.673,00 €	3.370,00 €	7.222,00 €	7.543,00 €	1.620.000,00 €
62	- €	- €	-29.585,00 €	69.069,00 €	1.509,00 €	3.370,00 €	3.691,00 €	1.620.000,00 €
63	- €	- €	- €	70.074,00 €	1.444,00 €	3.210,00 €	3.210,00 €	1.620.000,00 €
64	- €	- €	- €	67.813,00 €	1.444,00 €	3.210,00 €	3.210,00 €	1.620.000,00 €
65	- €	- €	-14.792,00 €	68.316,00 €	1.509,00 €	3.370,00 €	3.531,00 €	1.620.000,00 €
66	- €	- €	-29.585,00 €	68.316,00 €	1.509,00 €	3.370,00 €	3.691,00 €	1.620.000,00 €
67	- €	- €	-29.585,00 €	70.325,00 €	1.573,00 €	3.531,00 €	3.852,00 €	1.620.000,00 €
68	- €	- €	- €	92.176,00 €	3.434,00 €	7.382,00 €	7.543,00 €	1.620.000,00 €
69	- €	- €	-14.792,00 €	90.669,00 €	3.434,00 €	7.382,00 €	7.543,00 €	1.620.000,00 €
70	- €	- €	-14.792,00 €	91.673,00 €	3.370,00 €	7.222,00 €	7.382,00 €	1.620.000,00 €
71	386.201,00 €	- €	-29.585,00 €	91.673,00 €	3.370,00 €	7.222,00 €	7.543,00 €	1.620.000,00 €
72	386.201,00 €	- €	-14.792,00 €	76.101,00 €	1.637,00 €	3.691,00 €	3.852,00 €	1.620.000,00 €
73	386.201,00 €	29.585,00 €	- €	98.204,00 €	3.434,00 €	7.543,00 €	7.382,00 €	1.620.000,00 €
74	193.100,00 €	- €	-29.585,00 €	97.450,00 €	3.434,00 €	7.382,00 €	7.703,00 €	1.620.000,00 €
75	193.100,00 €	- €	-14.792,00 €	97.952,00 €	3.499,00 €	7.543,00 €	7.703,00 €	1.620.000,00 €
76	- €	- €	-44.377,00 €	104.985,00 €	3.434,00 €	7.382,00 €	7.864,00 €	1.620.000,00 €
77	- €	- €	-29.585,00 €	101.971,00 €	3.434,00 €	7.382,00 €	7.703,00 €	1.620.000,00 €
78	- €	- €	-44.377,00 €	104.985,00 €	3.434,00 €	7.382,00 €	7.864,00 €	1.620.000,00 €
79	- €	- €	-14.792,00 €	100.213,00 €	3.499,00 €	7.543,00 €	7.703,00 €	1.620.000,00 €
80	- €	- €	-14.792,00 €	79.618,00 €	1.701,00 €	3.852,00 €	4.012,00 €	1.620.000,00 €
81	579.301,00 €	59.170,00 €	- €	97.952,00 €	3.499,00 €	7.864,00 €	7.543,00 €	1.620.000,00 €
82	579.301,00 €	59.170,00 €	- €	99.711,00 €	3.434,00 €	7.703,00 €	7.382,00 €	1.620.000,00 €
83	386.201,00 €	59.170,00 €	- €	98.706,00 €	3.499,00 €	7.864,00 €	7.543,00 €	1.620.000,00 €
84	386.201,00 €	88.754,00 €	- €	99.711,00 €	3.434,00 €	7.864,00 €	7.382,00 €	1.620.000,00 €
85	386.201,00 €	59.170,00 €	- €	97.952,00 €	3.499,00 €	7.864,00 €	7.543,00 €	1.620.000,00 €
86	- €	- €	-14.792,00 €	91.171,00 €	3.306,00 €	7.061,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €
87	386.201,00 €	29.585,00 €	- €	99.962,00 €	3.370,00 €	7.382,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €
88	193.100,00 €	- €	- €	68.064,00 €	1.380,00 €	3.049,00 €	3.049,00 €	1.620.000,00 €
89	386.201,00 €	- €	-29.585,00 €	102.976,00 €	3.563,00 €	7.703,00 €	8.024,00 €	1.620.000,00 €
90	- €	- €	-14.792,00 €	58.018,00 €	1.444,00 €	3.210,00 €	3.370,00 €	1.620.000,00 €
91	193.100,00 €	29.585,00 €	- €	82.632,00 €	3.370,00 €	7.382,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €
92	386.201,00 €	29.585,00 €	- €	83.385,00 €	3.370,00 €	7.382,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €

Abbildung A.15: Wandlungskosten für den Wandel zu s_3 der Lösungsbündel 47 bis 92

		Wandel $s_0 \rightarrow s_3$						
	SK	WOK		DWK				IWK
ID	zus. Station	inv	desinv	plan	trans	int	desint	lost
93	386.201,00 €	29.585,00 €	- €	83.385,00 €	3.370,00 €	7.382,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €
94	- €	- €	-14.792,00 €	55.506,00 €	1.316,00 €	2.889,00 €	3.049,00 €	1.620.000,00 €
95	- €	- €	-14.792,00 €	55.255,00 €	1.380,00 €	3.049,00 €	3.210,00 €	1.620.000,00 €
96	- €	- €	- €	74.846,00 €	3.242,00 €	6.901,00 €	6.901,00 €	1.620.000,00 €
97	- €	- €	- €	53.748,00 €	1.380,00 €	3.049,00 €	3.049,00 €	1.620.000,00 €
98	- €	- €	-29.585,00 €	56.511,00 €	1.252,00 €	2.728,00 €	3.049,00 €	1.620.000,00 €
99	- €	- €	-14.792,00 €	53.497,00 €	1.252,00 €	2.728,00 €	2.889,00 €	1.620.000,00 €
100	386.201,00 €	- €	- €	95.692,00 €	3.691,00 €	8.024,00 €	8.024,00 €	1.620.000,00 €
101	386.201,00 €	29.585,00 €	- €	97.450,00 €	3.627,00 €	8.024,00 €	7.864,00 €	1.620.000,00 €
102	386.201,00 €	29.585,00 €	- €	97.450,00 €	3.627,00 €	8.024,00 €	7.864,00 €	1.620.000,00 €
103	386.201,00 €	29.585,00 €	- €	98.455,00 €	3.563,00 €	7.864,00 €	7.703,00 €	1.620.000,00 €
104	386.201,00 €	- €	- €	100.464,00 €	3.627,00 €	7.864,00 €	7.864,00 €	1.620.000,00 €
105	386.201,00 €	29.585,00 €	- €	97.450,00 €	3.627,00 €	8.024,00 €	7.864,00 €	1.620.000,00 €
106	386.201,00 €	- €	- €	97.701,00 €	3.563,00 €	7.703,00 €	7.703,00 €	1.620.000,00 €
107	386.201,00 €	29.585,00 €	- €	96.697,00 €	3.627,00 €	8.024,00 €	7.864,00 €	1.620.000,00 €
108	386.201,00 €	29.585,00 €	- €	97.450,00 €	3.627,00 €	8.024,00 €	7.864,00 €	1.620.000,00 €
109	579.301,00 €	29.585,00 €	- €	101.469,00 €	3.370,00 €	7.382,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €
110	579.301,00 €	59.170,00 €	- €	98.706,00 €	3.499,00 €	7.864,00 €	7.543,00 €	1.620.000,00 €
111	579.301,00 €	59.170,00 €	- €	98.957,00 €	3.434,00 €	7.703,00 €	7.382,00 €	1.620.000,00 €
112	193.100,00 €	- €	- €	99.711,00 €	3.434,00 €	7.382,00 €	7.382,00 €	1.620.000,00 €
113	193.100,00 €	- €	- €	101.971,00 €	3.434,00 €	7.382,00 €	7.382,00 €	1.620.000,00 €
114	386.201,00 €	29.585,00 €	- €	98.455,00 €	3.370,00 €	7.382,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €
115	386.201,00 €	29.585,00 €	- €	99.962,00 €	3.370,00 €	7.382,00 €	7.222,00 €	1.620.000,00 €
116	386.201,00 €	59.170,00 €	- €	97.952,00 €	3.306,00 €	7.382,00 €	7.061,00 €	1.620.000,00 €
Ref 1	579.301,00 €	- €	- €	100.213,00 €	3.499,00 €	7.543,00 €	7.543,00 €	1.620.000,00 €
Ref 2	579.301,00 €	- €	- €	89.915,00 €	2.375,00 €	5.135,00 €	5.135,00 €	1.620.000,00 €
Ref 3	386.201,00 €	- €	- €	88.157,00 €	2.439,00 €	5.296,00 €	5.296,00 €	1.620.000,00 €
Ref 4	193.100,00 €	- €	-14.792,00 €	83.887,00 €	2.375,00 €	5.135,00 €	5.296,00 €	1.620.000,00 €
Ref 5	386.201,00 €	29.585,00 €	- €	91.925,00 €	2.439,00 €	5.456,00 €	5.296,00 €	1.620.000,00 €
Ref 6	579.301,00 €	- €	-14.792,00 €	89.664,00 €	2.247,00 €	4.814,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €
Ref 7	579.301,00 €	29.585,00 €	- €	89.413,00 €	2.311,00 €	5.135,00 €	4.975,00 €	1.620.000,00 €
Ref 8	579.301,00 €	- €	- €	89.915,00 €	2.375,00 €	5.135,00 €	5.135,00 €	1.620.000,00 €
Ref 9	386.201,00 €	29.585,00 €	- €	91.925,00 €	2.439,00 €	5.456,00 €	5.296,00 €	1.620.000,00 €

Abbildung A.16: Wandlungskosten für den Wandel zu s_3 der Lösungsbündel 93 bis 116 und der auf der Referenzlösung basierenden Lösungsbündel

A.15 Übersicht der bewerteten Lösungsbündel

Abbildung A.17, Abbildung A.18 und Abbildung A.19 stellt eine Übersicht der bewerteten Lösungsbündel dar, die über eine ID gekennzeichnet sind. Von links nach rechts sind folgende weitere Informationen enthalten: Für die Greenfield-Fließbandabstimmung sind hervorgehoben die durchschnittliche Auslastung sowie die Anzahl genutzter Montagestationen und Arbeitsplätze angegeben. Nachfolgend sind die drei Zielfunktionswerte der Fließbandabstimmung aufgeführt. Die entstehende Überlast wird für das Szenario s_0 und den als p1 gekennzeichneten gewichteten Durchschnitt der Szenarien s_1 bis s_3 in Sekunden pro Schicht und monetär über den Nutzungszeitraum von jeweils 7 Jahren dargestellt. Weiterhin wird die Flexibilitätskennzahl sowohl explizit für das Szenario s_0 als auch für das gesamte Lösungsbündel ausgewiesen. Abschließend folgen die Bewertungen der Entscheidungskriterien und die hieraus resultierende Rangfolge.

Greenfield				Optimierung			Überlast				FKZ		Bewertung			
ID	Auslast.	# Stat	# AP	ZFW(gk)	ZFW(flex)	ZFW(wf)	s_0	p1	€ s_0	€ p1	s_0 ges	Kosten	Flex	WF	Rang	
1	71,43%	21	31	29.326.240 €	8,70 s ²	27.980.016 €	1994,2 s	2479,3 s	56.103 €	82.573 €	0,70	0,64	29.382.343 €	0,64	28.062.590 €	105
2	79,08%	21	28	26.956.343 €	12,35 s ²	26.745.133 €	2217,7 s	2579,9 s	62.392 €	85.923 €	0,63	0,59	27.018.734 €	0,59	26.831.057 €	39
3	73,43%	21	31	29.296.655 €	9,02 s ²	27.989.035 €	2014,1 s	2488,3 s	56.663 €	82.810 €	0,70	0,64	29.353.318 €	0,64	26.071.906 €	104
4	79,08%	21	28	26.768.184 €	10,00 s ²	26.729.378 €	2614,8 s	2758,6 s	73.562 €	91.874 €	0,70	0,64	26.841.746 €	0,64	26.821.252 €	127
5	67,10%	21	33	30.856.864 €	11,08 s ²	28.843.233 €	1682,0 s	2338,8 s	47.320 €	77.894 €	0,63	0,59	30.904.183 €	0,59	28.921.127 €	173
6	66,10%	20	33	30.679.355 €	11,88 s ²	30.053.120 €	1604,6 s	2069,9 s	45.143 €	68.936 €	0,70	0,72	30.724.498 €	0,72	30.122.056 €	108
7	85,16%	18	26	24.804.440 €	23,48 s ²	25.330.484 €	2849,0 s	2663,1 s	80.151 €	88.695 €	0,40	0,44	24.884.590 €	0,44	25.419.179 €	45
8	85,16%	18	26	24.611.547 €	19,16 s ²	25.321.307 €	2696,2 s	2594,4 s	75.852 €	86.404 €	0,50	0,51	24.687.399 €	0,51	25.407.712 €	14
9	85,16%	18	26	24.804.440 €	17,93 s ²	25.329.808 €	2845,8 s	2661,7 s	80.061 €	88.647 €	0,40	0,44	24.884.501 €	0,44	25.418.455 €	44
10	85,16%	18	26	24.804.440 €	15,58 s ²	25.329.883 €	2756,5 s	2621,5 s	77.551 €	87.310 €	0,40	0,44	24.881.990 €	0,44	25.417.193 €	43
11	82,01%	18	27	25.584.544 €	14,08 s ²	25.744.406 €	2908,3 s	2689,8 s	81.819 €	89.584 €	0,63	0,61	25.666.363 €	0,61	25.833.989 €	5
12	82,01%	18	27	25.554.960 €	14,27 s ²	25.761.181 €	2689,7 s	2591,4 s	75.669 €	86.307 €	0,63	0,61	25.630.628 €	0,61	25.847.487 €	4
13	85,16%	18	26	24.804.439 €	21,20 s ²	25.664.062 €	3055,5 s	2934,6 s	85.961 €	97.736 €	0,40	0,42	24.890.401 €	0,42	25.761.798 €	58
14	85,16%	18	26	24.804.439 €	23,02 s ²	25.772.033 €	2690,9 s	2495,4 s	75.703 €	83.110 €	0,40	0,43	24.880.142 €	0,43	25.855.143 €	56
15	82,01%	18	27	25.584.544 €	15,36 s ²	26.586.821 €	2750,4 s	2519,8 s	77.378 €	83.921 €	0,50	0,51	25.661.922 €	0,51	26.870.743 €	31
16	79,08%	18	28	26.394.233 €	16,44 s ²	27.586.993 €	2271,7 s	2400,1 s	63.911 €	79.934 €	0,23	0,30	26.458.143 €	0,30	27.666.927 €	115
17	79,08%	18	28	26.423.817 €	13,52 s ²	26.975.321 €	2374,9 s	2350,8 s	66.815 €	78.294 €	0,43	0,46	26.490.632 €	0,46	27.053.615 €	84
18	82,01%	18	27	25.643.713 €	17,49 s ²	26.120.454 €	2776,8 s	2531,7 s	78.120 €	84.317 €	0,23	0,32	25.721.833 €	0,32	26.204.771 €	100
19	79,08%	18	28	26.423.818 €	13,66 s ²	27.720.780 €	2673,8 s	2496,1 s	75.222 €	83.131 €	0,23	0,34	26.499.040 €	0,34	27.803.911 €	109
20	79,08%	18	28	26.423.818 €	15,39 s ²	26.484.967 €	2432,1 s	2561,3 s	68.424 €	85.304 €	0,43	0,44	26.492.241 €	0,44	26.570.271 €	86
21	82,01%	18	27	25.643.714 €	20,62 s ²	25.952.158 €	2445,7 s	2475,6 s	68.806 €	82.451 €	0,23	0,32	25.712.519 €	0,32	26.634.609 €	99
22	85,16%	18	26	24.804.440 €	19,68 s ²	25.661.123 €	3073,8 s	2912,3 s	86.477 €	96.993 €	0,55	0,54	24.890.917 €	0,54	25.978.116 €	13
23	73,81%	18	30	27.954.441 €	15,66 s ²	27.309.851 €	2186,3 s	2512,9 s	61.507 €	83.691 €	0,55	0,54	28.015.948 €	0,54	27.393.541 €	95
24	76,35%	18	29	27.144.752 €	15,37 s ²	26.908.458 €	2137,3 s	2490,8 s	60.128 €	82.956 €	0,55	0,54	27.204.880 €	0,54	26.991.415 €	72
25	76,35%	18	29	27.144.752 €	17,04 s ²	27.000.549 €	2323,1 s	2615,4 s	65.356 €	87.106 €	0,55	0,53	27.210.108 €	0,53	27.087.655 €	76
26	76,35%	18	29	27.144.752 €	11,95 s ²	29.345.503 €	2311,5 s	2366,7 s	65.030 €	78.822 €	0,55	0,62	27.209.782 €	0,62	29.424.325 €	65
27	76,35%	18	29	27.144.752 €	13,94 s ²	28.324.903 €	2376,4 s	2267,0 s	66.857 €	75.501 €	0,55	0,58	27.211.608 €	0,58	28.400.404 €	69
28	85,16%	19	26	25.011.533 €	15,07 s ²	26.840.671 €	3038,5 s	2484,1 s	85.484 €	82.731 €	0,48	0,53	25.097.017 €	0,53	26.923.402 €	16
29	73,81%	19	30	28.161.534 €	13,24 s ²	28.069.507 €	2122,1 s	2124,0 s	59.702 €	70.739 €	0,63	0,59	28.221.236 €	0,59	28.140.245 €	90
30	82,01%	19	27	25.791.637 €	14,49 s ²	26.836.729 €	2678,0 s	2374,1 s	75.340 €	79.070 €	0,55	0,54	25.866.977 €	0,54	26.915.799 €	24
31	71,43%	19	31	28.912.053 €	20,81 s ²	28.938.529 €	2075,5 s	2103,0 s	58.391 €	70.041 €	0,55	0,58	28.970.445 €	0,58	29.008.570 €	110
32	79,08%	18	28	26.571.741 €	13,65 s ²	27.252.885 €	2441,5 s	2267,7 s	68.689 €	75.526 €	0,55	0,54	26.640.430 €	0,54	27.328.412 €	62
33	76,35%	19	29	27.351.845 €	13,32 s ²	27.668.578 €	2284,5 s	2197,1 s	64.270 €	73.173 €	0,63	0,59	27.416.116 €	0,59	27.741.751 €	67
34	82,01%	19	27	25.791.637 €	16,10 s ²	26.324.556 €	2815,6 s	2747,4 s	79.212 €	91.502 €	0,55	0,53	25.870.849 €	0,53	26.416.057 €	22
35	79,08%	19	28	26.571.741 €	13,23 s ²	27.657.433 €	2509,0 s	2412,0 s	70.587 €	80.331 €	0,55	0,58	26.642.328 €	0,58	27.737.764 €	37

Abbildung A.17: Übersicht der Lösungsbündel 1 bis 35

Greenfield				Optimierung			Überlast				Bewertung					
ID	Auslast.	# Stat	# AP	ZFW(gk)	ZFW(flex)	ZFW(wf)	s0	p1	€ s0	€ p1	s0	ges	Kosten	Flex	WF	Rang
36	72,84%	21	31	29.237.485 €	12,90 s ²	28.127.312 €	1799,5 s	2086,7 s	50.625 €	69.496 €	0,45	0,46	29.288.111 €	0,46	28.196.808 €	125
37	73,81%	21	30	28.457.381 €	17,40 s ²	27.710.867 €	2027,8 s	2189,4 s	57.047 €	72.917 €	0,45	0,46	28.514.429 €	0,46	27.783.784 €	118
38	70,57%	21	32	30.017.589 €	12,09 s ²	28.542.738 €	1653,5 s	2021,0 s	46.519 €	67.308 €	0,60	0,57	30.064.108 €	0,57	28.610.047 €	120
39	67,10%	21	33	30.797.694 €	18,41 s ²	28.958.240 €	1548,1 s	1973,6 s	43.554 €	65.729 €	0,60	0,57	30.841.248 €	0,57	29.023.970 €	124
40	68,63%	21	32	30.017.589 €	12,59 s ²	28.542.738 €	1802,2 s	2087,9 s	50.702 €	69.537 €	0,70	0,64	30.068.291 €	0,64	28.612.275 €	113
41	68,63%	21	32	30.017.589 €	12,58 s ²	28.543.303 €	1432,5 s	1921,5 s	40.300 €	63.995 €	0,58	0,56	30.057.889 €	0,56	28.607.298 €	122
42	67,10%	21	33	30.797.694 €	16,19 s ²	29.853.193 €	1242,8 s	1947,1 s	34.964 €	64.849 €	0,60	0,65	30.832.657 €	0,65	29.918.042 €	117
43	73,81%	18	30	27.954.441 €	17,99 s ²	28.508.521 €	1882,1 s	2158,5 s	52.950 €	71.887 €	0,55	0,54	28.007.391 €	0,54	28.580.409 €	103
44	75,27%	18	30	27.984.026 €	15,62 s ²	28.731.221 €	1829,3 s	2183,6 s	51.464 €	72.725 €	0,70	0,64	28.035.489 €	0,64	28.803.946 €	75
45	79,08%	18	28	26.423.818 €	21,13 s ²	28.102.129 €	2447,5 s	2412,9 s	68.855 €	80.360 €	0,63	0,59	26.492.672 €	0,59	28.122.489 €	28
46	82,01%	18	27	25.584.544 €	10,97 s ²	27.637.321 €	2478,7 s	2630,7 s	69.734 €	87.616 €	0,38	0,50	26.564.277 €	0,50	27.724.937 €	49
47	85,16%	17	26	24.463.623 €	16,29 s ²	24.768.486 €	3067,7 s	2777,9 s	86.305 €	92.518 €	0,63	0,60	24.549.928 €	0,60	24.861.004 €	1
48	77,91%	18	28	26.394.233 €	11,82 s ²	28.038.545 €	2430,9 s	2609,2 s	68.388 €	86.899 €	0,40	0,51	26.462.621 €	0,51	28.125.445 €	68
49	77,91%	18	28	26.394.233 €	11,35 s ²	28.037.192 €	2634,6 s	2700,9 s	74.120 €	89.953 €	0,70	0,73	26.468.353 €	0,73	28.127.145 €	9
50	80,79%	18	27	25.643.714 €	16,84 s ²	27.606.902 €	2472,1 s	2627,8 s	69.547 €	87.517 €	0,63	0,67	27.513.261 €	0,67	27.694.419 €	3
51	77,91%	18	28	26.394.233 €	14,09 s ²	28.426.405 €	2377,0 s	2342,5 s	66.873 €	78.018 €	0,40	0,51	26.461.105 €	0,51	28.504.423 €	70
52	82,01%	18	27	25.391.652 €	10,74 s ²	28.001.710 €	2623,0 s	2609,6 s	73.794 €	86.911 €	0,63	0,67	25.465.446 €	0,67	28.088.620 €	2
53	85,16%	18	26	24.613.912 €	17,87 s ²	27.586.280 €	3053,0 s	2786,0 s	85.890 €	92.786 €	0,40	0,51	24.699.803 €	0,51	27.679.066 €	19
54	72,71%	18	30	27.984.026 €	19,92 s ²	29.470.866 €	2244,4 s	2442,5 s	63.144 €	81.346 €	0,55	0,62	28.047.169 €	0,62	29.552.212 €	87
55	75,22%	18	29	27.174.337 €	15,83 s ²	29.069.846 €	2041,8 s	2334,9 s	57.442 €	77.764 €	0,63	0,68	27.231.778 €	0,68	29.147.611 €	36
56	72,71%	18	30	27.984.026 €	18,44 s ²	29.470.941 €	1993,3 s	2313,1 s	56.078 €	77.038 €	0,28	0,42	28.040.104 €	0,42	29.547.979 €	121
57	75,22%	18	29	27.203.922 €	18,69 s ²	29.055.024 €	2099,3 s	2360,8 s	59.060 €	78.627 €	0,28	0,42	27.262.982 €	0,42	29.133.651 €	112
58	85,16%	18	26	24.804.439 €	22,51 s ²	25.567.586 €	3032,7 s	2745,8 s	85.320 €	91.449 €	0,40	0,44	24.889.760 €	0,44	25.659.034 €	48
59	82,01%	18	27	25.614.129 €	16,77 s ²	26.282.873 €	2824,1 s	2724,7 s	79.450 €	90.746 €	0,50	0,51	25.693.579 €	0,51	26.373.619 €	27
60	79,08%	18	28	26.394.233 €	14,62 s ²	26.998.111 €	2222,0 s	2453,8 s	62.511 €	81.723 €	0,23	0,32	26.456.744 €	0,32	27.779.834 €	111
61	79,08%	18	28	26.423.818 €	14,39 s ²	26.968.444 €	2406,4 s	2527,5 s	67.701 €	84.178 €	0,43	0,45	26.491.518 €	0,45	27.052.622 €	88
62	82,01%	18	27	25.643.714 €	18,47 s ²	26.550.840 €	2462,3 s	2552,6 s	69.272 €	85.015 €	0,23	0,30	25.712.985 €	0,30	26.635.855 €	106
63	75,22%	18	29	27.144.752 €	15,37 s ²	26.905.242 €	2257,6 s	2545,0 s	63.514 €	84.760 €	0,55	0,54	27.208.265 €	0,54	26.990.001 €	73
64	80,79%	18	27	25.584.544 €	18,94 s ²	26.074.200 €	2561,5 s	2681,7 s	72.064 €	89.315 €	0,63	0,59	25.656.608 €	0,59	26.163.515 €	6
65	75,22%	18	29	27.174.337 €	16,22 s ²	26.963.138 €	2314,8 s	2323,8 s	65.124 €	77.393 €	0,63	0,61	27.239.460 €	0,61	27.040.531 €	50
66	75,20%	18	29	27.203.922 €	19,09 s ²	26.952.199 €	2337,6 s	2334,0 s	65.765 €	77.735 €	0,45	0,48	27.269.687 €	0,48	27.029.934 €	93
67	77,91%	18	28	26.423.818 €	17,74 s ²	26.537.049 €	2663,7 s	2480,8 s	74.937 €	82.621 €	0,45	0,48	26.498.755 €	0,48	26.619.670 €	71
68	80,79%	18	27	25.614.129 €	15,55 s ²	26.570.555 €	2794,9 s	2539,8 s	78.631 €	84.589 €	0,50	0,51	25.692.759 €	0,51	26.655.143 €	33
69	77,91%	18	28	26.394.233 €	15,14 s ²	26.985.859 €	2607,6 s	2455,5 s	73.360 €	81.781 €	0,50	0,51	26.467.592 €	0,51	26.067.640 €	66
70	80,79%	18	27	25.614.129 €	15,21 s ²	26.571.559 €	2483,7 s	2399,8 s	69.874 €	79.924 €	0,50	0,51	25.684.003 €	0,51	26.651.482 €	32
71	79,08%	18	28	26.423.818 €	13,83 s ²	27.699.694 €	2262,8 s	2388,2 s	63.659 €	79.539 €	0,43	0,46	26.487.477 €	0,46	27.779.232 €	85
72	82,01%	18	27	25.643.714 €	17,86 s ²	27.331.158 €	2504,1 s	2304,7 s	70.449 €	76.758 €	0,23	0,34	25.714.162 €	0,34	27.407.916 €	96
73	85,16%	18	26	24.804.439 €	19,21 s ²	27.376.173 €	2904,6 s	2484,9 s	81.717 €	82.761 €	0,55	0,57	24.886.156 €	0,57	27.458.933 €	7
74	72,71%	18	30	27.984.026 €	20,42 s ²	29.205.341 €	1996,7 s	2002,9 s	56.173 €	66.706 €	0,48	0,53	28.040.198 €	0,53	29.272.047 €	107
75	75,22%	18	29	27.174.337 €	24,01 s ²	28.797.614 €	2423,7 s	2195,1 s	68.187 €	73.106 €	0,45	0,50	27.242.524 €	0,50	28.870.720 €	91
76	71,43%	21	31	29.326.240 €	10,16 s ²	29.419.631 €	2026,6 s	2016,4 s	57.016 €	67.155 €	0,70	0,68	29.383.257 €	0,68	29.486.786 €	61
77	79,08%	21	28	26.956.343 €	12,99 s ²	28.057.024 €	2339,9 s	2157,3 s	65.829 €	71.850 €	0,63	0,63	27.022.172 €	0,63	28.128.873 €	37
78	73,43%	21	31	29.326.240 €	10,16 s ²	29.419.631 €	2051,7 s	2027,6 s	57.720 €	67.530 €	0,70	0,68	29.383.960 €	0,68	29.487.161 €	98
79	79,08%	21	28	26.985.928 €	10,30 s ²	28.452.287 €	2552,0 s	2313,5 s	71.797 €	77.050 €	0,70	0,68	27.057.725 €	0,68	28.529.337 €	21
80	67,10%	21	33	30.886.449 €	12,32 s ²	30.402.908 €	1488,4 s	1834,9 s	41.873 €	61.109 €	0,63	0,63	30.928.322 €	0,63	30.464.017 €	119
81	85,16%	18	26	24.804.439 €	15,70 s ²	25.676.992 €	2963,3 s	2800,3 s	83.366 €	93.264 €	0,40	0,42	24.887.806 €	0,42	27.750.256 €	60
82	82,01%	18	27	25.584.544 €	14,19 s ²	26.093.134 €	2551,4 s	2615,0 s	71.780 €	87.092 €	0,63	0,59	25.656.324 €	0,59	26.180.226 €	8
83	85,16%	18	26	24.804.439 €	24,18 s ²	25.750.946 €	2779,3 s	2837,0 s	78.190 €	94.487 €	0,40	0,43	24.882.629 €	0,43	25.845.433 €	57
84	85,16%	18	26	24.774.855 €	19,79 s ²	25.767.057 €	2763,9 s	2830,1 s	77.758 €	94.257 €	0,50	0,50	24.852.613 €	0,50	25.861.314 €	58
85	85,16%	18	26	24.804.439 €	18,54 s ²	25.749.769 €	2688,4 s	2796,2 s	75.633 €	93.125 €	0,40	0,43	24.880.073 €	0,43	25.842.894 €	15
86	73,81%	18	30	27.954.441 €	18,42 s ²	27.471.476 €	1978,3 s	2153,1 s	55.656 €	71.707 €	0,55	0,53	28.010.097 €	0,53	27.543.183 €	101
87	85,16%	18	29	27.144.752 €	17,47 s ²	27.297.462 €	2364,1 s	2307,5 s	66.508 €	76.852 €	0,55	0,53	27.211.260 €	0,53	27.374.314 €	79
88	85,16%	19	26	25.011.533 €	17,80 s ²	25.994.093 €	2896,9 s	2547,3 s	81.499 €	84.838 €	0,48	0,48	25.093.032 €	0,48	26.078.931 €	89
89	73,81%	19	30	28.161.534 €	15,52 s ²	27.761.634 €	2137,4 s	2171,5 s	60.132 €	72.321 €	0,63	0,59	28.221.667 €	0,59	27.833.954 €	30
90	82,01%	19	27	25.791.637 €	14,83 s ²	26.744.707 €	2557,5 s	2342,3 s	71.950 €	78.009 €	0,55	0,54	25.866.587 €	0,54	26.822.716 €	23
91	71,43%	19	31	28.912.053 €	21,09 s ²	29.240.109 €	2007,0 s	2132,9 s	56.464 €	71.035 €	0,55	0,54	28.968.518 €	0,54	29.311.144 €	116
92	79,08%	19	28	26.571.741 €	13,14 s ²	28.089.425 €	2337,1 s	2223,9 s	65.751 €	74.635 €	0,55	0,58	26.637.492 €	0,58	28.163.493 €	40
93	76,35%	19	29	27.351.845 €	12,82 s ²	28.506.395 €	2072,1 s	2104,7 s	58.294 €	70.095 €	0,63	0,63	27.410.139 €	0,63	28.576.490 €	61
94	82,01%	19	27	25.791.637 €	14,35 s ²	27.256.916 €	2765,2 s	2361,0 s	77.794 €	78.634 €	0,55	0,58	25.869.431 €	0,58	27.335.550 €	15
95	79,08%	19	28	26.571.741 €	13,52 s ²	27.673.118 €	2549,2 s	2263,9 s	71.719 €	75.398 €	0,55	0,58	26.643.460 €	0,58	27.748.516 €	38
96	75,22%	19	29	27.131.734 €	16,66 s ²	28.108.396 €	2103,5 s	2115,6 s	59.179 €	70						

Greenfield				Optimierung			Überlast			FKZ		Bewertung				
ID	Auslast.	# Stat	# AP	ZFW(gk)	ZFW(flex)	ZFW(wf)	s0	p1	€ s0	€ p1	s0	ges	Kosten	Flex	WF	Rang
101	75,22%	19	29	27.322.260 €	15,86 s²	27.489.958 €	2139,9 s	2108,5 s	60.203 €	70.224 €	0,48	0,48	27.382.464 €	0,48	27.560.182 €	94
102	77,91%	19	28	26.542.156 €	19,72 s²	27.510.159 €	2305,0 s	2182,8 s	64.848 €	72.698 €	0,48	0,48	26.607.004 €	0,48	27.582.857 €	80
103	77,91%	19	28	26.542.156 €	18,77 s²	27.074.866 €	2330,2 s	2194,1 s	65.556 €	73.076 €	0,48	0,48	26.607.713 €	0,48	27.147.942 €	77
104	80,79%	19	27	25.791.637 €	17,99 s²	26.642.655 €	2706,6 s	2363,5 s	76.145 €	78.716 €	0,48	0,48	25.867.782 €	0,48	26.721.371 €	54
105	77,91%	19	28	26.542.156 €	15,50 s²	27.508.743 €	2434,8 s	2241,2 s	68.499 €	74.643 €	0,48	0,48	26.610.655 €	0,48	27.583.386 €	82
106	80,79%	19	27	25.791.637 €	15,91 s²	26.641.965 €	2429,3 s	2238,7 s	68.343 €	74.560 €	0,48	0,48	25.859.980 €	0,48	26.716.524 €	53
107	77,91%	19	28	26.542.156 €	18,29 s²	27.510.348 €	2614,5 s	2322,1 s	73.555 €	77.337 €	0,48	0,48	26.615.711 €	0,48	27.587.684 €	83
108	77,91%	19	28	26.542.156 €	15,50 s²	27.508.743 €	2397,6 s	2224,5 s	67.453 €	74.086 €	0,48	0,48	26.609.609 €	0,48	27.582.829 €	81
109	80,79%	18	27	25.584.544 €	14,72 s²	27.129.805 €	2489,9 s	2266,0 s	70.049 €	75.469 €	0,63	0,59	25.654.592 €	0,59	27.205.274 €	11
110	83,90%	18	26	24.804.439 €	17,25 s²	26.990.914 €	2751,6 s	2347,2 s	77.411 €	78.174 €	0,40	0,43	24.881.851 €	0,43	27.069.088 €	63
111	80,79%	18	27	25.584.544 €	19,20 s²	27.408.300 €	2841,2 s	2757,4 s	79.932 €	91.835 €	0,40	0,43	25.664.476 €	0,43	27.500.134 €	74
112	80,79%	18	27	25.584.544 €	12,39 s²	26.872.189 €	2844,3 s	2732,9 s	80.020 €	91.018 €	0,63	0,59	25.664.563 €	0,59	26.963.207 €	10
113	77,91%	18	28	26.364.648 €	12,41 s²	27.723.493 €	2593,7 s	2620,1 s	72.970 €	87.263 €	0,63	0,59	26.437.618 €	0,59	27.810.756 €	25
114	83,90%	18	26	24.804.439 €	16,57 s²	27.098.482 €	2989,4 s	2749,3 s	84.102 €	91.563 €	0,40	0,43	24.888.541 €	0,43	27.190.045 €	64
115	83,90%	18	26	24.804.439 €	15,88 s²	27.098.896 €	2857,4 s	2689,8 s	80.387 €	89.584 €	0,50	0,50	24.884.826 €	0,50	27.188.481 €	20
116	80,79%	18	27	25.554.960 €	15,47 s²	27.530.885 €	2748,1 s	2640,7 s	77.314 €	87.947 €	0,63	0,59	25.632.273 €	0,59	27.618.833 €	12
Ref 1	85,16%	18	26	25.614.129 €	13,00 s²	27.607.088 €	2907,8 s	2704,5 s	81.807 €	90.072 €	0,48	0,48	25.695.936 €	0,48	27.697.160 €	59
Ref 2	85,16%	18	26	25.614.129 €	15,28 s²	26.221.137 €	2907,8 s	2585,4 s	81.807 €	86.107 €	0,48	0,48	25.695.936 €	0,48	26.307.244 €	46
Ref 3	85,16%	18	26	25.614.129 €	14,41 s²	27.297.990 €	2907,8 s	2620,0 s	81.807 €	87.260 €	0,48	0,48	25.695.936 €	0,48	27.385.250 €	52
Ref 4	85,16%	18	26	25.614.129 €	15,27 s²	26.977.919 €	2907,8 s	2477,6 s	81.807 €	82.515 €	0,48	0,49	25.695.936 €	0,49	27.060.433 €	51
Ref 5	85,16%	18	26	25.614.129 €	14,56 s²	27.354.548 €	2907,8 s	2591,5 s	81.807 €	86.308 €	0,48	0,53	25.695.936 €	0,53	27.440.856 €	29
Ref 6	85,16%	18	26	25.614.129 €	14,21 s²	27.783.456 €	2907,8 s	2359,5 s	81.807 €	78.584 €	0,48	0,53	25.695.936 €	0,53	27.862.040 €	34
Ref 7	85,16%	18	26	25.614.129 €	16,66 s²	25.660.195 €	2907,8 s	2775,4 s	81.807 €	92.433 €	0,48	0,48	25.695.936 €	0,48	25.752.629 €	47
Ref 8	85,16%	18	26	25.614.129 €	14,37 s²	25.983.484 €	2907,8 s	2890,5 s	81.807 €	96.266 €	0,48	0,48	25.695.936 €	0,48	26.079.750 €	41
Ref 9	85,16%	18	26	25.614.129 €	16,64 s²	25.921.075 €	2907,8 s	2788,9 s	81.807 €	92.884 €	0,48	0,48	25.695.936 €	0,48	26.013.960 €	42

Abbildung A.19: Übersicht der Lösungsbündel 101 bis 116 und der auf der Referenzlösung basierenden Lösungsbündel

ID	S	Sl.1	Sl.2	Sl.3	Sl.4	Sl.5	Sl.6	Sl.7	Sl.8	Sl.9	Sl.10	Sl.11	Sl.12	Sl.13	Sl.14	Sl.15	Sl.16	Sl.17	Sl.18	Sl.19	Sl.20	Sl.21	
s ₀	BM	1,2,4	5								4	4	5			5							
	AP 1	6	4			19,22,24, 25,30				28,29,31,32,33, 34		49	54,62,71,72, 76,77			56,60,73,7 5,81,88	83,93			90,92,99 ,100			
	AP 2	1,2	5	3	7	8,14	11	2,13, 5	16,17,18, 21	20,26,36	23,27,35	37,38,39,40,4 48,47,48	50,55,63,65, 66,67,69	57,59,61 64,66	52,79	51,53,66,7 0,74,75,96	80,84,9 5	6,97	82,85,8 5	87,89,91 ,94,98			
	BM	1,2,4	5	5	5	5,7	4				1,3,6		4	5	5	5	5						
s ₁	BM	1,2,4	5							4		5				4							
	AP 1	6	5			25,30,35				19,20,28,2 8,31,32,33 34	37,38,39,40,41, 42,43,44,45,46, 47,48	55,58,59,72,7 6,77	58,70		79	81,84,96,9 7	91	92,99,1 00					
	AP 2	1,2	4	3	7	8,10	11, 12	13,14, 15	16,18,21, 23,24	17,22,26,2 7,36	49	50,63,64,69,7 4	52,57,60	53,54,66 68,67,7 5	51,61,62,6 8,71,73,78	80,90	88,93,9 5	82,85,8 6,89,94, 98	83,87				
	BM	1,2,4	5	5	5	7	5	4		1,3,6	4	4	5	5	5	5	4	5					
s ₂	BM	1,2,4	5							4		1,3,5,6				5							
	AP 1	6	5			24,26,30, 35				28,32	49	27,54,55,56			62,68,76,7 8,79			74,99,1 00	83	91,94			
	AP 2	1,2	4	3	7	8	12	14,15 36	16,18,20, 21,31,34, 36	19,29	17,22,25,37,39, 40,41,42,45,47	23,33,59,63,6 4,72,77	38,43,44,46, 48,52	50,51,53 57,65,6 9	61,71,73,7 48,52	85,96,97 5,86	66,67,8 8,93	88,60,7 0,89	80,84	89	82	81	
	BM	1,2,4	5	5	5	7	5	4			4	5	5	4	5	5	4	5	5	5	5		
s ₃	BM	1,2,4	5							4	1,3,4,6		4			4							
	AP 1	6	4			22,24,26,3 0,35				22,24,26,3 0,35	21,27	37,38,39,40,4 48,47,48	55,63,64,65, 76,77,78			58,60,70,7 1,74	84,86,8 8,94	97,99	83,85,87 ,96,100				
	AP 2	1	2	5	3	7	8	9,11, 2	10,13,14, 15	16,17,18,2 0,23,25,31 34	19,28,29,32,33, 36	49	50,57,69,73 52,61,75	66,67,72,7 9	51,53,54,5 0,58,62,68	80,91	82	81,89,90 92,93,9 5,98	89	82	81	81	
	BM	1,2,4	5	5	5	7	5	4			4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5		

BM 1: Manipulator, BM 2: Lastaufnahme Mittel, BM 3: Lastaufnahme Mittel Cockpit, BM 4: Aktuschrauber, BM 5: EC-Schrauber, BM 6: Stationäre Schraubendrehk, BM 7: Blindheuger

52

2

Abbildung A.21: Übersicht des auf Rang 2 platzierten Lösungsbündels sol_{ev,52}

ID	s		St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6	St.7	St.8	St.9	St.10	St.11	St.12	St.13	St.14	St.15	St.16	St.17	St.18	
	1,2,4	5																			
BM	1,2,4	5																			
AP 1	6	4							19,22,24, 25,30			28,29,31,32,33, 34	4	4	54,62,71,72, 76,77		5	56,60,73,7 5,81,88	83,93		90,92,99 ,100
S ₀																					
AP 2	1,2	5	3	7	8,14	11	2,13,1 5	9,10,1 16,17,18, 20,26,36	1,2,3,4,4,4,5 46,47,48	37,38,39,40,4 1,42,43,44,45		23,27,35	37,38,39,40,4 1,42,43,44,45 46,47,48	50,55,63,65, 66,67,69	57,59,61 64,68	52,79	5	51,53,56,7 0,74,78,96	80,84,9 5	82,85,8 6,97	87,89,91 94,98
BM	1,2,4	5	5						5,7	4		1,3,6		4	5	5		5		5	5
BM	1,2,4	5																			
AP 1	6	5							25,30,35 34		4	19,20,28,2 9,31,32,33 42,43,44,45,46, 47,48	5	5	58,70		4	81,92,96,9 7,98,100	91	84,85,8 6,87,89	
S ₁																					
AP 2	1,2	4	3	7	8,10 12	11,13,14, 15	9,10,1 12,15	16,18,21, 23,24	17,22,26,2 7,36	4		49	50,63,64,69,7 4	52,57,60	53,54,65 66,67,7 5	51,61,62,6 8,71,73,78	80,86,90	83,95	82,89,9 3,94		
BM	1,2,4	5	5																		
BM	1,2,4	5																			
AP 1	6	5							24,26,30		4	37,38,39,40,41, 42,43,44,45,46, 47,48	5	5			4	83,88		84,86,8 7,89	
S ₂																					
AP 2	1,2	4	3	7	8,13	11	2,14,1 5	9,10,1 2,14,1 5	16,18,20, 21,25,31, 34,36	7		49	50,60,65,66,6 9	52	57,58,77 7,76,78,79	51,55,56,6 9,90,92,95	80,81,85,8 00	93,97,1 4,96,98	82,91,9 4		
BM	1,2,4	5	5						5,7	4											
BM	1,2,4	5																			
AP 1	6	4							22,26,30,3 5		4	1,3,4,6	4	4				4	58,60,70,7 1,74	84,86,8 8,94	83,85,87 96,100
S ₃																					
AP 2	1	2	5	3	7	8	2	15	9,11,1 10,13,14, 16,17,18,2 0,24,25,34	2		31, 32,33,36	49	50,57,69,75	52,61,75	51,53,54,5 6,59,62,68	80,91	82	81,89,90 92,93,9 5,98		
BM	1,2,4	5	5																		
BM	1,2,4	5																			

BM 1: Manipulator, BM 2: Lastaufnahmeittel Tur, BM 3: Lastaufnahmeittel Cockpit, BM 4: Akkuschrauber, BM 5: EC-Schrauber, BM 6: Stationäre Schraublechtmk, BM 7: Blindnigelgerät

12
4

Abbildung A.23: Übersicht des auf Rang 4 platzierten Lösungsbündels sol_{ev,12}

ID	s	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6	St.7	St.8	St.9	St.10	St.11	St.12	St.13	St.14	St.15	St.16	St.17	St.18	
		1,2,4	5									4	4	5			4			
BM		1,2,4	5								4									
AP 1		6	4			19,22,24, 25,30,35				28,29,31,32,33, 34	49	54,62,71,72, 76,77				56,58,70,8 8	83,93		90,92,96 99,100	
S ₀		1,2	5	3	7	8,14	11	9,10,1 2,13,1 5	16,17,18, 21	20,26,36	23,27	37,38,39,40,4 1,42,43,44,45 46,47,48	50,55,63,65, 66,67,69	57,59,61 64,68	52,79	3,74,75,78, 81	80,84,9 5	82,85,8 5	87,89,91 94,98	
BM		1,2,4	5	5	5	5,7	4			1,3,6										5
BM		1,2,4	5							4		5								
AP 1		6	5			25,30,35				19,20,28,2 9,31,32,33 34	37,38,39,40,41, 42,43,44,45,46, 47,48	55,56,59,72,7 6,77	58,70		79	81,92,96,9 7,98,100	91	84,85,8 6,87,99		
S ₁		1,2	4	3	7	8,10	9,11, 12	13,14, 15	16,18,21, 23,24	17,22,26,2 7,36	49	50,63,64,69,7 4	52,57,60	53,54,65 66,67,7 5	51,61,62,6 8,71,73,78	80,88,90	83,95	82,89,9 3,94		
BM		1,2,4	5	5	5	5,7	4			1,3,6	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5
BM		1,2,4	5							4		5								
AP 1		6	5			24,26,30				19,28,29,3 2,33,35	37,38,39,40,41, 42,43,44,45,46, 47,48	54,59,64,70,7 2			53,61,62,6 3,68,71,73 74,75	63,88		84,86,8 7,99		
S ₂		1,2	4	3	7	8,13	11	9,10,1 2,14,1 5	16,18,20, 21,25,31, 34,36	17,22,23,2 7	49	50,60,65,66,6 9	52	57,58,77 7,76,78,79	80,81,85,8 9,90,92,95 00	93,97,1 00	82,91,9 4,96,98			
BM		1,2,4	5	5	5	5,7	4			1,3,6	4	4	5	5	4	5	5	4	4	4
BM		1,2,4	5							4	1,3,4,6		4							
AP 1		6	4			22,26,30,3 5				22,26,30,3 5	21,27	37,38,39,40,4 1,42,43,44,45 46,47,48	55,63,64,65, 76,77,78		56,60,70,7 1,74	84,86,8 8,94	97,99	83,85,87 96,100		
S ₃		1	2	5	3	7	8	9,11,1 2	10,13,14, 15	16,17,18,2 0,24,25,34 32,33,36	19,23,28,29,31, 32,33,36	49	50,57,69,73	52,61,75 9	51,53,54,5 6,59,62,68	80,91	82	81,89,90 92,93,9		
BM		1,2,4	5	5	5	5,7	5			4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5

BM 1: Manipulator, BM 2: Lastaufnahmeinstrument Tür, BM 3: Lastaufnahmeinstrument Cockpit, BM 4: Akkuschauber, BM 5: EC-Schauber, BM 6: Stationäre Schraubtechnik, BM 7: Blindriegelrat

Abbildung A.24: Übersicht des auf Rang 5 platzierten Lösungsbündels sol_{ev,11}

ID	s	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6	St.7	St.8	St.9	St.10	St.11	St.12	St.13	St.14	St.15	St.16	St.17	St.18
		1,2,4	5	6	5	3	7	8,13,14	9,10,11,15	16,17,18,21,22,23,24,25	19,20,28,29,30,31,32,33,34	37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48	50,51,54,58,61	55,56,65,66,67,68	63,64,68,70,74,75	58,73	63,74,75,82,86,96	83,93	
BM		1,2,4	5								1,3,4,6	4	5		5				
AP 1		6	5					30,35			21,27	49	53,54,55,62,64,70,71,72		58,73				
S ₀		1,2	4	3	7	8,13,14	11	9,10,11,15	16,17,18,21,22,23,24,25	19,28,29,31,32,33,34	37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48	50,51,54,58,61	55,56,65,66,67,68	63,64,68,70,74,75	52,56,79	51,60,67,78,84,88,90	80,91		
BM		1,2,4	5	5	5	5	5	5,7			4		4	5	5	4	5		
BM		1,2,4	5							4		5	5	5		5	5	4	
AP 1		6	5					25,30,35	19,20,28,29,30,31,32,33,34	37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48	52,72	59,62	63,64,68,70,74,75		81,92,96,97,98,100				
S ₁		1,2	4	3	7	8,10,12	15	9,11,13,14,15	16,18,21,23,24	17,22,26,27,36	49	50,51,54,58,61	55,56,65,66,67,68	67,69,73,78	71,77,79	80,88,90	83,95		
BM		1,2,4	5	5	5	5	5	4	4	1,3,6	4	5	5	4	4	5	5	5	
BM		1,2,4	5							4		5			5	5	4		
AP 1		6	5					24,26,30	19,28,29,30,31,32,33,35	37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48	54,59,64,70,72	53,61,62,63,66,71,73,74,75			83,85,86,89,91,92,99				
S ₂		1,2	4	3	7	8,9,11,12	14,15	10,13,14,15	16,18,20,21,25,31,34,36	17,22,23,27	49	50,60,65,66,69	52	57,58,77	51,55,56,60,61,64,9	88,93			
BM		1,2,4	5	5	5	5	5	4	4	1,3,6	4	4	5	4	4	5	4		
BM		1,2,4	5							4	1,3,4,6		4						
AP 1		6	4					22,26,30,35	19,28,29,30,31,32,33,34	37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48	55,63,64,65,76,77,78				58,60,70,71,74				
S ₃		1	2	5	3	7	8	9,11,12	10,13,14,15	16,17,18,21,24,25,34	19,23,28,29,31,32,33,36	49	50,57,69,73	66,67,72,79	51,53,54,55,69,62,68	80,91			
BM		1,2,4	5	5	5	5	5	7	5	4	4	4	5	5	5	5	5	5	

BM 1: Manipulator, BM 2: Lastaufnahmeittel Tur, BM 3: Lastaufnahmeittel Cockpit, BM 4: Akkuschauber, BM 5: EC-Schrauber, BM 6: Stationäre Schraubtechnik, BM 7: Blindheißgerät

64
6

Abbildung A.25: Übersicht des auf Rang 6 platzierten Lösungsbündels sol_{ev,64}

Rang	ID	s		Sl.1	Sl.2	Sl.3	Sl.4	Sl.5	Sl.6	Sl.7	Sl.8	Sl.9	Sl.10	Sl.11	Sl.12	Sl.13	Sl.14	Sl.15	Sl.16	Sl.17	Sl.18	Sl.19	Sl.20	Sl.21	
		1,2,4	5	6	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	BM	1,2,4	5																						
	AP 1	6	4	19,22,24, 25,30,35				28,29,31,32,33, 34					49	54,66,71,72, 76,77					56,58,70,8 8	83,93			90,92,96 .99,100		
	S ₀																								
	AP 2	1,2	5	3	7	8,14	11	9,10,11 16,17,18, 20,26,36	21	2,13,1		23,27	37,38,39,40,4 1,42,43,44,45 46,47,48	50,55,63,65, 66,67,69	57,69,61 .64,68	52,79	3,74,75,78 81	80,84,9 5	82,85,8 5	6,97 94,98					
	BM	1,2,4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	BM	1,2,4	5																						
	AP 1	6	5	25,30,35				19,20,28,2 9,31,32,33 34	41,44,45,46, 47,48			52,72	59,62	83,64,68 .70,74,7 5				81,92,96,9 7,98,100	91	84,85,8 6,87,99					
	S ₁																								
	AP 2	1,2	4	3	7	8,10	12	9,11, 13,14, 16,18,21, 17,22,26,2	7,36	23,24		49	50,51,54,58,6 1	55,56,65,66, 67,69,73,78	53,57,60 .76	71,77,79	80,88,90	83,85	82,89,9 3,94						
	BM	1,2,4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	BM	1,2,4	5																						
	AP 1	6	5	24,26,30				19,28,29,3 2,33,35	42,43,44,45,46, 47,48			52,54,59	53,61,63,7 1,73,74,75					83,88		84,86,8 7,89					
	S ₂																								
	AP 2	1,2	4	3	7	8	9,11, 10,13, 12,14,15	16,18,20, 21,25,31, 34,36	7			49	50,60,65,66,6 7,69,70	57,59,64,68, 77	72	2,76,78,79, 9,90,92,95	83,97,1 00	82,91,9 00	4,96,96						
	BM	1,2,4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	BM	1,2,4	5																						
	AP 1	6	5	22,26,30,35				37,38,39,40, 41,42,43,44, 45,46,47,48	1,3,4,6			21,27	37,38,39,40, 41,42,43,44, 45,46,47,48	55,63,64 6,78				72		58,70,7 1,74	84,86,88 .94	99,10 0	83,90, 92,95, 96		
	S ₃																								
	AP 2	1	2	5	4	3	7	8,12	11			9,10,13,14 15	16,17,18,20,24, 25,34	19,23,28,29,3 1,32,33,36	49	50,57,69	52,61,75	54,77	66,67,7 9	51,53,5 6,59,60, 80,91	97	81,85, 97,99, 98,99			
	BM	1,2,4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	

BM 1: Manipulator, BM 2: Lastaufnahme Mittel Tür, BM 3: Lastaufnahme Mittel Cockpit, BM 4: Akkuschauber, BM 5: EC-Schauber, BM 6: Stationäre Schraubtechnik, BM 7: Blindhegler

82
8

Abbildung A.27: Übersicht des auf Rang 8 platzierten Lösungsbündels sol_{ev,82}

ID	Rang	S ₀		S ₁		S ₂		S ₃		S ₄		S ₅		S ₆		S ₇		S ₈		S ₉		S ₁₀		S ₁₁		S ₁₂		S ₁₃		S ₁₄		S ₁₅		S ₁₆		S ₁₇		S ₁₈		S ₁₉		S ₂₀		S ₂₁						
		1,2,4	5	6	4	1,2,4	5	6	4	1,2,4	5	6	4	1,2,4	5	6	4	1,2,4	5	6	4	1,2,4	5	6	4	1,2,4	5	6	4	1,2,4	5	6	4	1,2,4	5	6	4	1,2,4	5	6	4	1,2,4	5	6	4					
BM																																																		
AP 1				24,26,30,35		19,28,29,32,33,34	49	63,64,65,71,72,78	5																																									
S ₀				8,9,11,12,13,16,18,20,14,15,21,22		37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48	25,31	50,53,55,60,64,57,59	5																																									
BM																																																		
BM																																																		
AP 1				25,30,36		19,20,28,29,31,32,33,34,44,45,46,47,48	49	52,72	5																																									
S ₁				8,10,11,12,13,14,15,23,24		50,51,54,56,61,67,69,73,78	49	55,56,65,66,67,69,73,78	5																																									
BM																																																		
BM																																																		
AP 1				24,26,30,36		17,22,25,27,30,40,41,42,45,47	49	46,52	5																																									
S ₂				9,11,10,13,12,14,15,36		23,33,59,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78	19,29	50,51,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78	5																																									
BM																																																		
BM																																																		
AP 1				22,26,30,35		37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48	21,27	50,55,57	5																																									
S ₃				9,10,13,14,15,8,12		16,17,18,20,24,25,34	9,10,13,14,15	49	52,61,75	5																																								
BM																																																		

BM 1: Manipulator, BM 2: Lastaufnahme Mittel Cockpit, BM 3: Lastaufnahme Mittel Tür, BM 4: Akkusdraht, BM 5: EC-Schrauber, BM 6: Stationäre Schraubtechnik, BM 7: Blindhegittel

Abbildung A.28: Übersicht des auf Rang 9 platzierten Lösungsbündels $sol_{ev,49}$

ID	s	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6	St.7	St.8	St.9	St.10	St.11	St.12	St.13	St.14	St.15	St.16	St.17	St.18	St.19	
S ₀	BM	0	1,2,4	5							1,3,6	4	5			4					
	AP 1	6	4						22,24,25,30,35		27	49	54,62,71,72,76,77			58,70,84,88	83,83			90,92,96,99,100	
	AP 2	1,2	5	3	7	8,13,14	11	9,10,11	16,17,18,20,26,36		19,23,28,29,31,32,33,34	37,38,39,40,41,42,43,44,45	50,55,63,65,66,67,69	57,59,61,64,68	52,56,79	73,74,75,78,81	80,85,95	82,86,97	87,89,91,94,98		
BM	1,2,4	5	5		5	5,7	4			4	0	4	4	5	5	5	5			5	
S ₁	BM	1,2,4	5							4		4	5				4				
	AP 1	6	3	13				12		10	25,30,35	19,20,28,29,31,32,33,34	37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48	50,63,64,69,74	58,70		79	81,92,99	84,85,86,87,89,91		
	AP 2	1,2	4	5	7	8	9	11	14	15	16,18,21,23,24	17,22,26,27,36	49	55,56,59,72,76,77	52,57,60	53,54,65,66,67,75	51,61,62,68,71,73,78	80,88,90	82,89,93,94		
BM	1,2,4	5	5		5	7			5	4	1,3,6	4	4	4	5	5	5			5	
S ₂	BM	1,2,4	5								1,3,6		5				5				
	AP 1	6	5					24			26,27	37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48	54,64,70			53,61,62,63,68,71,73,74,75	83,85,86,88	81,92,97,98	90,94,98		
	AP 2	1,2	4	3	7	8	9,11,12	10,13,14,15	16,21,23,25,35	17,18,20,22,29,31,32,34,38	19,28,30,33	49	50,59,60,65,66,69	52	57,58,77	72	51,55,56,60,81,88	82,87,90	88,93		
BM	1,2,4	5	5		5	7	5	4		4	4	4	5	5	5	5	4			4	
S ₃	BM	1,2,4										1,3,4,6		4							
	AP 1	6									22,24,26,30,35	21,27	37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48	55,63,64,77,78		56,60,70,71,74	84,86,88	87,99	83,85,86,89,91		
	AP 2	1	2	5	4	3	7	8,12	11	9,10,13,14,15	16,17,18,20,23,25,31,34	19,28,29,32,33,36	49	50,57,69,73	52,61,75	66,67,72,79	51,53,54,56,59,62,68	80,91	81,90,92,93,95,98		
BM	1,2,4							5,7		5,7	4	4	4	5	5	5	5			5	

BM 1: Manipulator; BM 2: Lastaufnahmemittel / Tür; BM 3: Lastaufnahmemittel Cockpit; BM 4: Akkuschauber; BM 5: EC-Schauber; BM 6: Stationäre Schraubtechnik; BM 7: Blindrieger

112
10

Abbildung A.29: Übersicht des auf Rang 10 platzierten Lösungsbündels sol_{ev,112}

Rang	ID	s	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6	St.7	St.8	St.9	St.10	St.11	St.12	St.13	St.14	St.15	St.16	St.17	St.18	St.19	St.20	St.21		
	BM		5	1,2,4									4	52,53,54,55,56	71	76,79,80	81,84,85,86,87,88	93,94							
	AP 1		4	6						24			49												
	S ₁		1,2	3	5	7	8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28	16,16,16,26	36,37,38,39,40,41,42,43,44	29,30,45,46,47,48	50,51,57,58	59,60,61	72,73,74,75,76,77,78,79	80,91,92,93,94,95,96	97	98,99,100									
	BM		1,2,4	5	5	5,7	4	5	4	1,3,4,6				4	5	5	5	4							
	BM		1,2,4	5						4			5	5	5	5	5	4							
	AP 1		6	5						25,30,35	19,20,28,29,30,31,32,33,34	34	47,48	52,72	59,62	63,64,68,70,74,75	81,84,96,97	91	92,99,100						
	S ₁		1,2	4	3	7	8,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28	16,18,21,23,24	17,22,26,27,28	49	50,51,54,56,58	55,56,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78	80,90	88,93,95,96	82,85,86	83,87									
	BM		1,2,4	5	5	5,7	4	5	4	1,3,6			4	5	5	4	5	4							
	Ref																								
	BM		1,2,4	5									1,3,6	5	5	5	5	5							
	AP 1		6	5						24			28,27	37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48	54,64,70										
	S ₂		1,2	4	3	7	8,13,11,12,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28	2,23,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,36	19,28,30,33	49	50,59,60,65,66,69	52	57,58,77	72	79	80,91	85	82,95,96	83,89,90,94						
	BM		1,2,4	5	5	5	5,7	4	5	4			4	5	5	5	4	5	4						
	BM		1,2,4	5									4	4	4	4	4	4							
	AP 1		6	4						26,30,35	36		28,29,32,33	37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48	58,60,70,71,74										
	S ₃		1	2	5	3	7	8	2	15	16,18,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34	17,19	21,27	49	50,57,69,73	52,61,75	66,67,72,79	51,55,54,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69	80,85,8	97	91	81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96			
	BM		1,2,4	5	5	5	7	5					1,3,4,6	4	5	5	5	5	5						

BM 1: Manipulator; BM 2: Lastaufnahmemittel Tür; BM 3: Lastaufnahmemittel Cockpit; BM 4: Akkuschrauber; BM 5: EC-Schrauber; BM 6: Stationäre Schraubtechnik; BM 7: Binntriebsgerät

Abbildung A.30: Übersicht des auf Rang 29 platzierten und auf der Referenzlösung basierenden Lösungsbündels

Lebenslauf

Persönliches

Name Johannes Klaus Benedikt Fisel
Geburtsdatum 20.01.1987
Geburtsort Biberach an der Riß

Ausbildung

2011 – 2013 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Master of Science, Wirtschaftsingenieurwesen
2007 – 2011 HTWG Konstanz
Bachelor of Engineering, Wirtschaftsingenieurwesen
2006 Pestalozzi Gymnasium Biberach an der Riß, Abitur

Berufstätigkeit

seit 12/2018 Robert Bosch GmbH, Technologieplaner und Projektleiter
Sondermaschinenbau
01/2018 – 04/2018 University of Wisconsin-Madison, USA, Forschungsaufenthalt
10/2015 – 11/2015 Global Advanced Manufacturing Institute (GAMI), Suzhou,
China, Forschungsaufenthalt
05/2014 – 09/2018 wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Tech-
nologie (KIT), Akademischer Mitarbeiter
01/2013 – 12/2016 Bam Larsson Designs GbR, Gründer und geschäftsführender
Gesellschafter
02/2012 – 08/2012 Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI),
Wissenschaftliche Hilfskraft
08/2008 – 11/2013 Nationale und internationale Praktika:
Albert Handtmann Metallgusswerk GmbH, Lean Management
Daimler AG, Projektmanagement Vorentwicklung
MAN Turbo & Diesel SE, Market Intelligence
Milechild (Uganda), IT
Robert Bosch GmbH (China), Strategischer Einkauf

Forschungsberichte aus dem wbk
Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16
Dr.-Ing. Martin Ochs

Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung

Band 17
Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik

Band 18
Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19
Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20
Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21
Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22
Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen

Band 24
Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25
Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünffachsigen Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme: Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung im Bereich der Montagesystemplanung

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch Rückführung von Qualitätsinformationen

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung in verteilten Strukturen

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattregelung

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer Untersuchungen beim Fräsen

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungs-elementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindeltriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspansprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmers

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90
Dr.-Ing. Dirk Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration

Band 91
Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92
Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung

Band 93
Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94
Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95
Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96
Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97
Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98
Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management- Systeme im Anlagenbau

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser Abrasivstrahlschneiden

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen Applikationsprotokollen

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönninger

Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikroteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und ganzheitlichen Produktionssystemen

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen in Trockenbearbeitungsprozessen

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere geometrische Maschinenbeurteilung

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung auf den Bereich der Mikrobearbeitung

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels Industrierobotern

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden
in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms
within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau
mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der
Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskraftrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für μ MIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptiven Kugelgewindetrieben

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauße

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebsselementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren
ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit
der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage