

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

TUM School of Engineering and Design

System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Martin Schreiber

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz:

Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

2. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Die Dissertation wurde am 30.09.2021 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 17.02.2022 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

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

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

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

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

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV), am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München (TUM) sowie als Gastwissenschaftler am Department of Industrial Engineering der Stellenbosch University, Südafrika.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für die wohlwollende Unterstützung dieser Arbeit und die Förderung meiner Tätigkeit am Institut. Herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk für die Übernahme des Korreferates und bei Frau Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Herrn Prof. Dr. Corné Schutte danke ich für den wissenschaftlichen Austausch während meines dreimonatigen Forschungsaufenthaltes.

Darüber hinaus danke ich allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts sowie den Projektpartnern, die mich während der Projekt- und Lehraufgaben begleitet haben. Mein ausdrücklicher Dank gilt Dr.-Ing. Jan Klöver-Koch, Kilian Vernickel, Prof. Dr.-Ing. Stefan Braunreuther, Dr.-Ing. Lucas Kiefer, Dr.-Ing. Benedikt Sager, Dr.-Ing. Sebastian Gillen und Dr.-Ing. Thorsten Klein für die Besprechungen sowie die wertvollen Anmerkungen zu meiner Arbeit. Dies hat es mir ermöglicht, die Arbeit qualitativ abzurunden. Carl und Tanja Du Plessis sowie Steyn de Wet danke ich für ihre herzliche Gastfreundschaft in Südafrika. Darüber hinaus danke ich allen Studierenden, insbesondere Maria Teresa Garicano Nuez und Fabian Zech, die mich im Rahmen Ihrer Studienarbeiten tatkräftig bei der Ausarbeitung meiner Dissertation unterstützt haben.

Mein größter Dank gilt meiner Familie. Von ganzen Herzen danke ich meinen Großeltern Irmgard und Hans, die meinen Lebensweg stets nach Kräften unterstützen sowie meinen Eltern Sibylle und Matthias, welche mir stets mit Rat und Tat zur Seite stehen und maßgeblich zum Gelingen des Promotionsvorhabens beigetragen haben. Euch sei diese Arbeit gewidmet.

München, im März 2022

Martin Schreiber

Inhaltsverzeichnis

Abstract	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
Modellnotation	XI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Problemstellung	3
1.3 Zielsetzung	7
1.4 Spezifizierung des Betrachtungsbereiches	8
1.4.1 Betrachtungsbereich Produktionssystem	8
1.4.2 Betrachtungsbereich Produktionsplanung	10
1.4.3 Betrachtungsbereich Instandhaltungsplanung	14
1.5 Wissenschaftstheoretische Einordnung und Forschungsmethode	18
1.6 Aufbau der Arbeit	19
2 Grundlagen	21
2.1 Entscheidungstheorie	21
2.1.1 Begriffe der Entscheidungstheorie	21
2.1.2 Ablauf von Entscheidungsprozessen	22
2.1.3 Multikriterielle Entscheidungsprobleme	23
2.2 Multikriterielle Optimierung	25
2.2.1 Formulierung von Optimierungsmodellen	26
2.2.2 Lösungsverfahren für multikriterielle Optimierungsmodelle	28
2.2.3 Algorithmen zur Lösung von Optimierungsmodellen	32
2.3 Informationssysteme in produzierenden Unternehmen	33
2.3.1 Systeme der Produktionsplanung und -steuerung	33
2.3.2 Systeme der Instandhaltungsplanung und -steuerung	34

3	Anforderungen	35
3.1	Anforderungen aus der anwendungsorientierten Wissenschaft	35
3.2	Anforderungen aus den Planungsbereichen	36
4	Stand der Erkenntnisse	39
4.1	Klassifikation der Forschungsrichtungen in der Literaturanalyse	39
4.2	Literaturanalyse	40
4.2.1	Ansätze zur Modellierung von Produktionssystemen und planungsrelevanten Informationen	41
4.2.2	Ansätze zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung	44
4.3	Forschungsdefizit und Handlungsbedarf	55
5	System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung	59
5.1	Lösungsansatz	59
5.2	Konzeptionierung der Systemelemente	61
5.2.1	Informationsmodelle	61
5.2.2	Multikriterielles Optimierungsmodell	62
5.2.3	Methode	65
5.3	Systemüberblick	67
5.4	Fazit	67
6	Informationsmodelle	69
6.1	Informationsmodell der Ressourcen des Produktionssystems	70
6.2	Informationsmodell der Leistungen	76
6.3	Verbindung der Informationsmodelle	77
7	Multikriterielles Optimierungsmodell	81
7.1	Modellbildung	81
7.1.1	Festlegung der Struktur der Zeit	82
7.1.2	Spezifizierung des Leistungsportfolios	84
7.1.3	Nebenbedingungen	85
7.1.4	Zielsystem	90
7.2	Mathematisches Modell	99
7.2.1	Nebenbedingungen	100
7.2.2	Zielsystem	114

8 Methode	125
8.1 Identifikation des Handlungsbedarfes	126
8.1.1 Intern induzierter Handlungsbedarf	126
8.1.2 Extern induzierter Handlungsbedarf	132
8.2 Definition der Aufgabenstellung	132
8.2.1 Definition der Systemgrenze und des Aggregationsniveaus	132
8.2.2 Auswahl des Leistungsportfolios und der Entscheidungsdimensionen	133
8.2.3 Definition des Planungshorizontes und der Planungsperioden	134
8.2.4 Ermittlung der Planungsrestriktionen	135
8.3 Präzisierung der Zielsysteme	135
8.4 Datenerhebung	136
8.5 Entwicklung von Handlungsalternativen	139
8.6 Bewertung	139
8.7 Auswahl	140
9 Anwendung und Bewertung des Systems	141
9.1 Pilotanwendung des Systems	141
9.1.1 Identifikation des Handlungsbedarfes	142
9.1.2 Definition der Aufgabenstellung	142
9.1.3 Präzisierung der Zielsysteme	147
9.1.4 Datenerhebung	148
9.1.5 Entwicklung von Handlungsalternativen	149
9.1.6 Bewertung	154
9.1.7 Auswahl	156
9.2 Erkenntnisse aus der Pilotanwendung	157
9.3 Bewertung der Zielerreichung	158
9.4 Bewertung der Wirtschaftlichkeit	160
9.4.1 Aufwand	160
9.4.2 Nutzen	161
9.4.3 Verallgemeinerte Bewertung der Wirtschaftlichkeit	164
9.5 Bestehende Limitationen und Anwendungsfälle	165
10 Zusammenfassung und Ausblick	167
10.1 Zusammenfassung	167
10.2 Ausblick	170

Inhaltsverzeichnis

Literaturverzeichnis	171
Abbildungsverzeichnis	196
Tabellenverzeichnis	199
Anhang	201
Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	223

Abstract

The increasing number of manufacturing resources, which need to be maintained, and efficiency requirements are forcing manufacturing companies to improve production and maintenance effectiveness by a mutual consideration of both planning functions in an integrated planning process. The complexity of the planning process requires a system supporting decision-makers to determine efficient performance process sequences and improving the decision-making process.

This research presents a system for integrated production and maintenance planning consisting of a technical and a social subsystem. The technical subsystem contains information models of production and maintenance resources in manufacturing systems and performance processes. Furthermore, it includes a mixed-integer, multi-objective, linear optimization model for integrated production and maintenance planning. In the objective system of the mathematical model the strategic success factors of manufacturing companies of costs, time, quality and flexibility are incorporated. The multi-objective model is solved using goal programming. The social subsystem incorporates the method for integrated production and maintenance planning, which aims to guide decision makers in production and maintenance planning through the individual steps of the integrated planning process. The method is based on the synthesis of the prescriptive decision theory, which therefore enables consensus in the decision-making process by determining and selecting actions alternatives based on objective criteria.

A pilot application of the system for integrated production and maintenance planning for a manufacturing company of household appliances for high quality dishwashers is presented. The gained insights from the pilot application show, that the developed system supports the determination of efficient performance process sequences and the decision-making process in an integrated planning. In summary the system enables an effective production and maintenance planning and contributes to an economic efficiency of manufacturing companies.

Abkürzungsverzeichnis

Acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.
AHP	Analytic Hierarchy Process
AVR	Abnutzungsvorrat
APS	Advanced Planning and Scheduling
BDE	Betriebsdatenerfassung
BRD	Bundesrepublik Deutschland
bzw.	beziehungsweise
CIRP	International Academy for Production Engineering
CLSP	Capacitated Lot-Sizing Problem
CMS	Condition Monitoring System
CPLEX	in der Programmiersprache C implementierter Simplex-Algorithmus
CPS	Cyber-physische Systeme
CRISP-DM	Cross-Industry Standard Process for Data Mining
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DLSP	Discrete Lot-Sizing and Scheduling Problem
ERP	Enterprise Resource Planning
et al.	et alii
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
Fraunhofer IGCV	Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV
GLSMSP	General Lot-Sizing and Maintenance Scheduling Problem
gdw	genau dann, wenn
GLMSP-MR-MT	General Lot-Sizing and Maintenance Scheduling Problem with Multiple Resources and Maintenance Teams
GLSP	General Lot-Sizing and Scheduling Problem

Abkürzungsverzeichnis

IBM	International Business Machines Corporation
IDEF	Icam-Definition-Methode
i. d. R.	in der Regel
IH	Instandhaltung
ILOG	Intelligence Logiciel
IP	Instandhaltungsplanung
IPS	Instandhaltungsplanung und -steuerung
ISO	International Organization for Standardization
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
KPI	Key Performance Indicator
MADM	Multi Attribute Decision Making
max	maximiere
MCDM	Multi Criteria Decision Making
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution System
MILP	Mixed Integer Linear Programming
min	minimiere
MIP	Mixed Integer Programming
MODM	Multi Objective Decision Making
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTR	Mean Time To Repair
NIP	Nebenbedingungen der integrierten Planung
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OpenServ4P	Offene, intelligente Services für die Produktion
OPL	Optimization Programming Language
OR	Operations Research
PLSP	Proportional Lot-Sizing and Scheduling Problem
PLSP-SC-M	Proportional Lot-Sizing and Scheduling Problem with Setup Classes and Maintenance
PMS	Performance Measurement System
PP	Produktionsplanung
PPS	Produktionsplanung und -steuerung

RUL	Remaining Useful Life
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
s. t.	subject to
TUM	Technische Universität München
u. d. N.	unter den Nebenbedingungen
UML	Unified Modelling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
vgl.	vergleiche
WGP	Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e.V.

Modellnotation

Einheiten

$[GE]$	Geldeinheiten
$[LE]$	Leistungseinheiten
$[ZE]$	Zeiteinheiten

Indexmengen und Indizes

$b \in B$	Menge der Betriebsmodi
$e \in E$	Menge der Equipments
$l \in L$	Menge der Linien
$l \in L^{FP}$	Menge der Linien der Endprodukte der Produktionsleistungen des Leistungsportfolios
$l \in L^{IP}$	Menge der Linien der Zwischenprodukte der Produktionsleistungen des Leistungsportfolios
$l \in L^P$	Menge der Linien der Zwischen- und Endprodukte der Produktionsleistungen des Leistungsportfolios: $L^{FP} \cup L^{IP}$
$m \in M$	Menge der Maschinen
$p \in P$	Menge der Leistungen
$p \in P^{COE}$	Menge der zustandsorientierten Instandhaltungsleistungen für Equipments e des Leistungsportfolios
$p \in P^{COM}$	Menge der zustandsorientierten Instandhaltungsleistungen für Maschinen m des Leistungsportfolios
$p \in P^{FP}$	Menge der Endprodukte der Produktionsleistungen des Leistungsportfolios
$p \in P^{IP}$	Menge der Zwischenprodukte der Produktionsleistungen des Leistungsportfolios
$p \in P^P$	Menge der Produktionsleistungen des Leistungsportfolios
$p \in P^{TME}$	Menge der zeitorientierten Instandhaltungsleistungen des Leistungsportfolios

Modellnotation

$p \in P^{TPME}$	Menge der Zwischen- und Endprodukte der Produktionsleistungen sowie der zeitorientierten Instandhaltungsleistungen des Leistungsportfolios
$p \in P^{VP}$	Menge der virtuellen Leistungen des Leistungsportfolios
$s \in S$	Menge der Mikroperioden
$t \in T$	Menge der Makroperioden

Mehrdimensionale Indexmengen und Indizes

BOM	$\subseteq P \times P$ repräsentiert eine Leistung-Leistung-Beziehung, wobei $(p_1, p_2) \in PLMEB^P$ genau dann, wenn (gdw) das Zwischenprodukt p_1 für das Endprodukt p_2 benötigt wird
LLP	$\subseteq L \times L \times P$ repräsentiert eine Linie-Linie-Leistung-Beziehung, wobei $(l_1, l_2, p) \in PLMEB^P$ gdw eine Materialflussbeziehung zwischen Linie l_1 und Linie l_2 für das Produkt p besteht
MB	$\subseteq M \times B$ repräsentiert eine Maschine-Betriebsmodus-Beziehung, wobei $(m, b) \in PLMEB$ gdw die Maschine m mit dem Betriebsmodus b betrieben werden kann
MBB	$\subseteq M \times B \times B$ repräsentiert eine Maschine-Betriebsmodus-Betriebsmodus-Beziehung, wobei $(m, b_1, b_2) \in PLMEB$ gdw die Maschine m von dem Betriebsmodus b_1 auf den Betriebsmodus b_2 wechseln kann
MPPEE	$\subseteq P \times M \times P \times P \times E \times E$ repräsentiert eine Maschine-Leistung-Leistung-Equipment-Equipment-Beziehung, wobei $(m, p_1, p_2, e_1, e_2) \in PLMEB$ gdw ein Wechsel auf der Maschine m von der Leistung p_1 auf die Leistung p_2 oder ein Wechsel von Equipment e_1 auf das Equipment e_2 oder deren Kombination erfolgen kann
PLMEB	$PLMEB^{COE} \cup PLMEB^{COM} \cup PLMEB^{FP} \cup PLMEB^{IP} \cup PLMEB^{TIE} \cup PLMEB^{TIM} \cup PLMEB^{VP}$ repräsentiert die Menge aller bestehenden Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Beziehungen

$PLMEB^{COE}$	$\subseteq P \times L \times M \times E \times B$ repräsentiert eine bestehende Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Beziehung, wobei $(p, l, m, e, b) \in PLMEB^{COE}$ gdw die zustandsorientierte Instandhaltungsleistung p für das Equipment e auf der Linie l auf der Maschine m mit dem Betriebsmodus b befähigt ist
$PLMEB^{COM}$	$\subseteq P \times L \times M \times E \times B$ repräsentiert eine bestehende Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Beziehung, wobei $(p, l, m, e, b) \in PLMEB^{COM}$ gdw die zustandsorientierte Instandhaltungsleistung p für die Maschine m auf der Linie l mit dem Equipment e und Betriebsmodus b befähigt ist
$PLMEB^{COME}$	$PLMEB^{COE} \cup PLMEB^{COM}$ repräsentiert die Menge aller bestehenden Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Beziehungen der zustandsorientierten Instandhaltungsleistungen des Leistungsportfolios für Equipments e und Maschinen m
$PLMEB^{FP}$	$\subseteq P \times L \times M \times E \times B$ repräsentiert eine bestehende Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Beziehung, wobei $(p, l, m, e, b) \in PLMEB^{FP}$ gdw das Endprodukt p der Produktionsleistungen auf der Linie l auf der Maschine m mit dem Equipment e und Betriebsmodus b befähigt ist
$PLMEB^{IP}$	$\subseteq P \times L \times M \times E \times B$ repräsentiert eine bestehende Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Beziehung, wobei $(p, l, m, e, b) \in PLMEB^{IP}$ gdw das Zwischenprodukt p der Produktionsleistungen auf der Linie l auf der Maschine m mit dem Equipment e und Betriebsmodus b befähigt ist
$PLMEB^P$	$PLMEB^{FP} \cup PLMEB^{IP} \cup PLMEB^{VP}$ repräsentiert die Menge aller bestehenden Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Beziehungen der Produktionsleistungen sowie der virtuellen Leistungen des Leistungsportfolios
$PLMEB^{TCOE}$	$PLMEB^{COE} \cup PLMEB^{TE}$ repräsentiert die Menge aller zeit- und zustandsorientierten Instandhaltungsleistungen des Leistungsportfolios für Equipments e

$PLMEB^{TIE}$	$\subseteq P \times L \times M \times E \times B$ repräsentiert eine bestehende Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Beziehung, wobei $(p, l, m, e, b) \in PLMEB^{TIE}$ gdw die zeitorientierte Instandhaltungsleistung p für das Equipment e auf der Linie l auf der Maschine m mit dem Betriebsmodus b befähigt ist
$PLMEB^{TIM}$	$\subseteq P \times L \times M \times E \times B$ repräsentiert eine bestehende Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Beziehung, wobei $(p, l, m, e, b) \in PLMEB^{TIM}$ gdw die zeitorientierte Instandhaltungsleistung p für die Maschine m auf der Linie l mit dem Equipment e und Betriebsmodus b befähigt ist
$PLMEB^{TME}$	$PLMEB^{TIE} \cup PLMEB^{TIM}$ repräsentiert die Menge aller bestehenden Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Beziehungen der zeitorientierten Instandhaltungsleistungen für Equipments e und Maschinen m des Leistungsportfolios
$PLMEB^{TPME}$	$PLMEB^P \cup PLMEB^{TIE} \cup PLMEB^{TIM}$ repräsentiert die Menge aller bestehenden Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Beziehungen der Produktionsleistungen sowie der zeitorientierten Instandhaltungsleistungen für Equipments e und Maschinen m des Leistungsportfolios
$PLMEB^{VP}$	$\subseteq P \times L \times M \times E \times B$ repräsentiert eine bestehende Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Beziehung, wobei $(p, l, m, e, b) \in PLMEB^{VP}$ gdw die virtuelle Leistung p des Leistungsportfolios auf der Linie l auf der Maschine m mit dem Equipment e und Betriebsmodus b befähigt ist (erforderlich aus modellierungstechnischen Gründen)
PME	$\subseteq P \times M \times E$ repräsentiert eine bestehende Leistung-Maschine-Equipment-Beziehung, wobei $(p, m, e) \in PME$ gdw die Leistung p auf der Maschine m mit dem Equipment e befähigt ist
PE^{COE}	$\subseteq P \times E$ repräsentiert eine bestehende Leistung-Equipment-Beziehung, wobei $(p, e) \in PE^{COE}$ gdw die zustandsorientierte Instandhaltungsleistung p für das Equipment e befähigt ist
PM^{COM}	$\subseteq P \times M$ repräsentiert eine bestehende Leistung-Maschinen-Beziehung, wobei $(p, m) \in PM^{COM}$ gdw die zustandsorientierte Instandhaltungsleistung p für die Maschine m befähigt ist

Planerische und technische Parameter

$befPEP_{plmeb}$	$(p, l, m, e, b) \in PLMEB$, aktiv einsetzbare Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Beziehung (erforderlich aus modellierungstechnischen Gründen)
$befLLP_{plmeb}$	$(l_1, l_2, p) \in LLP$, materialflusstechnisch nutzbare Linie-Linie-Leistung-Beziehung (erforderlich aus modellierungstechnischen Gründen)
$BigM$	hinreichend große Zahl (erforderlich aus modellierungstechnischen Gründen)
cap_m	Kapazität von Maschine m ; $[ZE]$
dem_{pt}	$p \in P^{TPME}$, Bedarf an Leistung p in Makroperiode t ; $[LE]$
BAC_p^{INI}	$p \in P^{TPME}$, initialer Rückstand der Leistung p zu Beginn des Planungshorizontes; $[LE]$
$cBAC_{pt}$	$p \in P^{TPME}$, Strafkosten einer im Vergleich zum Bedarfszeitpunkt verspäteten Leistung p in Makroperiode t ; $[GE]$
$cCHB_{mb_1b_2}$	$(m, b_1, b_2) \in MBB$, Wechselkosten von dem Betriebsmodus b_1 auf den Betriebsmodus b_2 auf der Maschine m ; $[GE]$
$cINV_{pt}$	$p \in P^{TPME}$, Vorlaufkosten der Lagerung bzw. der vorzeitigen Durchführung einer Leistung p in Makroperiode t ; $[GE]$
COE_{pe}^{INI}	$(p, e) \in PE^{COE}$, initialer Zustandswert des Equipments e zu Beginn des Planungshorizontes
COE_{pe}^{LIM}	$(p, e) \in PE^{COE}$, Zustandswert des Equipments e für die Durchführung der zustandsorientierten Instandhaltungsleistung p
COE_{pe}^{MAX}	$(p, e) \in PE^{COE}$, Verschleißgrenze des Equipments e
COM_{pm}^{INI}	$(p, m) \in PM^{COM}$, initialer Zustandswert der Maschine m zu Beginn des Planungshorizontes
COM_{pm}^{LIM}	$(p, m) \in PM^{COM}$, Zustandswert der Maschine m für die Durchführung der zustandsorientierten Instandhaltungsleistung p
COM_{pm}^{MAX}	$(p, m) \in PM^{COM}$, Verschleißgrenze der Maschine m
$cPEP_{plmeb}$	$(p, l, m, e, b) \in PLMEB$, Kosten der Durchführung des Leistungserstellungsprozesses für eine Einheit der Leistung p ; $[GE]$
$cSET_{mp_1p_2e_1e_2}$	$(m, p_1, p_2, e_1, e_2) \in MPPEE$, Wechselkosten auf der Maschine m von der Leistung p_1 auf die Leistung p_2 oder ein Wechsel von Equipment e_1 auf das Equipment e_2 oder deren Kombination; $[GE]$

Modellnotation

$cTRA_{mp_1p_2e_1e_2}$	$(m, p_1, p_2, e_1, e_2) \in MPPEE$, Transportkosten für den Wechsel von der Leistung p_1 auf die Leistung p_2 oder von Equipment e_1 auf das Equipment e_2 oder deren Kombination auf der Maschine m ; [GE]
DR_{pt}^{MIN}	$p \in P^{FP}$, minimale Lieferzuverlässigkeit des Endproduktes p der Produktionsleistungen; [LE]
INV_p^{INI}	$p \in P^{TPME}$, initialer Lagerbestand des Produktes p der Produktionsleistungen bzw. Volumen der vorzeitig durchgeführten Instandhaltungsleistung p zu Beginn des Planungshorizontes; [LE]
SET_{plmeb}^{INI}	$(p, l, m, e, b) \in PLMEB$, initialer Zustandswert der Maschine m zu Beginn des Planungshorizontes bzgl. der Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Beziehungen
INV_p^{MAX}	$p \in P^{TPME}$, maximaler Lagerbestand des Produktes p der Produktionsleistungen bzw. maximales Volumen der vorzeitig durchgeführten Instandhaltungsleistung p ; [LE]
INV_p^{MIN}	$p \in P^{TPME}$, minimaler Lagerbestand des Produktes p der Produktionsleistungen; [LE]
$mrc_{p_1p_2}$	$(p_1, p_2) \in BOM$, Materialbedarfskoeffizient der Produktstruktur für das Produkt p_1 zur Herstellung einer Einheit des Produktes p_2 der Produktionsleistungen; [LE]
pbz_{mt}	Planbelegungszeit der Maschine m in Makroperiode t
$tCHB_{mb_1b_2}$	$(m, b_1, b_2) \in MBB$, Wechselzeit von dem Betriebsmodus b_1 auf den Betriebsmodus b_2 auf der Maschine m ; [ZE]
$tDEC_p$	$p \in P^{TPME}$, Zeit zur Koordination für im Vergleich zum Bedarfszeitpunkt verspätete Leistung p ; [ZE]
$tHAP_p$	$p \in P^{TPME}$, Zeit der Handhabung eines Produktes p der Produktionsleistungen im Lager bzw. zusätzliche Zeit für im Vergleich zum Bedarfszeitpunkt vorab durchgeführte zeitorientierte Instandhaltungsleistung p ; [ZE]
$tPEP_{plmeb}$	$(p, l, m, e, b) \in PLMEB$, Zeit des Leistungserstellungsprozesses für eine Einheit der Leistung p ; [ZE]
$tSET_{mp_1p_2e_1e_2}$	$(m, p_1, p_2, e_1, e_2) \in MPPEE$, Wechselzeit von der Leistung p_1 auf die Leistung p_2 oder vom Equipment e_1 auf das Equipment e_2 oder deren Kombination auf der Maschine m ; [ZE]

weo_{plmeb}^E	$(p, l, m, e, b) \in PLMEB^P$, Verschleißrate des Equipments e der befähigten Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Beziehung je Einheit des Produktes p der Produktionsleistungen
weo_{plmeb}^M	$(p, l, m, e, b) \in PLMEB^P$, Verschleißrate der Maschine m der befähigten Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Beziehung je Einheit des Produktes p der Produktionsleistungen

Parameter für die Normierung der Zielgrößen

CO^{max}	Obergrenze der Zielgröße Kosten; $[GE]$
CO^{min}	Untergrenze der Zielgröße Kosten; $[GE]$
FL^{max}	Obergrenze der Zielgröße Flexibilität; $[LE]$
FL^{min}	Untergrenze der Zielgröße Flexibilität; $[LE]$
QU^{max}	Obergrenze der Zielgröße Qualität
QU^{min}	Untergrenze der Zielgröße Qualität
TI^{max}	Obergrenze der Zielgröße Zeit; $[ZE]$
TI^{min}	Untergrenze der Zielgröße Zeit; $[ZE]$

Parameter für die Goal-Programming-Methode

GW^{CO+}	Gewichtungsfaktor der positiven Abweichung der Zielgröße Kosten
GW^{CO-}	Gewichtungsfaktor der negativen Abweichung der Zielgröße Kosten
GW^{FL+}	Gewichtungsfaktor der positiven Abweichung der Zielgröße Flexibilität
GW^{FL-}	Gewichtungsfaktor der negativen Abweichung der Zielgröße Flexibilität
GW^{QU+}	Gewichtungsfaktor der positiven Abweichung der Zielgröße Qualität
GW^{QU-}	Gewichtungsfaktor der negativen Abweichung der Zielgröße Qualität
GW^{TI+}	Gewichtungsfaktor der positiven Abweichung der Zielgröße Zeit
GW^{TI-}	Gewichtungsfaktor der negativen Abweichung der Zielgröße Zeit
ZW^{CO}	Vorgegebener Zielwert der Zielgröße Kosten; $[GE]$
ZW^{FL}	Vorgegebener Zielwert der Zielgröße Flexibilität; $[LE]$
ZW^{QU}	Vorgegebener Zielwert der Zielgröße Qualität
ZW^{TI}	Vorgegebener Zielwert der Zielgröße Zeit; $[ZE]$

Kontinuierliche Entscheidungsvariablen

$fACTB_{tsm}$	$\geq 0, m \in M$, aktive Zeit eines Betriebsmodus auf einer Maschine m in Mikroperiode s der Makroperiode t
fDR_{tp}	$\geq 0, p \in P^{FP}$, Lieferzuverlässigkeit des Endproduktes p in der Makroperiode t unter Berücksichtigung aller Leistungsstufen der Produktionsleistung
fDR_{tp}^{FP}	$\geq 0, p \in P^{FP}$, Lieferzuverlässigkeit des Endproduktes p in der Makroperiode t unter Berücksichtigung der Leistungsstufe der Produktionsleistung zur Herstellung des Endproduktes
fDR_{tp}^{IP}	$\geq 0, p \in P^{IP}$, Lieferzuverlässigkeit des Zwischenproduktes p in der Makroperiode t unter Berücksichtigung der Leistungsstufe der Produktionsleistung zur Herstellung des Zwischenproduktes
$fEND_{tspe}^{COE}$	$\geq 0, (p, e) \in PE^{COE}$, Zustandswert des Equipments e der Leistung p zum Ende der Mikroperiode s der Makroperiode t
$fEND_{tspm}^{COM}$	$\geq 0, (p, m) \in PM^{COM}$, Zustandswert der Maschine m der Leistung p zum Ende der Mikroperiode s der Makroperiode t
$fFCAP_{tsm}$	$\geq 0, m \in M$, Leerzeit in der Mikroperiode s der Makroperiode t auf der Maschine m
fFL_{tplmeb}^M	$\geq 0, (p, l, m, e, b) \in PLMEB^P$, Flexibilität in der Makroperiode t auf der Maschine m
fFL_{tplmeb}^{FPM}	$\geq 0, (p, l, m, e, b) \in PLMEB^{FP}$, Flexibilität als Anzahl an Endprodukten p der Produktionsleistungen, welche in der Makroperiode t auf der Maschine m zusätzlich produziert werden können
$fFL_{tp_1, lmebp_2}^{IPM}$	$\geq 0, (p_1, l, m, e, b) \in PLMEB^{IP}, p_2 \in P^{FP}$, Flexibilität als Anzahl an Zwischenprodukten p_1 der Produktionsleistungen, welche in der Makroperiode t auf der Maschine m zusätzlich produziert werden können
fFL_{tplmeb}^{FP}	$\geq 0, (p, l, m, e, b) \in PLMEB^P$, Flexibilität als Anzahl an Endprodukten p der Produktionsleistungen, welche in der Makroperiode t zusätzlich produziert werden können
fFL_{tplmeb}^{FPP}	$\geq 0, (p, l, m, e, b) \in PLMEB^P$, Flexibilität als Prozent an Endprodukten p der Produktionsleistungen, welche in der Makroperiode t zusätzlich produziert werden können
$fRELE_{tsm}$	$\geq 0, m \in M$, Freigabezeitpunkt des Equipments e in der Mikroperiode s der Makroperiode t auf der Maschine m

$fSTA_{tspe}^{COE}$	$\geq 0, (p, e) \in PE^{COE}$, Zustandswert des Equipments e der Leistung p zu Beginn der Mikroperiode s der Makroperiode t
$fSTA_{tspm}^{COM}$	$\geq 0, (p, m) \in PM^{COM}$, Zustandswert der Maschine m der Leistung p zu Beginn der Mikroperiode s der Makroperiode t
$fSTAS_{tsm}$	$\geq 0, m \in M$, Startzeitpunkt der Mikroperiode s der Makroperiode t auf der Maschine m

Ganzzahlige Entscheidungsvariablen

$iBAC_{pt}$	$\geq 0, p \in P^{TPME}$, Volumen des in Makroperiode t im Vergleich zum Bedarfszeitpunkt im Rückstand befindlichen Leistung p
$iINV_{pt}$	$\geq 0, p \in P^{TPME}$, Volumen der in Makroperiode t im Lager befindlichen Produktes p der Produktionsleistungen bzw. im Vergleich zum Bedarfszeitpunkt vorab durchgeführten Instandhaltungsleistung p
$iPEPV_{tsplmeb}$	$\geq 0, (p, l, m, e, b) \in PLMEB$, Volumen der in Mikroperiode s der Makroperiode t durchgeführten Einheiten der Leistung p auf Linie l auf der Maschine m mit dem Equipment r und mit dem Betriebsmodus b
$iTRA_{l_1, l_2, pt}$	$\geq 0, (l_1, l_2, p) \in LLP$, Volumen der in der Makroperiode t von Linie l_1 nach Linie l_2 transportierten Produktes p

Binäre Entscheidungsvariablen

$bBAC_{pt}$	$\in \{0, 1\}, p \in P^{TPME}$, 1 wenn in Makroperiode t im Vergleich zum Bedarfszeitpunkt im Rückstand befindliche Einheiten der Leistung p existieren, 0 sonst
$bCHB_{tmb_1, b_2}$	$\in \{0, 1\}, (m, b_1, b_2) \in MBB$, 1 wenn in Mikroperiode s der Makroperiode t ein Wechsel von Betriebsmodus b_1 nach Betriebsmodus b_2 an Maschine m stattfindet, 0 sonst
$bCHPE_{tsp_1, p_2, e_1, e_2}$	$\in \{0, 1\}, (p_1, p_2, e_1, e_2) \in MPPEE$, 1 wenn in Mikroperiode s der Makroperiode t ein Wechsel an Maschine m von Leistung p_1 zu Leistung p_2 oder von Equipment e_1 zu Equipment e_2 oder deren Kombination stattfindet, 0 sonst
bFL_{tm}^{FPM}	$\in \{0, 1\}$, 1 wenn in Makroperiode t an Maschine m im Vergleich zum Bedarfszeitpunkten im Lieferrückstand befindliche Endproduktes p der Produktionsleistungen existieren, 0 sonst

Modellnotation

bFL_{tmp}^{IPM}	$\in \{0, 1\}$, $p \in P^{FP}$, 1 wenn in Makroperiode t an Maschine m im Vergleich zu den Bedarfszeitpunkten im Lieferrückstand befindliche Zwischenprodukte zur Produktion des Endproduktes p der Produktionsleistungen existieren, 0 sonst
bFL_{tmp}^{PM}	$\in \{0, 1\}$, $p \in P^P$, 1 wenn in Makroperiode t an Maschine m im Vergleich zu den Bedarfszeitpunkten im Lieferrückstand befindliche Produkte p der Produktionsleistungen existieren, 0 sonst
$bFOLS_{ts_1m_1s_2m_2}$	$\in \{0, 1\}$, $(m_1, m_2) \in M$, 1 wenn in Makroperiode t der Startzeitpunkt der Mikroperiode s_1 der Maschine m_1 später startet als der Startzeitpunkt der Mikroperiode s_2 der Maschine m_2 , 0 sonst
$bINV_{pt}$	$\in \{0, 1\}$, $p \in P^{TME}$, 1 wenn in Makroperiode t Lagerbestand des Produktes p der Produktionsleistungen oder eine im Vergleich zum Bedarfszeitpunkt vorzeitig durchgeführte Einheit der Instandhaltungsleistung p existiert, 0 sonst
$bUSE_{tsplmbe}$	$\in \{0, 1\}$, $(p, l, m, e, b) \in PLMEB$, 1 wenn in Mikroperiode s der Makroperiode t die befähigte Leistung p der Linie l der Maschine m des Equipments e mit dem Betriebsmodus b aktiv ist, 0 sonst
FL_{mp}^{INIPM}	$\in \{0, 1\}$, $p \in P^P$, 1 wenn zu Beginn des Planungshorizontes an Maschine m im Vergleich zu den Bedarfszeitpunkten im Lieferrückstand befindliche Produkte p der Produktionsleistungen existieren, 0 sonst

Entscheidungsvariablen für die Goal-Programming-Methode

δ^{CO+}	≥ 0 , Positive Abweichung von der Zielvorgabe der Kosten
δ^{CO-}	≥ 0 , Negative Abweichung von der Zielvorgabe der Kosten
δ^{TI+}	≥ 0 , Positive Abweichung von der Zielvorgabe der Zeit
δ^{TI-}	≥ 0 , Negative Abweichung von der Zielvorgabe der Zeit
δ^{QU+}	≥ 0 , Positive Abweichung von der Zielvorgabe der Qualität
δ^{QU-}	≥ 0 , Negative Abweichung von der Zielvorgabe der Qualität
δ^{FL+}	≥ 0 , Positive Abweichung von der Zielvorgabe der Flexibilität
δ^{FL-}	≥ 0 , Negative Abweichung von der Zielvorgabe der Flexibilität

Entscheidungsausdrücke

<i>CO</i>	Zielgröße Kosten; [GE]
<i>COBA</i>	Strafkosten für die im Vergleich zum Bedarfszeitpunkt verspäteten Leistungen; [GE]
<i>COCB</i>	Kosten für die Wechsel von Betriebsmodi; [GE]
<i>COCE</i>	Kosten für zustandsorientierte Instandhaltungsleistungen von Equipments; [GE]
<i>COCM</i>	Kosten für zustandsorientierte Instandhaltungsleistungen von Maschinen; [GE]
<i>COIN</i>	Vorlaufkosten für die Anzahl der im Lager befindlichen bzw. vorab durchgeführten Leistungseinheiten; [GE]
<i>COMA</i>	Kosten für die Produktionsleistungen; [GE]
<i>COPE</i>	Kosten für den Wechsel von Leistungen oder Equipments oder deren Kombination; [GE]
<i>COTE</i>	Kosten für zeitorientierte Instandhaltungsleistungen von Equipments; [GE]
<i>COTM</i>	Kosten für zeitorientierte Instandhaltungsleistungen von Maschinen; [GE]
<i>COTR</i>	Kosten für die transportierten Equipments; [GE]
<i>FL</i>	Zielgröße Flexibilität; [LE]
<i>FLFP</i>	Anzahl zusätzlicher Produkte der Produktionsleistungen des Leistungsportfolios; [LE]
<i>NU^{CO}</i>	Nutzwert für die Zielgröße Kosten
<i>NU^{FL}</i>	Nutzwert für die Zielgröße Flexibilität
<i>NU^{QU}</i>	Nutzwert für die Zielgröße Qualität
<i>NU^{TI}</i>	Nutzwert für die Zielgröße Zeit
<i>QU</i>	Zielgröße Qualität
<i>QUDR</i>	Lieferzuverlässigkeit der Endprodukte der Produktionsleistungen des Leistungsportfolios
<i>TI</i>	Zielgröße Zeit; [ZE]
<i>TICB</i>	Zeit für den Wechsel von Betriebsmodi; [ZE]
<i>TICE</i>	Zeit für zustandsorientierte Instandhaltungsleistungen von Equipments; [ZE]
<i>TICM</i>	Zeit für zustandsorientierte Instandhaltungsleistungen von Maschinen; [ZE]

Modellnotation

<i>TIDE</i>	Zeit für die Koordination im Vergleich zum Bedarfszeitpunkt verspäteten Leistungen; [ZE]
<i>TIHA</i>	Zeit für Handhabung für die im Vergleich zum Bedarfszeitpunkt vorab durchgeführten Leistungen; [ZE]
<i>TIMA</i>	Zeit für die Produktionsleistungen; [ZE]
<i>TIPE</i>	Zeit für den Wechsel von Leistungen oder Equipments oder deren Kombination; [ZE]
<i>TITE</i>	Zeit für zeitorientierte Instandhaltungsleistungen von Equipments; [ZE]
<i>TITM</i>	Zeit für zeitorientierte Instandhaltungsleistungen von Maschinen; [ZE]

1 Einleitung

Die Effizienz und Effektivität der Leistungsprozesse im Produktionssystem bilden die Basis für den Erfolg produzierender Unternehmen. Der Planung der Leistungen kommt dabei eine außerordentliche Bedeutung zu. Sie bestimmt den Ablauf der Leistungserstellung der Produktion zur bedarfsgerechten Herstellung qualitativ hochwertiger Produkte zu wettbewerbsfähigen Kosten sowie den Ablauf der Leistungen der Instandhaltung zur Erhaltung und Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Ressourcen im Produktionssystem. Folglich sind die Produktions- und Instandhaltungsplanung für den Erfolg produzierender Unternehmen zentrale Funktionen. Die vorliegende Arbeit widmet sich der zielgerichteten integrierten Planung von Produktions- und Instandhaltungsleistungen in Produktionssystemen.

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die Produktion von Industriegütern stellt nach wie vor das Rückgrat der deutschen Wirtschaft dar und sichert den Wohlstand Deutschlands (ACATECH 2015, S. 11; ABELE & REINHART 2011, S. 6). Die ausschlaggebenden Erfolgsfaktoren deutscher produzierender Unternehmen im internationalen Wettbewerb stellen nach HENKE ET AL. (2019, S. 6) und ACATECH (2015, S. 11) Qualität, Zuverlässigkeit sowie Funktionalität dar. Darüber hinaus ist die effiziente und effektive Ausführung der Leistungsprozesse von Produktion und Instandhaltung die Basis für niedrige Produktionskosten und hohe Liefertermintreue (BERLAK 2003, S. 11; NAGARUR & KAEWPLANG 1999, S. 248). Die Effizienz und die Effektivität der Leistungsprozesse ergeben sich aus der möglichst zielgerichteten Transformation der Produktionsfaktoren (DANGELMAIER 2009, S. 26). Es gilt die optimale Festlegung u. a. von Größen, Eigenschaften und zeitlichen Abläufen zu finden (PRINZ 2016, S. 61; PAULICK 2003, S. 652).

In den letzten Jahren wirken *technische*, *gesetzliche* und *betriebswirtschaftliche Einflüsse* auf die Produktionssysteme. Die *technischen Einflüsse* umfassen u. a. die voranschreitende Automatisierung und die Integration von Cyber-physischen Systemen (CPS). Sie

1 Einleitung

führen zum einen zu einer steigenden produktionstechnischen Leistungsfähigkeit und zum anderen zu einer Zunahme der Anzahl instand zu haltender Ressourcen im Produktionssystem (HENKE ET AL. 2019, S. 6; ACATECH 2015, S. 7). Als *gesetzliche Einflüsse* wirken u. a. verschärfte Umwelt- und Arbeitsschutzvorschriften, welche regelmäßige Inspektionen und Wartung erfordern (KALUZA ET AL. 1994, S. 1). Die *betriebswirtschaftlichen Einflüsse* umfassen u. a. den steigenden Anteil der Instandhaltungskosten sowie die Produktivitätswerte. Die Automatisierung der Produktionssysteme führt zu einer Stagnation oder Rationalisierung des an der Produktion beteiligten Personals (VDI 2895; W. KLEIN 1988, S. 2–3). Hingegen sind Instandhaltungsleistungen in hohem Maße kontextabhängig und mit menschlicher Arbeitsleistung verbunden, wodurch sie nur schwer automatisierbar sind (HENKE ET AL. 2019, S. 6; ALCALDE RASCH 2000, S. 35). Dies führt zu einem steigenden Anteil der Instandhaltungskosten (ALCALDE RASCH 2000, S. 34–35). Hoch automatisierte Produktionssysteme und CPS sind für ihren wirtschaftlichen Betrieb aufgrund der Investitionskosten hoch auszulasten (STRUNZ 2012, S. 9). Dies bedingt hohe Anlagenzuverlässigkeiten und Verfügbarkeiten, deren Erhalt und Verbesserung in den Verantwortungsbereich der Instandhaltung fällt (ACATECH 2015, S. 17). Der Verantwortungsbereich der Instandhaltung umfasst allein in Deutschland ein Maschinen- und Anlagenvolumen von über 2,2 Billionen Euro (ACATECH 2015, S. 7, S. 13). Mit der Vermeidung von Störungen und den drei- bis fünfmal höheren Folgekosten führen die Leistungen der Instandhaltung für die deutsche Industrie zur Erwirtschaftung von Anlagenverfügbarkeiten und Produktivitätswerten im Gegenwert von jährlich rund einer Billion Euro (ACATECH 2015, S. 7, S. 14).

Diese Einflüsse führen zu einer Zunahme der Bedeutung der Instandhaltung. Des Weiteren haben sie Auswirkungen auf die Interaktionen von Produktions- und Instandhaltungsplanung. Zwischen beiden Planungsbereichen bestehen Interdependenzen, welche aus der Planung und Nutzung derselben oder zueinander in Beziehung stehender Ressourcen des Produktionssystems rühren (MISHRA & SHRIVASTAVA 2020, S. 949). Die Leistungserstellungsprozesse zur Herstellung der Produkte beanspruchen die zeitlichen Kapazitäten der Ressourcen sowie verursachen Abnutzung und Verschleiß. Dies führt zu Bedarf an Instandhaltungsleistungen. Folglich verursacht die Primärleistung der Produktion Sekundärleistungen der Instandhaltung zur Sicherung der Leistungsfähigkeit und Effizienz (KRÖNING 2014, S. 15–16; GÖSSINGER & KALUZNY 2010, S. 4). Instandhaltungsleistungen erfordern i. d. R. den Stillstand der jeweiligen Ressourcen, wodurch diese der Produktion im Instandhaltungszeitraum nicht zur Verfügung stehen (KRÖNING 2014, S. 16). Folglich beeinflusst der zeitliche Umfang der Sekundärleistungen die für

die Primärleistung zur Verfügung stehende Kapazität (DREXL & HAASE 2000, S. 482). Daraus ergibt sich der zentrale Zielkonflikt der Produktions- und Instandhaltungsplanung, wonach in Produktionssystemen „[...] nur begrenzte Kapazitäten bzw. Ressourcen [...] und finanzielle Mittel zur Durchführung von Produktions- und Instandhaltungsaufträgen zur Verfügung stehen“ (KRÖNING 2014, S. 17). Diese Wechselwirkungen lassen sich nach GÖSSINGER & KALUZYNY (2010, S. 4) als Abhängigkeitsbeziehung zwischen Leistungsfähigkeit und Zustand beschreiben. Sie ist eine Konfliktsituation und wurde historisch durch eine strikte Trennung der Nutzungszeiten gelöst. In heutigen Produktionssystemen ist die Trennung aufgrund der hohen Auslastung oder des hohen Bedarfes an Leistungen kaum oder nicht mehr möglich und es kommt zu instandhaltungsbedingten Stillständen in den Produktionszeiten (KRÖNING 2014, S. 1). Zur Optimierung der Abläufe sowie zur kapazitiven Abstimmung der Leistungen besteht folglich die Notwendigkeit der gemeinsamen Abstimmung von Produktion und Instandhaltung (GÜNTNER ET AL. 2014, S. 9; BERRICHI ET AL. 2009, S. 9).

Es zeigt sich, dass die Berücksichtigung von Entscheidungen zum Ablauf der Instandhaltungsprozesse bei der Entscheidung des Ablaufes der Produktionsprozesse et vice versa ökonomisch vorteilhaft ist (MISHRA & SHRIVASTAVA 2020, S. 949; CHENG ET AL. 2017, S. 539; GÖSSINGER & KALUZYNY 2010, S. 4–5). Es können Stillstandzeiten minimiert und die Verfügbarkeiten der Ressourcen gesteigert werden (HENKE ET AL. 2019, S. 50; KASPER 2016, S. 1). Dies dient der Maximierung der Produktivität des Produktionssystems und ermöglicht die Herstellung zusätzlicher Produkte, wodurch Umsatzsteigerungen erreicht werden können (HENKE ET AL. 2019, S. 23; BASRI ET AL. 2017, S. 138; BERRICHI & YALAOUI 2013b, S. 2296). Des Weiteren können niedrigere Gesamt- und Ausfall(folge-)kosten sowie eine höhere Liefertermintreue erreicht werden (KASPER 2016, S. 1). Ein produzierendes Unternehmen, welches simultan die Produktion und die Instandhaltung plant, optimiert die Abläufe im Produktionssystem in seiner Gesamtheit und ermöglicht die effiziente und effektive Ausführung des Leistungserstellungsprozesses (HENKE ET AL. 2019, S. 32; WOLTER 2016, S. 149).

1.2 Problemstellung

Trotz der Interdependenzen und der Potenziale erfolgt die Planung von Produktions- und Instandhaltungsleistungen heutzutage in der Mehrheit der Unternehmen separiert voneinander (MOGHADDAM 2013, S. 704; BERRICHI ET AL. 2009, S. 389). Die Produktions- und Instandhaltungsplanung sind in der Organisationsstruktur i. d. R. zwei voneinander

1 Einleitung

getrennte Planungsbereiche (HENKE ET AL. 2019, S. 18). Lediglich 15 % der produzierenden Unternehmen¹ führen eine gemeinsame Planung durch (HENKE ET AL. 2019, S. 18). Als Ursache sind Defizite in der Planung von Produktion und Instandhaltung anzusehen, welche sich aus der unzureichenden Adressierung der Komplexität des Planungsproblems ergeben. Die Komplexität ist eine Folge der Vielschichtigkeit und der Interdependenzen des integrierten Planungsproblems (KRÖNING 2014, S. 6-7, S. 36). Die Abstimmung der Abläufe von Produktion und Instandhaltung erfordert die gleichzeitige Festlegung vielfältiger Entscheidungsdimensionen unter Berücksichtigung von internen Abhängigkeiten und externen Einflüssen (GRÜNEWALD 1992, S. 5). Nach SAGER (2019, S. 4) werden in der Planung zwei Klassen der Komplexität unterschieden: die *prozessuale Komplexität* und die *analytische Komplexität*. Diejenigen Defizite, welche den Planungsprozess zum Treffen einer Entscheidung für eine Handlungsalternative erschweren, werden der Klasse der prozessualen Komplexität zugeordnet. Die Defizite, welche die Ermittlung und Durchdringung von Handlungsalternativen erschweren, werden der Klasse der analytischen Komplexität zugeordnet und beeinflussen die Planungsqualität negativ.

Defizite der prozessualen Komplexität: In der Mehrheit der produzierenden Unternehmen wird trotz der Zunahme der Bedeutung der Instandhaltung der von ihr geleistete Beitrag zu den strategischen Erfolgspotenzialen und der Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit unterschätzt (HENKE ET AL. 2019, S. 17, S. 24; ALCALDE RASCH 2000, S. 2). In der Literatur hat sich die Charakterisierung der Instandhaltung als Unterstützungsfunktion der Produktion etabliert. Die Beschreibung der Instandhaltung als *notwendiges Übel*, welche im Hintergrund und ohne Verursachung von Störungen des Produktionsablaufes arbeiten soll, stellt hierbei den Extrempunkt der Aberkennung der Bedeutung dar. Ebenso zeigt sich die Unterschätzung des Beitrages der Instandhaltung in der Wissenschaft. Bei der Analyse und Beantwortung von produktionstechnischen Fragestellungen wurde sie oft nur am Rande betrachtet (ACATECH 2015, S. 12). Dies führt zu einer der Produktion nachgelagerten oder fehlenden Berücksichtigung der Bedarfe für Instandhaltungsleistungen, woraus eine erhöhte Anzahl und Dauer von Stillständen resultieren können (HENKE ET AL. 2019, S. 26–27).

¹ Die deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) führte im Jahr 2019 basierend auf einer Studie zur Bedeutung der Instandhaltung für Industrie 4.0 (vgl. ACATECH (2015)) eine Analyse des Status quo der Instandhaltung in produzierenden Unternehmen durch. Von Oktober 2018 bis Dezember 2018 wurden insgesamt 96 produzierende Unternehmen aus 14 Branchen befragt (HENKE ET AL. 2019, S. 8). Davon waren ca. 50 % der Unternehmen der diskreten Produktion zugehörig (HENKE ET AL. 2019, S. 14).

Des Weiteren stellt die organisatorische Trennung von Produktion und Instandhaltung ein Hindernis für den Informationsaustausch dar (GÜNTNER ET AL. 2014, S. 9; WEINSTEIN & CHUNG 1999, S. 1060). Die Informationssysteme werden i. d. R. isoliert voneinander betrieben und es kann dazu kommen, dass Informationen zu Leistungsbedarfen und Terminen nicht oder nur kurzfristig übermittelt werden (GRÜNEWALD 1992, S. 4). Dies kann zu einer unterschiedlichen Datenbasis für die Produktions- und Instandhaltungsplanung führen (DUARTE ET AL. 2013, S. 554; BERRICHI ET AL. 2009, S. 390).

In den Planungsbereichen werden die Leistungsreihenfolgen separiert voneinander ermittelt und ergeben Handlungsalternativen, welche auszuwählen sind (GÖSSINGER & KALUZYNY 2010, S. 1). Die Separierung lässt den Bedarf an Leistungen und deren Priorität für den jeweils anderen Planungsbereich intransparent erscheinen. Die Abstimmung und Auswahl erfolgt in Abstimmungstreffen der Entscheidungsträger in denen die zur Verfügung stehende Zeit i. d. R. nicht ausreichend ist. Dies führt oftmals dazu, dass auf eine Bewertung der Handlungsalternativen verzichtet und der Ablauf stattdessen auf Basis von Erfahrungswissen festgelegt wird (KRÖNING 2014, S. 2). Dies kann zu Konflikten im Planungsprozess und zur Auswahl von suboptimalen Plänen führen.

Defizite der analytischen Komplexität: In der integrierten Planung ergibt sich ein sehr großer Lösungsraum, der implizit durch die betrieblichen Vorgaben und Restriktionen begrenzt ist. Es stehen nur begrenzte Kapazitäten bzw. Ressourcen sowie finanzielle Mittel zur Verfügung, welche es im Rahmen der Planung zu verteilen gilt (KRÖNING 2014, S. 17; WEINSTEIN & CHUNG 1999, S. 1060). Die Größe des Entscheidungsproblems korrespondiert mit der Länge des betrachteten Planungshorizontes, der Anzahl der Produkte, der Produktionssystemressourcen und der Rüstvorgänge sowie den Prozesszeiten der Leistungen (BEHESHTI FAKHER ET AL. 2017, S. 2163). Folglich ergibt sich die analytische Komplexität aus der Vielzahl der Entscheidungsdimensionen, der Anzahl der Ressourcen und somit der Größe des Produktionssystems sowie der Abhängigkeitsverhältnisse der Ressourcen aus der gleichzeitigen Nutzung (DUARTE ET AL. 2013, S. 552; BERRICHI ET AL. 2009, S. 389).

Im akademischen Umfeld haben sich zur Unterstützung der Entscheidungsfindung analytische Methoden, insbesondere Simulations- und Optimierungsmodelle, etabliert. Diese Ansätze weisen jedoch Defizite in der Abbildung der realen Abläufe, Berücksichtigung der Restriktionen sowie in der Abbildung der Entscheidungsdimensionen der Planungsbereiche auf (MISHRA & SHRIVASTAVA 2020, S. 950–949). Dadurch können

1 Einleitung

die Interdependenzen nicht in ausreichender Güte abgebildet werden (SALONEN & GOPALAKRISHNAN 2020). Des Weiteren wird in der betrieblichen Realität oftmals auf die Ermittlung von Handlungsalternativen unter Einsatz analytischer Methoden verzichtet (KRÖNING 2014, S. 2). Die Ermittlung erfolgt häufig unter Einsatz von Kalkulationstabellen auf Basis des Erfahrungswissens oder unter Nutzung von Planungssystemen (SALONEN & GOPALAKRISHNAN 2020), welche aktuell jedoch nicht über alle für eine integrierte Planung notwendigen Funktionalitäten verfügen. Sie weisen nicht die notwendige Anpassungsfähigkeit auf, um reibungslose und effiziente Abläufe in komplexen Produktionssystemen zu gewährleisten (HEES 2017, S. 2). Die Nichtberücksichtigung der Abhängigkeiten kann zu erhöhten Beständen, Minderproduktion oder zu Ausfällen führen (BERRICHI ET AL. 2010, S. 1584).

Die Entscheidungsträger der Planungsbereiche verfolgen in den Abstimmungstreffen unterschiedliche Ziele (BERRICHI ET AL. 2009, S. 389). Die Entscheidungssituation lässt sich als Konfliktsituation charakterisieren (MOGHADDAM 2013, S. 704; BERRICHI ET AL. 2009, S. 389). Der Zielkonflikt von Produktions- und Instandhaltungsplanung folgt aus der Abhängigkeitsbeziehung zwischen Leistungsfähigkeit und Zustand. Sie tritt insbesondere im Rahmen der Abstimmung und Koordination in der Termin- und Kapazitätsplanung auf (KRÖNING 2014, S. 17). Bestehende analytische Ansätze fokussieren i. d. R. finanzielle oder zeitliche Ziele und vernachlässigen die integrierte Berücksichtigung von Unternehmens-, Produktions- und Instandhaltungszielen.

Die Defizite sind zusammenfassend in Abbildung 1.1 dargestellt.

Klassen	Defizite	Beeinträchtigte Bereiche
Prozessuale Komplexität	Nachgelagerte Berücksichtigung der Bedarfe für Instandhaltungsleistungen	Planungsprozess
	Fehlender Informationsaustausch zwischen den Planungsbereichen	
	Intransparente Ermittlung der Handlungsalternativen und fehlende Bewertung	
Analytische Komplexität	Fehlende analytische Ermittlung der Handlungsalternativen	Planungsqualität
	Unzureichende Berücksichtigung der Restriktionen und Abbildung der Entscheidungsdimensionen bei der Ermittlung der Handlungsalternativen	
	Fehlende integrierte Berücksichtigung der Unternehmens-, Produktions- und Instandhaltungsziele	

Abbildung 1.1: Defizite der Produktions- und Instandhaltungsplanung und beeinträchtigte Bereiche

1.3 Zielsetzung

Ausgehend von der dargestellten Problemstellung leitet sich das Forschungsziel der vorliegenden Arbeit ab. Dies ist die Entwicklung eines Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung zur Ermittlung von effizienten Leistungsreihenfolgen bei gleichzeitiger Verbesserung der Entscheidungsfindung. Der inhaltliche Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist die im Planungsprozess simultan durchzuführende Produktions- und Instandhaltungsplanung. Die Synthese der beiden Planungen wird nachfolgend als integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung bezeichnet.

Das System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung soll zur Verbesserung des Planungsprozesses sowie der Planungsqualität beitragen, um die Potenziale einer integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung realisieren zu können (vgl. Abschnitt 1.1). Es gilt, die beiden Planungsbereiche als gleichwertig zu berücksichtigen und die Leistungsreihenfolgen anhand eines integrierten Zielsystems zu ermitteln. Die Zielgrößen des Zielsystems sind an den strategischen Erfolgsfaktoren produzierender Unternehmen zu orientieren. Des Weiteren ist es erforderlich, die Restriktionen des Produktionssystems in der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung zu berücksichtigen. Dies stellt eine hohe Planungsqualität sicher und adressiert die analytische Komplexität des Planungsproblems. Darüber hinaus gilt es, die Entscheidungsträger der Produktions- und Instandhaltungsplanung mittels eines methodischen Vorgehens im Entscheidungsfindungsprozess bei der Ermittlung von verbesserten Leistungsreihenfolgen zu unterstützen. Damit wird die prozessuale Komplexität des Planungsproblems adressiert.

Darüber hinaus leistet die Entwicklung des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung mit der Synthese der beiden Planungsbereiche einen Beitrag zur Zukunftsvision einer intelligenten Instandhaltung nach HENKE ET AL. (2019). Laut ACATECH (2015, S. 19) sehen 47 % der produzierenden Unternehmen² die höchsten Entwicklungs- und Handlungsbedarfe bei Systemen zur Unterstützung von Planung, Steuerung und Umsetzung von Entscheidungen. Die Systeme sollen dazu beitragen, dass Ressourcen effizienter und effektiver eingesetzt werden.

² Die Studie befragte insgesamt sechzig produzierende Unternehmen, wovon dreißig produzierende Unternehmen der Kategorie Großunternehmen und dreißig Unternehmen der Kategorie mittelständische Unternehmen zuzuordnen sind (ACATECH 2015, S. 15).

1.4 Spezifizierung des Betrachtungsbereiches

Es gilt den Betrachtungsbereich der vorliegenden Arbeit festzulegen. Es wird der zu betrachtende Bereich von Produktionssystemen sowie der Produktions- und Instandhaltungsplanung spezifiziert.

1.4.1 Betrachtungsbereich Produktionssystem

Obwohl Produktionssysteme Gegenstand umfangreicher Forschungstätigkeiten sind, existiert in der Fachliteratur kein einheitliches Verständnis des Begriffes. Er wird nachfolgend für die vorliegende Arbeit definiert. Darüber hinaus muss zur Festlegung einer geeigneten Systemgrenze die Struktur eines Produktionssystems detailliert werden.

1.4.1.1 Begriffsdefinition Produktionssystem

Produktion bezeichnet im Allgemeinen den Leistungserstellungs- bzw. Transformationsprozess, durch den aus Einsatzgütern andere Güter oder Dienstleistungen erstellt werden (DANGELMAIER 2009, S. 1–2; W. WEBER 1991, S. 7). Als Ergebnis des Leistungserstellungsprozesses entstehen materielle und immaterielle Güter sowie Dienstleistungen, welche als Leistungen oder Produkte bezeichnet werden (DANGELMAIER 2009, S. 1, S. 26). Die Erstellung der Leistungen erfolgt durch die Kombination und Transformation von verschiedenen Produktionsfaktoren (DANGELMAIER 2009, S. 2; G. ZIMMERMANN 1996). Sie können in Repetierfaktoren (Werkstoffe), Potenzialfaktoren (Betriebsmittel und ausführungsorientierte menschliche Arbeitskräfte) sowie dispositive Faktoren (Leitung, Planung, Organisation und Kontrolle) unterschieden werden (HEINEN 1983, S. 247; GUTENBERG 1965, S. 2, S. 314). Häufig werden Betriebsmittel und menschliche Arbeitskräfte in diesem Kontext auch als Produktionsressourcen bezeichnet (HOCHDÖRFFER 2018, S. 7).

Ein Produktionssystem wird in der vorliegenden Arbeit in Anlehnung an NYHUIS (2008) und EVERSHEIM (1996, S. 1536) als ein soziotechnisches System definiert, welches im Rahmen des Leistungserstellungsprozesses Input durch den zielgerichteten Einsatz von Produktionsressourcen zu Output transformiert.

1.4.1.2 Struktur eines Produktionssystems

Ein Produktionssystem ist Bestandteil eines produzierenden Unternehmens und besteht aus einer Vielzahl an Produktionsressourcen. Die Struktur eines Produktionssystems lässt sich nach WIENDAHL ET AL. (2007, S. 785–786) und WESTKÄMPER (2007) anhand des Ebenenmodells in sechs Ebenen hierarchisch gliedern. Einzelne *Arbeitsplätze* stellen die unterste Ebene im Ebenenmodell dar. An Arbeitsplätzen erfolgt die Durchführung der wertschöpfenden Prozesse einschließlich Werkstück- und Werkzeughandhabung. Die Prozesse können von Maschinen und Arbeitskräften ausgeführt werden. Mehrere Arbeitsplätze werden als *Zelle* in der nächsthöheren Ebene zusammengefasst. Mittels Materialflüssen verknüpfte Zellen werden als eine *Linie* bzw. *System* bezeichnet. Sie umfassen die notwendigen Arbeitsvorgänge zur Herstellung eines Produktes einschließlich der Qualitätssicherung. In der nächsthöheren Ebene werden mehrere Linien zu einem *Segment* zusammengefasst. Segmente werden nach Art der Produktionstätigkeit unterteilt. Beispiele für Segmente sind Fertigung und Montage. Ein *Standort* beschreibt im Ebenenmodell eine Einheit aus mehreren Segmenten. Die oberste Ebene ist das *Netzwerk*, in welchem Fabriken an geografisch getrennten Standorten mittels Material- und Informationsflüssen miteinander verbunden sind.

1.4.1.3 Festlegung der Systemgrenze

Die Festlegung des Betrachtungsbereiches Produktionssystem der vorliegenden Arbeit erfolgt anhand der vorgestellten Struktur. Die Planung und Gestaltung der Material- und Informationsflüsse der Ebenen Netzwerk und Standort haben einen strategischen Charakter (WIENDAHL ET AL. 2007, S. 785). Dies gilt insbesondere für die Konfiguration von Netzwerken (SAGER 2019, S. 63). Der Fokus der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung ist nicht die Gestaltung der Material- und Informationsflüsse sondern die operative Festlegung der im unternehmensinternen Produktionssystem durchzuführenden Leistungen. Folglich werden die Ebenen des Netzwerks und des Standorts nicht betrachtet. An einem Standort existieren i. d. R. mehrere Segmente, Linien und Zellen, in denen Leistungsprozesse von Produktion und Instandhaltung stattfinden. Die Planung der wertschöpfenden Prozesse der Arbeitsplatzebene ist Bestandteil der Arbeitsplanung. Sie legt die benötigten Betriebsmittel, Prozessparameter sowie die Arbeitsplatzgestaltung fest. Diese Planungsergebnisse stellen für eine integrierte Planung notwendige Eingangsinformationen dar, werden jedoch nicht von ihr festgelegt. Folglich wird die Arbeitsplatzebene nicht betrachtet. Zusammenfassend sind

1 Einleitung

die Produktionssystemebenen Segmente, Linien und Zellen zu berücksichtigen. Die Struktur eines Produktionssystems und der Betrachtungsbereich sind in Abbildung 1.2 abgebildet. In der vorliegenden Arbeit wird nachfolgend als Bezeichnung für die Zelle der Begriff Maschine verwendet.

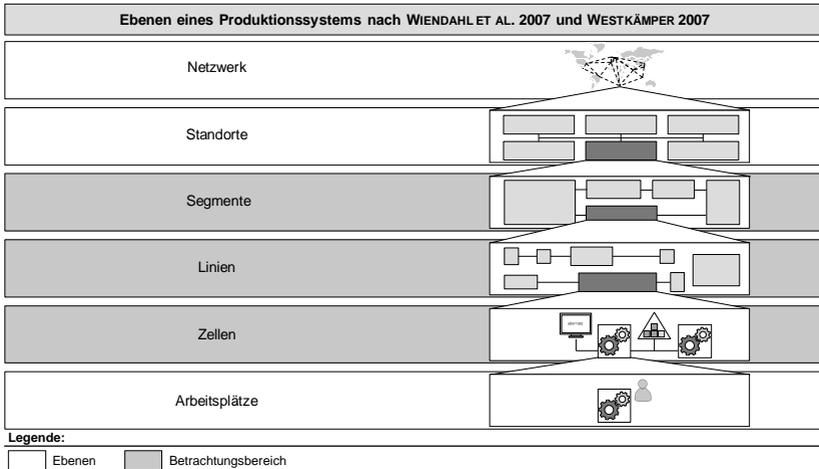


Abbildung 1.2: Struktur eines Produktionssystems und Betrachtungsbereich anhand des Ebenenmodells in Anlehnung an WIENDAHL ET AL. (2007, S. 785) und WESTKÄMPER (2007)

1.4.2 Betrachtungsbereich Produktionsplanung

Im nachfolgenden Abschnitt werden eine Begriffsdefinition sowie die Ziele und Aufgaben der Produktionsplanung eingeführt. Darüber hinaus werden die zu betrachtenden Entscheidungsdimensionen der Produktionsplanung im Planungssystem festgelegt. Aufgrund der engen funktionalen Verknüpfung erfolgt zusätzlich eine Abgrenzung der Produktionsplanung von der Produktionssteuerung.

1.4.2.1 Begriffsdefinition Produktionsplanung

In der vorliegenden Arbeit wird für die Produktionsplanung auf die Begriffsdefinition nach VDI (1992, S. 167) zurückgegriffen. Nach VDI (1992, S. 167) ist die Produktionsplanung das „[...] Suchen und Festlegen von Zielen für die Produktion, Vorbereiten

von Produktionsaufgaben und Festlegung des Ablaufes zum Erreichen dieser Ziele“. Das Ergebnis ist ein Produktionsplan, welcher durch die Produktionssteuerung im Produktionssystem durchgesetzt wird. Die Produktionssteuerung ist das „Veranlassen, Überwachen und Sichern der Durchführung von Produktionsaufgaben hinsichtlich Bedarf (Menge und Termin), Qualität und Kosten und Arbeitsbedingungen“ (VDI 1992, S. 167).

1.4.2.2 Ziele und Aufgaben der Produktionsplanung

Das zentrale Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) nach WIENDAHL (2010, S. 252–253) setzt sich aus Logistikleistung und Logistikkosten zusammen. Die Logistikleistung wird vom Kunden anhand kurzer Lieferzeiten sowie hoher Liefertreue wahrgenommen (WIENDAHL 2010, S. 252–253). Es zeigt sich, dass die Ziele des Zielsystems der PPS in partiell konkurrierenden Beziehungen zueinanderstehen und folglich nicht alle Ziele gleichzeitig erreicht werden können. Diese Konfliktsituation wird als Dilemma der PPS bezeichnet (WIENDAHL 2010, S. 253, S. 256; LÖDDING 2008, S. 34).

Das Aufgabenobjekt der PPS ist der Leistungserstellungsprozess, der in einem Produktionssystem stattfinden soll bzw. stattfindet (DANGELMAIER 2009, S. 16). Die PPS gliedert sich nach SCHUH ET AL. (2012a, S. 21) in die Aufgabengruppen Netzwerkaufgaben, Kernaufgaben und Querschnittaufgaben sowie die Datenverwaltung. Weiterhin gliedert sich die Aufgabengruppe der Kernaufgaben in die Produktionsprogrammplanung, Produktionsbedarfsplanung, Fremdbezugsplanung und -steuerung sowie die Eigenfertigungsplanung und -steuerung (SCHUH ET AL. 2012a, S. 31). Gemäß dem Betrachtungsbereich Produktionssystem werden nur Leistungen im unternehmensinternen Produktionssystem betrachtet (vgl. Abschnitt 1.4.1.3). Die Aufgabengruppen der Netzwerkaufgaben, Querschnittaufgaben sowie die Fremdbezugsplanung und -steuerung der Aufgabengruppe der Kernaufgaben sind folglich nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit. Die Aufgaben der PPS werden nachfolgend in Anlehnung an SCHUH ET AL. (2012a, S. 38–57) und HACKSTEIN (1989, S. 9–17) dargestellt und sind in Abbildung 1.3 zusammenfassend abgebildet.

Die *Datenverwaltung* übernimmt die Aufgaben der Sammlung, Speicherung und Pflege produktionsbezogener Daten. Die *Produktionsprogrammplanung* legt für einen definierten Planungszeitraum Art, Mengen und Termine für die Produkte im Produktionsprogramm fest. In der Prognoserechnung werden der Brutto- sowie der Nettoprimärbedarf

1 Einleitung

ermittelt. Anschließend werden die Ressourcengrobplanung sowie die Lieferterminermittlung für die Bedarfe durchgeführt. In der *Produktionsbedarfsplanung* erfolgt die Ermittlung der zur Herstellung der Erzeugnisse erforderlichen Roh- und Werkstoffe, Halbzeuge, Hilfs- und Betriebsstoffe, Teile und Gruppen nach Art, Menge und Termin (HACKSTEIN 1989, S. 11–12).

Die Festlegung des zeitlich und kapazitiv fein abgestimmten Ablaufes der Produktion ist Bestandteil der *Termin- und Kapazitätsplanung*. Die Bildung wirtschaftlich optimaler Losgrößen wird in der Losgrößenrechnung angestrebt. Anschließend wird der Kapazitätsbedarf dem Kapazitätsangebot gegenübergestellt und mittels Kapazitätsabgleich oder Kapazitätsanpassung abgestimmt. In der Feinterminierung werden die Start- und Endtermine der Aufträge unter Berücksichtigung der Bearbeitungs- und Übergangszeiten ermittelt. Die Reihenfolge der Bearbeitung der Aufträge an den Ressourcen bzw. Ressourcengruppen wird in der Reihenfolgeplanung bestimmt. Das Ergebnis der Termin- und Kapazitätsplanung ist der Produktionsplan.

Die Veranlassung der Produktionsaufgaben und Durchsetzung des Produktionsplans ist Aufgabe der Produktionssteuerung. Sie gliedert sich in *Auftragsveranlassung* und *Auftragsüberwachung*. In der Auftragsveranlassung erfolgen die Verfügbarkeitsprüfung, Auftragsfreigabe, Arbeitsverteilung und Materialtransportsteuerung. In der Auftragsüberwachung werden die Zustandsänderungen der Aufträge sowie Ressourcen erfasst und verwaltet.

Teilbereich	Aufgabengruppe		Aufgaben
Produktionsplanung	Datenverwaltung	Produktionsprogrammplanung	Absatzplanung Prognoserechnung Ressourcengrobplanung
		Produktionsbedarfsplanung	Bedarfsermittlung Beschaffungsartzuordnung Durchlaufterminierung Kapazitätsbedarfsermittlung
		Termin- und Kapazitätsplanung	Losgrößenrechnung Kapazitätsabstimmung Ressourcenfeinplanung Reihenfolgeplanung
Produktionssteuerung		Auftragsveranlassung	Verfügbarkeitsprüfung Auftragsfreigabe Arbeitsverteilung Materialtransportsteuerung
		Auftragsüberwachung	Auftragsfortschrittserfassung Kapazitätsüberwachung Kundenauftragsüberwachung Kundenauftragsbezug

Abbildung 1.3: Gliederung der Produktionsplanung und -steuerung nach Aufgabengruppen und Aufgaben in Anlehnung an SCHUH ET AL. (2012a, S. 38–57) und HACKSTEIN (1989, S. 3–17)

1.4.2.3 Ableitung der zu betrachtenden Entscheidungsdimensionen

Ausgehend von den Aufgaben der Produktionsplanung lassen sich die zu betrachtenden Entscheidungsdimensionen ableiten.

Wesentliche Eingangsgröße ist der Bedarf an Primärleistungen in Form der Nachfrage nach Produkten. Sie ergibt sich aus den Aufträgen und Prognosen des produzierenden Unternehmens, welche als Produktbedarfe subsumiert werden. Das Leistungsportfolio der Produktion stellen die Produkte dar und der Umfang des Leistungsportfolios wird in der vorliegenden Arbeit als durch den Vertrieb und die Produktentwicklung vorgegeben angesehen. Die Bedienung der Bedarfe erfolgt in Produktionssystemen oftmals aus einem Lager, wodurch Lagerbestände von Produkten festzulegen sind. Des Weiteren sind auf den Ebenen der Linien und Maschinen Zuordnungen durchzuführen, welche Produkte zu produzieren sind. Darüber hinaus erfordert die Herstellung der Produkte an den Maschinen i. d. R. weitere Betriebsmittel, weshalb eine Zuordnung von Betriebsmitteln zu Maschinen zu berücksichtigen ist. Die eindeutige Zuordnung von Produkten, Maschinen und Betriebsmitteln ermöglicht die Festlegung von Losgrößen, Reihenfolgen von Losen, Rüstvorgängen sowie der Start- und Endzeiten von Rüstvorgängen und Losen. In der Literatur wird der Produktionsplanung mitunter die Festlegung des Ausgangsmaterials zugeordnet. Es wird die Auffassung vertreten, dass die Festlegung und Bereitstellung des Ausgangsmaterials Bestandteile der Materialdisposition sind. Diese steht nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit. Die Tabelle 1.1 stellt die Entscheidungsdimensionen der Produktionsplanung der vorliegenden Arbeit zusammenfassend dar.

Tabelle 1.1: Berücksichtigte Entscheidungsdimensionen der Produktionsplanung

Betrachtungsebenen	Entscheidungsdimensionen
Segment	Festlegung des Bestandes an Produkten
Linie	Zuordnung von Produkten zu Linien
Maschine	Zuordnung von Produkten zu Maschinen
	Zuordnung von Betriebsmitteln zu Maschinen sowie Produkten
	Festlegung der Losgrößen von Produkten
	Festlegung der Reihenfolge von Losen
	Festlegung der Durchführung von Rüstvorgängen
	Festlegung der Start- und Endzeiten von Rüstvorgängen und Losen

1.4.3 Betrachtungsbereich Instandhaltungsplanung

Im nachfolgenden Abschnitt wird der Betrachtungsbereich Instandhaltungsplanung bestimmt. Das Ziel ist die Festlegung der Entscheidungsdimensionen der Instandhaltungsplanung. Dazu werden eine Begriffsdefinition sowie die Ziele und Aufgaben vorgestellt. Zusätzlich erfolgt eine Abgrenzung von der Instandhaltungsprogrammplanung und -steuerung.

1.4.3.1 Begriffsdefinition Instandhaltungsplanung

Nach DIN 31051 ist die Instandhaltung die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit, welche dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands dient, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann. Die von der Instandhaltung betrachteten Einheiten sind alle Betriebsmittel (W. KLEIN 1988, S. 10). Sie werden als Instandhaltungsobjekte bezeichnet und sind die Arbeitsgegenstände der Instandhaltung (W. KLEIN 1988, S. 10). Die Maßnahmen der Instandhaltung lassen sich nach DIN 31051 in die Grundmaßnahmen Inspektion, Wartung, Instandsetzung und Verbesserung unterteilen. In Anlehnung an HERZIG (1975) werden in der vorliegenden Arbeit die verschiedenen Instandhaltungsmaßnahmen unter dem Begriff der Instandhaltungsleistungen zusammengeführt. Die Leistung der Instandhaltung umfasst die Bereitschaftsleistung, den Leistungsprozess sowie das Leistungsergebnis (BLOSS 1995, S. 13–14). Wesentliche Charakteristika von Instandhaltungsleistungen sind, dass diese im Prinzip nicht lagerfähig und extern determiniert sind (ALCALDE RASCH 2000, S. 26; ZHANG 1990, S. 27; HERZIG 1975, S. 271). Eine Lagerung einer Instandhaltungsleistung kann nur durch den Bezug zu einem Instandhaltungsobjekt, dem Leistungsergebnis, erreicht werden (SEICHT 1994, S. 397; KALUZA ET AL. 1994, S. 11). Die externe Determiniertheit ergibt sich aus dem hohen Beeinflussungsgrad des Instandhaltungsleistungsbedarfes durch die Produktion (HERZIG 1975, S. 25).

In Anlehnung an W. KLEIN (1988, S. 23, S. 48) und VDI 2898 wird die Instandhaltungsplanung als die termin- und kapazitätsmäßige Festlegung des Ablaufes von Instandhaltungsleistungen und die Einplanung des Einsatzes der zur Durchführung erforderlichen Ressourcen definiert. Das Ergebnis ist der Instandhaltungsplan, welcher die Ablauffolge der einzelnen Instandhaltungsleistungen beinhaltet und den organisatorischen Ablauf festlegt (VDI 2898).

1.4.3.2 Ziele und Aufgaben der Instandhaltungsplanung

BIEDERMANN (1990, S. 38–42) definiert acht Formalziele³ der Instandhaltung, welche sich in finanzielle und technische Ziele klassifizieren lassen. Sie stellen die Effizienzkriterien der Instandhaltung dar (BIEDERMANN 1990, S. 38). Die finanziellen Formalziele sind die Minimierung der direkten und indirekten Instandhaltungskosten sowie die Maximierung des Gewinns. Die technischen Formalziele sind die Minimierung der Ausfallzeit und der vorbeugenden Instandhaltungszeit sowie die Maximierung der Lebensdauer, der Zuverlässigkeit und der Anlagenverfügbarkeit. Nach BIEDERMANN (1990, S. 40) kann in Abhängigkeit von der Unternehmenssituation jedes Formalziel zur Gewinnmaximierung beitragen. Die Ziele sind in Abbildung 1.4 mit ihren Zielbeziehungen dargestellt.

Klassen	Formalziele	Zielbeziehungen
Finanzielle Ziele	Minimierung der direkten Instandhaltungskosten	+
	Minimierung der indirekten Instandhaltungskosten	+
	Maximierung des Gewinns	+
Technische Ziele	Minimierung der Ausfallzeit	+
	Minimierung der vorbeugenden Instandhaltungszeit	+
	Maximierung der Anlagenverfügbarkeit	+
	Maximierung der Zuverlässigkeit	+
	Maximierung der Lebensdauer	+

Legende:

+ komplementäre Zielbeziehung o indifferente Zielbeziehung - konkurrierende Zielbeziehung
 +- partiell komplementäre und konkurrierende Zielbeziehung

Abbildung 1.4: Formalziele der Instandhaltung mit ihren Zielbeziehungen in Anlehnung an BIEDERMANN (1990, S. 38–42)

Nach W. KLEIN (1988) werden die Instandhaltungsarbeitsplanung, Instandhaltungsplanung und -steuerung (IPS) sowie die Instandhaltungsanalyse unterschieden. Die Instandhaltungsarbeitsplanung beinhaltet die lang- und mittelfristigen Planungsfunktionen, z. B. der Strategie-, Betriebsmittel-, Material- und Budgetplanung sowie die kurzfristigen Funktionen der Arbeitsplanerstellung und Kostenplanung. Die Ergebnisse gehen als Eingangsinformationen in die IPS ein. Die Instandhaltungsanalyse beinhaltet die Abweichungs- sowie Schwachstellenanalyse und ist der IPS nachgelagert.

³ Ein Formalziel spezifiziert eine bestimmte Eigenschaft eines Endzustandes, ohne den Endzustand inhaltlich zu spezifizieren (LAUX ET AL. 2018, S. 46). Darüber hinaus existieren Sachziele, welche den anzustrebenden Endzustand mittels konkreter sachlicher Merkmale spezifizieren (LAUX ET AL. 2018, S. 46).

1 Einleitung

Die Aufgaben der IPS umfassen nach GRÜNEWALD (1992, S. 7–10) und W. KLEIN (1988, S. 47–52) alle auftragsabhängigen Funktionen zur Planung und Steuerung der Instandhaltungsleistungen. Sie sind zusammenfassend in Abbildung 1.5 dargestellt.

Teilbereich	Aufbengruppe		Aufgaben
Instandhaltungsplanung	Datenverwaltung	Instandhaltungsprogrammplanung	Prognoserechnung Grobplanung Vorlaufsteuerung Auftragsverwaltung
		Termin- und Kapazitätsplanung	Prioritätsvergabe Durchlaufterminierung Kapazitätsbedarfsrechnung Kapazitätsangebotsermittlung Kapazitätsabstimmung Reihenfolgeplanung
		Mengenplanung	Materialbedarfsbestimmung Materialbeschaffungsrechnung Materialreservierung Materialbestandsführung
Instandhaltungssteuerung		Auftragsveranlassung	Verfügbarkeitsprüfung Auftragsfreigabe Arbeitsbelegerstellung Arbeitsverteilung Transportsteuerung
		Auftragsüberwachung	Arbeitsfortschrittsfassung Kapazitätsüberwachung Auftragsdatenerfassung

Abbildung 1.5: Gliederung der Instandhaltungsplanung und -steuerung nach Aufbengruppen und Aufgaben in Anlehnung an W. KLEIN (1988, S. 38)

Die *Datenverwaltung* übernimmt die Aufgaben der Speicherung und Bereitstellung der instandhaltungsbezogenen Daten. Die *Instandhaltungsprogrammplanung* umfasst die zeitliche und mengenmäßige Festlegung der durchzuführenden Instandhaltungsleistungen (W. KLEIN 1988, S. 47). Sie beinhaltet die Prognoserechnung des Bedarfes an Instandhaltungsleistungen unter Berücksichtigung der in der Strategieplanung festgelegten Instandhaltungsstrategien sowie die Ableitung des Bedarfes an Personal, Material und Betriebsmitteln. Die Planung des zeitlichen und kapazitätsmäßigen Ablaufes ist Bestandteil der *Termin- und Kapazitätsplanung*. Es werden die für die Durchführung einer Instandhaltungsleistung erforderlichen Betriebsmittel nach Art und Menge, das Instandhaltungspersonal sowie die Start- und Endtermine der Instandhaltungsaufträge ermittelt. Darüber hinaus erfolgen eine Kapazitätsabstimmung und die Festlegung der Reihenfolge der Instandhaltungsaufträge. Die *Mengenplanung* umfasst alle Maßnahmen zur Bereitstellung und Beschaffung der zur Durchführung der Instandhaltungsaufträge benötigten Materialien nach Art, Menge und Termin. Die Instandhaltungssteuerung beinhaltet die *Auftragsveranlassung* sowie *Auftragsüberwachung* und umfasst die Veranlassung, Durchführung, Überwachung und Dokumentation von Instandhaltungsaufträgen (ALCALDE RASCH 2000, S. 141; W. KLEIN 1988, S. 51).

1.4.3.3 Ableitung der zu betrachtenden Entscheidungsdimensionen

Ausgehend von den Aufgaben der Instandhaltungsplanung lassen sich die zu betrachtenden Entscheidungsdimensionen ableiten.

Im Rahmen der Instandhaltungsplanung erfolgt die Zuordnung, welche Instandhaltungsleistungen an Linien, Maschinen sowie Betriebsmitteln durchzuführen sind. Darüber hinaus ist die Festlegung der zur Durchführung von Instandhaltungsleistungen erforderlichen Ressourcen vorzunehmen. Die erforderlichen Ressourcen sind Werkzeuge und qualifiziertes Personal, welche in den entsprechenden Leistungszeiträumen verfügbar sein müssen. Darüber hinaus sind in der Instandhaltungsplanung die Durchführung, die Reihenfolge sowie die Start- und Endzeiten der Instandhaltungsleistungen festzulegen.

In der Fachliteratur werden der Instandhaltungsplanung mitunter die Auswahl von Technologien und die Zuordnung von Maschinen zu Zellen zugeordnet. Es wird die Auffassung vertreten, dass die Anlagenplanung und -beschaffung als Teil der Anlagenwirtschaft zeitlich der Instandhaltungsplanung vorgelagert ist. Des Weiteren erfolgt keine Festlegung von betriebsmittelspezifischen Instandhaltungsstrategien, da dies Bestandteil der Instandhaltungsarbeitsplanung ist und die Strategien folglich Eingangsinformationen der Instandhaltungsplanung darstellen. Darüber hinaus werden nicht planbare Instandhaltungsleistungen, z. B. Maßnahmen zur Behebung von Spontanausfällen, von der Betrachtung ausgeschlossen, da sie kurzfristig auftreten und deren Koordination Aufgabe der Instandhaltungssteuerung ist. Die Tabelle 1.2 stellt die Entscheidungsdimensionen der Instandhaltungsplanung zusammenfassend dar.

Tabelle 1.2: Berücksichtigte Entscheidungsdimensionen der Instandhaltungsplanung

Betrachtungsebenen	Entscheidungsdimensionen
Segment	-
Linie	Zuordnung von Instandhaltungsleistungen zu Linien Zuordnung von Instandhaltungsleistungen zu Maschinen und Betriebsmitteln Zuordnung von Werkzeugen zu Instandhaltungsleistungen
Maschine	Zuordnung von Personal zu Instandhaltungsleistungen Festlegung der Durchführung von Instandhaltungsleistungen Festlegung der Reihenfolge von Instandhaltungsleistungen Festlegung der Start- und Endzeiten von Instandhaltungsleistungen

1.5 Wissenschaftstheoretische Einordnung und Forschungsmethode

P. ULRICH & HILL (1976, S. 305) unterscheiden im Rahmen ihrer Wissenschaftssystematik grundlegend in die *Formal-* und *Realwissenschaften*. In Abhängigkeit der Zielstellung werden die Realwissenschaften in *Grundlagenwissenschaften* und *anwendungsorientierte Wissenschaften*⁴ untergliedert (P. ULRICH & HILL 1976, S. 305).

Das vorliegende Planungsproblem der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung entstammt der industriellen Praxis. Die Entwicklung des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung ist somit primär dem Bereich der anwendungsorientierten Wissenschaften zuzuordnen. Darüber hinaus werden quantitative Modelle und Methoden der Mathematik eingesetzt, wodurch die durch die Formalwissenschaften bereitgestellten Zeichensysteme die Basis für das System bilden. Folglich hat das System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung übergeordnet einen interdisziplinären Charakter.

Als Forschungsmethode wurde die Designtheorie (engl. *Design Science*) nach HEVNER (2007) angewendet. Sie fokussiert die Konstruktion von Artefakten zur Lösung bestehender oder zukünftiger praxisrelevanter Problemstellungen (BRENNER & HESS 2014, S. 77–78; BICHLER 2006, S. 133). Die Designtheorie hat das Ziel, verallgemeinerbare Erkenntnisse zu gewinnen (BRENNER & HESS 2014, S. 77–78; BICHLER 2006, S. 133; GREGOR 2006, S. 629). Bei der Entwicklung des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung kamen insbesondere die Elemente *Definition und Entwicklung*, *Testen und Anwenden* sowie *Analyse des Erkenntnisbeitrages* von Artefakten der Designtheorie zur Anwendung.

Zunächst wurde das existierende Problem in der Produktions- und Instandhaltungsplanung durch terminologisch-deskriptive Forschungstätigkeiten identifiziert und das Verständnis des Problems aufgebaut. Hierzu erfolgten u. a. Experteninterviews und -workshops, Prozessaufnahmen sowie Datenanalysen. Darüber hinaus wurde eine umfassende strukturierte Literaturrecherche als empirisch-induktive Forschungstätigkeit durchgeführt. Sie diente der Ableitung der Anforderungen an ein System zur

⁴ Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Begriff *anwendungsorientierte Wissenschaften* stellvertretend für die synonym verwendeten Begriffe *angewandte Wissenschaften* bzw. *anwendungsnahe Wissenschaften* verwendet.

integrierten Produktions- und Instandhaltung sowie der Ermittlung des aktuellen Standes der Erkenntnisse. Die analytisch-deduktiven Forschungstätigkeiten umfassten die Definition des Systemansatzes, die Konzeptionierung der Systemelemente sowie deren Entwicklung. Anschließend wurde das System getestet und die Ergebnisse evaluiert. Diese Artefakte wurden dem Stand der Erkenntnisse gegenübergestellt und der Erkenntnisbeitrag ermittelt. Der Designtheorie folgend, regten die identifizierten Handlungsbedarfe iterative Weiterentwicklungen des jeweiligen Entwicklungsstandes des Systems an. Das weiterentwickelte System wurde im Rahmen einer Pilotanwendung getestet und die Zielerreichung, die Wirtschaftlichkeit sowie die Anwendungsfälle reflektiert. Abschließend wurden die Potenziale für zukünftige Entwicklungen formuliert.

1.6 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in insgesamt zehn Kapitel. Im ersten Kapitel werden die Ausgangssituation und Motivation sowie die Zielsetzung vorgestellt und der Betrachtungsbereich spezifiziert. Darüber hinaus erfolgt eine wissenschaftstheoretische Einordnung der Arbeit. Im zweiten Kapitel werden die für das Verständnis des Systems wesentlichen Grundlagen der Entscheidungstheorie und multikriteriellen Optimierung erläutert. Das dritte Kapitel dient der Darstellung der Anforderungen an Ansätze zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung. Anschließend werden im vierten Kapitel die Ansätze des Standes der Erkenntnisse vorgestellt. Es schließt mit der Ableitung des Forschungsdefizits und der Begründung des Handlungsbedarfes.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse erfolgen im fünften Kapitel die Ableitung des Lösungsansatzes, die Konzeptionierung der Systemelemente und die Vorstellung des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung. Das System besteht aus den nachfolgend aufgeführten drei Elementen: (1) Informationsmodelle, (2) multikriterielles Optimierungsmodell und (3) Methode.

Das sechste Kapitel ist der Modellierung der Ressourcen des Produktionssystems sowie der Modellierung von Produktions- und Instandhaltungsleistungen in den Informationsmodellen gewidmet. Die Schwerpunkte des siebten Kapitels sind die Modellbildung und die mathematische Formulierung des multikriteriellen Optimierungsmodells. Die Vorstellung und detaillierte Beschreibung der Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung erfolgen im achten Kapitel.

1 Einleitung

Die Leistungsfähigkeit des entwickelten Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung wird im Rahmen der Pilotanwendung im neunten Kapitel anhand eines realen Anwendungsfalles eines produzierenden Unternehmens der Haushaltsgeräteindustrie demonstriert. Des Weiteren erfolgen eine Reflexion der Zielerreichung und eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Systems. Darüber hinaus werden bestehende Limitationen und Anwendungsfälle diskutiert. Die vorliegende Arbeit schließt mit der Zusammenfassung und dem Ausblick auf zukünftige Forschungsaktivitäten im Bereich der Produktions- und Instandhaltungsplanung im zehnten Kapitel. Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1.6 dargestellt.

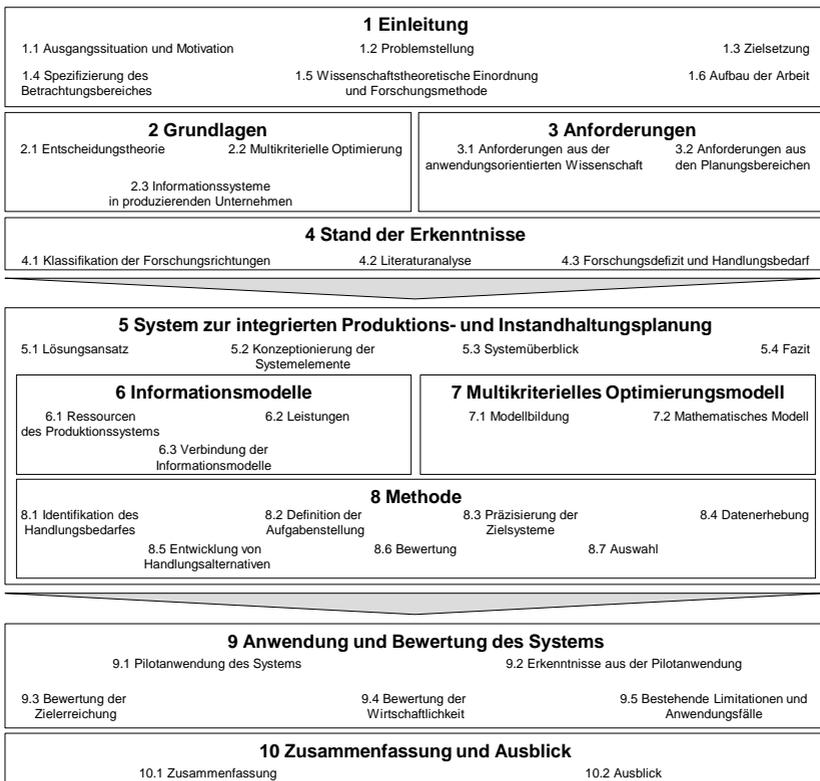


Abbildung 1.6: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die erforderlichen theoretischen Grundlagen für das Verständnis des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung gelegt. Insbesondere werden dabei die Themenbereiche der präskriptiven Entscheidungstheorie (Abschnitt 2.1) und der multikriteriellen Optimierung (Abschnitt 2.2) vorgestellt. Des Weiteren erfolgt in Abschnitt 2.3 die Darstellung der wesentlichen Elemente von Informationssystemen der Produktions- und Instandhaltungsplanung.

2.1 Entscheidungstheorie

Bestandteile der Entscheidungstheorie sind die Untersuchung des Entscheidungsverhaltens von Individuen und Gruppen sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen für den systematisch-methodischen und rationalen Entscheidungsprozess (LAUX ET AL. 2018, S. 17–18; DOMSCHKE ET AL. 2015, S. 1). Die präskriptive Entscheidungstheorie hat als Forschungsziel, Strategien und Modelle zum Lösen von Entscheidungsproblemen anhand rationaler Kriterien abzuleiten (LAUX ET AL. 2014, S. 5; ROMMELFANGER & EICKEMEIER 2002, S. 1–3). Sie umfasst allgemeingültig anwendbare Handlungsempfehlungen für den Entscheidungsprozess sowie Regeln für die Explikation von Zielsystemen (LAUX ET AL. 2014, S. 4–5).

Nachfolgend werden die Begriffe *Entscheidungsproblem*, *Entscheidungsprozess* und *Entscheidung*, wie sie in der vorliegenden Arbeit verwendet werden, definiert. Anschließend werden der Ablauf von Entscheidungsprozessen sowie die Charakteristika von multikriteriellen Entscheidungsproblemen dargestellt.

2.1.1 Begriffe der Entscheidungstheorie

Eine Abweichung des derzeitigen oder des erwarteten Zustands vom Sollzustand in Verbindung mit einer Wahlmöglichkeit aus mindestens zwei Handlungsalternativen, wird

2 Grundlagen

als *Entscheidungsproblem* bezeichnet (LAUX ET AL. 2018, S. 32; R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 1). Eine Handlungsalternative umfasst i. d. R. ein Bündel von Maßnahmen, den Entscheidungsvariablen, welche zur Lösung des Entscheidungsproblems geeignet sind und eine Menge an möglichen Ausprägungen annehmen können (LAUX ET AL. 2014, S. 31; R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 8). Die Handlungsalternativen unterscheiden sich untereinander bzgl. des Erfüllungsgrades eines Ziels (LAUX ET AL. 2014, S. 5). Die Frage, welche Handlungsalternative aus einer Menge an Handlungsalternativen ausgewählt werden soll, stellt das zentrale Element eines Entscheidungsproblems dar (LAUX ET AL. 2014, S. 5). Existiert zwischen den Handlungsalternativen im Grad der Zielerfüllung kein Unterschied, so liegt eine Wahlsituation vor (LAUX ET AL. 2018, S. 5). In einer Wahlsituation kann der Entscheider eine beliebige Handlungsalternative auswählen (LAUX ET AL. 2014, S. 5; R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 9). Als *Entscheidungsprozess* wird nach LAUX ET AL. (2014, S. 5) der sich im Zeitablauf vollziehende Prozess zur Vorbereitung der Auswahl sowie der eigentliche Entschluss für eine Handlungsalternative bezeichnet. Eine *Entscheidung* ist „die (mehr oder weniger bewusste) Auswahl einer Handlungsalternative aus mehreren möglichen Handlungsalternativen“ (LAUX ET AL. 2014, S. 3).

2.1.2 Ablauf von Entscheidungsprozessen

SAGER (2019, S. 16–18) stellt ein Ablaufmodell von Entscheidungsprozessen der präskriptiven Entscheidungstheorie mit acht Phasen vor. Das Ablaufmodell ist eine Synthese¹ von in der Fachliteratur weit verbreiteten Modellen. Die erste Phase des Ablaufmodells von Entscheidungsprozessen nach SAGER (2019, S. 16–18) ist die *Identifikation des Handlungsbedarfes*. Die Identifikation kann durch die Feststellung einer Abweichung des Istzustands vom gewünschten Zustand oder durch die Erkenntnis der Existenz von Handlungsalternativen erfolgen (PFISTER ET AL. 2017, S. 4; GRÜNIG & R. KÜHN 2013, S. 41). In der zweiten Phase *Definition der Aufgabenstellung* wird das konkrete Entscheidungsproblem beschrieben (LAUX ET AL. 2014, S. 12–13). Die *Präzisierung des Zielsystems* ist Gegenstand der dritten Phase (SAGER 2019, S. 18).

¹ SAGER (2019, S. 16–18) stellt insgesamt elf Ablaufmodelle von Entscheidungsprozessen gegenüber und führt sie in der Synthese zusammen. Die Reihenfolge der Prozessphasen ist nicht stets linear zu durchlaufen (SAGER 2019, S. 18; PFOHL & BRAUN 1981, S. 104). Das Auftreten von Erkenntnissen im Entscheidungsprozess, welche in bereits durchlaufenen Phasen berücksichtigt werden müssen, kann zu Rückkopplungen und somit zur Veränderung der Prozessreihenfolge führen (SAGER 2019, S. 18; ADAM 1993, S. 17).

Auf Basis von Wünschen, Bedarfen und Neigungen wird definiert, was bei dem Entscheidungsproblem erreicht werden soll (SCHNEIDER 1995, S. 22). Die Identifikation und Bereitstellung der entscheidungsrelevanten Informationen beinhaltet die Phase *Datenerhebung* (GÖBEL 2014, S. 39). In der fünften Phase erfolgt die *Entwicklung von Handlungsalternativen* (SAGER 2019, S. 16–18). Die anschließende sechste Phase umfasst die *Bewertung* der generierten Handlungsalternativen anhand des Zielsystems und es werden unter Umständen entstehende Folgeprobleme bewertet (BRAUCHLIN & HEENE 1995, S. 119). In der siebten Phase der *Auswahl* wird aus der Menge der Handlungsalternativen die beste Option selektiert und die Willensbildung somit abgeschlossen (SCHREYÖGG & D. GEIGER 2016, S. 56; ADAM 1993, S. 17). Die Umsetzung der ausgewählten Handlungsalternative ist Bestandteil der Willensumsetzung und erfolgt in der Phase *Realisierung* (ADAM 1993, S. 17).

2.1.3 Multikriterielle Entscheidungsprobleme

Zur Lösung eines Entscheidungsproblems ist es notwendig, dass ein Entscheider die Handlungsalternativen mittels Zielvorstellungen bewertet (H.-J. ZIMMERMANN & GUTCHE 1991, S. 20). Zur Definition eines einzelnen Ziels ist ein Kriterium zu bestimmen, welches den entscheidungsrelevanten Aspekt im angestrebten Zustand beschreibt (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 93). Darüber hinaus ist die erwünschte Ausprägung festzulegen (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 93). Bei Entscheidungsproblemen ist die Berücksichtigung von lediglich einem Ziel zur Auswahl einer Handlungsalternative selten ausreichend (M. GEIGER 2005; BELTON & STEWART 2002, S. 13; HWANG & MASUD 1979, S. 1). Die überwiegende Anzahl realer Entscheidungsprobleme in produzierenden Unternehmen ist durch ein simultanes Vorliegen multipler Kriterien charakterisiert (LAUX ET AL. 2018, S. 64). Sie werden als multikriterielle Entscheidungsprobleme bezeichnet. UDE (2010, S. 17–18) unterscheidet die Gründe für die Existenz von multiplen Kriterien in *Motive der Entscheider*, z. B. Existenz mehrerer Stakeholder mit unterschiedlichen Interessen, sowie *Folgen der Problemstellung*, z. B. Existenz von nicht zu einem Ziel aggregierbaren Kriterien.

Die multiplen Kriterien sind als Ziele in einem multidimensionalen Zielsystem im Entscheidungsprozess zu berücksichtigen (MOSER 2014, S. 18; M. GEIGER 2005, S. 6). Das Zielsystem dient der systematischen Zusammenführung und ggf. notwendigen hierarchischen Verknüpfung der Ziele (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 7). Ziele können in drei Beziehungsarten zueinander stehen: Komplementarität, Indifferenz und

2 Grundlagen

Konkurrenz (LAUX ET AL. 2014, S. 45–46; R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 106–107). Bei Komplementarität führt die Verbesserung einer Zielgröße gleichzeitig auch zur Verbesserung der Ausprägung einer anderen Zielgröße. Folglich stellt eine Handlungsalternative, welche die optimale Lösung bezüglich einer Zielgröße repräsentiert, ebenfalls die optimale Lösung im Hinblick auf die andere Zielgröße dar (LAUX ET AL. 2018, S. 47). Bei zueinander indifferenten bzw. neutralen Zielgrößen führt die Verbesserung einer Zielgröße zu keiner Änderung der Ausprägung einer anderen Zielgröße (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 107). Führt die Verbesserung einer Zielgröße zu einer Verschlechterung der Ausprägung einer anderen Zielgröße, wird dies als Konkurrenz bzw. Zielkonflikt bezeichnet (M. GEIGER 2005, S. 7–8; ROMMELFANGER & EICKEMEIER 2002, S. 17). Bei multikriteriellen Entscheidungsproblemen mit konkurrierenden Zielgrößen existiert folglich keine Handlungsalternative, bei der alle Zielgrößen optimal sind (M. GEIGER 2005, S. 8). Im Themenfeld der Produktions- und Instandhaltungsplanung treten alle genannten Beziehungsarten der Ziele auf (vgl. Abschnitt 1.4). Des Weiteren müssen die Beziehungsarten der Ziele nicht den gesamten Wertebereich umfassen, sondern können im Wertebereich wechseln. ROMMELFANGER & EICKEMEIER (2002, S. 17) definieren dies als partielle Indifferenz, Komplementarität bzw. Konkurrenz.

Die Verfahren zur Berücksichtigung mehrerer Zielgrößen in Entscheidungsproblemen werden dem Bereich des Multi Criteria Decision Making (MCDM) zugeordnet (ZAVADSKAS ET AL. 2014, S. 166). Innerhalb des MCDM werden die beiden Klassen des Multi Attribute Decision Making (MADM) und des Multi Objective Decision Making (MODM) unterschieden (OSSADNIK 1998, S. 22; HWANG & YOON 1981, S. 3).

Bei Problemen des MADM werden die Leistungsparameter, Charakteristika oder Eigenschaften der Handlungsalternativen mittels Attributen (engl. *attributes*) angegeben (HWANG & MASUD 1979, S. 12). Des Weiteren existiert eine im Voraus bekannte explizite Menge an vorhandenen Handlungsalternativen, deren Anzahl oftmals gering ist (MOSER 2014, S. 20; H.-J. ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991, S. 25). Der Lösungsraum wird als diskret bezeichnet (OSSADNIK 1998, S. 22; H.-J. ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991, S. 25). Die Auswahl einer Handlungsalternative aus der Menge der Handlungsalternativen erfolgt mittels eines Vergleichs der Attribute untereinander sowie durch das Vergleichen der Ausprägungen der einzelnen Attribute jeder Handlungsalternative (MOSER 2014, S. 20; H.-J. ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991, S. 25).

Bei Problemen des MODM, welche auch als Vektoroptimierungsprobleme bezeichnet werden, steht die Entwicklung der besten Handlungsalternative im Vordergrund (SAGER 2019, S. 20; HANNE 1998, S. 3). Es existiert keine im Voraus bekannte Anzahl an Handlungsalternativen, sondern ein durch Nebenbedingungen definierter impliziter Lösungsraum (M. GEIGER 2005, S. 8). Er beinhaltet alle zulässigen Handlungsalternativen. Die Ziele sind durch quantifizierbare Zielfunktionen gegeben (H.-J. ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991, S. 25; HWANG & MASUD 1979, S. 13). Die Lösung des Entscheidungsproblems erfolgt durch Berechnung der Entscheidungsvariablen aus dem Lösungsraum heraus derart, dass die Ziele einen optimalen Wert annehmen (KALLRATH 2013, S. 1; H.-J. ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991, S. 25). Typischerweise ist der Lösungsraum von Entscheidungsproblemen des MODM sehr groß bis unendlich und ist folglich deutlich größer als bei Problemen des MADM (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 9; EHRGOTT 2005, S. 3). Dies führt dazu, dass die Probleme des MODM zur Lösung in mathematische Modelle überführt und mathematische Methoden angewendet werden müssen (BLUM & NISS 1991, S. 38–39). Insbesondere sind Optimierungsmodelle zur Ermittlung der besten Handlungsalternative in einem implizit definierten Lösungsraum geeignet (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 15).

2.2 Multikriterielle Optimierung

Zur Vorbereitung von möglichst optimalen Entscheidungen und zur Entscheidungsunterstützung im Planungsprozess kommen quantitative Modelle und mathematische Methoden des Wissenschaftsbereiches Operations Research (OR) zum Einsatz (DOMSCHKE ET AL. 2015, S. 1; WERNERS 2013, S. 1). Das Entscheidungsproblem wird im Rahmen der Modellbildung in formaler Darstellung in einem Modell abgebildet (DOMSCHKE ET AL. 2015, S. 4; KALLRATH 2013, S. 6). Ein Modell ist nach DOMSCHKE ET AL. (2015, S. 1–2) „ein vereinfachtes [...] Abbild eines realen Systems oder Problems“. Die Berücksichtigung sämtlicher Sachverhalte von komplexen realen Systemen, wie bspw. Produktionssystemen, ist in der Planung zumeist nicht möglich (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 31). Die quantitativen Modelle und mathematischen Methoden finden unter anderem in den Bereichen der Produktions- und Lagerplanung sowie der Lagerhaltung Anwendung (DOMSCHKE ET AL. 2015, S. 8–9; MOSER 2014, S. 18).

2 Grundlagen

Die geeignete Formulierung ist die Grundlage des Einsatzes von mathematischer Optimierung zur Lösung von Entscheidungsproblemen. Nachfolgend wird zunächst die allgemeine Formulierung mathematischer Optimierungsmodelle dargestellt. Anschließend wird ein Klassifikationsschema für Optimierungsmodelle eingeführt. Abschließend werden ausgewählte Lösungsverfahren für multikriterielle Optimierungsmodelle sowie Algorithmen zur Lösung von Optimierungsmodellen im Kontext der vorliegenden Arbeit vorgestellt.

2.2.1 Formulierung von Optimierungsmodellen

Zur Ermittlung der besten Handlungsalternative mittels Optimierung wird das Entscheidungsproblem in einem mathematischen Modell abgebildet und unter Anwendung eines Algorithmus gelöst (SUHL & MELLOULI 2013, S. 7). Als Optimierung wird das Aufsuchen des größten Wertes (Maximierung) oder des kleinsten Wertes (Minimierung) einer mathematischen Funktion verstanden (PRINZ 2016, S. 61; SUHL & MELLOULI 2013, S. 19–20). Nach COLLETTE ET AL. (2004, S. 18) werden Optimierungsmodelle mit k Zielgrößen wie folgt formuliert:

$$\begin{aligned} \min \quad & \vec{f}(\vec{x}) \\ \text{u. d. N.} \quad & \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \quad \text{und} \quad \vec{h}(\vec{x}) = 0 \\ \text{mit} \quad & \vec{x} \in \mathbb{R}^n, \vec{f}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^k, \vec{g}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^m, \vec{h}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^p; \quad k, m, n, p \in \mathbb{N} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Mittels der Zielfunktion $\vec{f}(\vec{x})$ (engl. *objective function*) wird die Güte einer Lösung beschrieben. Die Zielfunktion $\vec{f}(\vec{x})$ ist von dem Variablenvektor \vec{x} abhängig und auf einen beschränkten Bereich definiert. Die Vorgabe der Zielrichtung der Minimierung einer Zielfunktion f'_k (vgl. Formel 2.1) ist mit keiner Einschränkung der Allgemeinheit verbunden, da eine zu minimierende Zielfunktion ersatzweise mit $f_k := -f'_k$ als maximierende Zielfunktion beschrieben werden kann (H.-J. ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991, S. 97). Der Variablenvektor \vec{x} (engl. *decision variables*) ist ein mehrdimensionaler Vektor aller Entscheidungsvariablen $x_1 \dots x_n$ (DOMSCHKE ET AL. 2015, S. 4). Dem Variablenvektor werden durch den Optimierungsalgorithmus Werte derart zugeordnet, dass die Zielfunktion einen optimalen Wert annimmt (KALLRATH 2013, S. 1). Das System der Nebenbedingungen (engl. *constraints*) besteht aus einer Kombination von Ungleichungen $\vec{g}(\vec{x})$ und Gleichungen $\vec{h}(\vec{x})$ (SUHL & MELLOULI 2013, S. 33). Sie definieren implizit die Menge der zulässigen Punkte des Optimierungsproblems, welche

auch als zulässiger Bereich oder Lösungsraum bezeichnet wird (KALLRATH 2013, S. 17). Darüber hinaus ist der zulässige Wertebereich der Variablen zu definieren. Sie können einen kontinuierlichen, ganzzahligen oder binären Wertebereich haben sowie zusätzlichen Beschränkungen, z. B. Nichtnegativität, unterliegen (DOMSCHKE ET AL. 2015, S. 4–5).

Mathematische Optimierungsmodelle verfügen über charakteristische Strukturen und Eigenschaften, anhand derer sie klassifiziert werden können (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 47).

Verfügt ein Optimierungsmodell über genau eine Zielfunktion, wird es als monokriterielles Optimierungsmodell bezeichnet. Besitzt ein Optimierungsmodell mehrere Zielfunktionen, ist es als multikriterielles Optimierungsmodell zu klassifizieren (H.-J. ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991, S. 25).

In Abhängigkeit des Typus der Zielfunktion und Nebenbedingungen werden lineare und nicht-lineare Optimierungsmodelle differenziert (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 460–461). Bei linearen Optimierungsmodellen werden sowohl der Lösungsraum durch lineare Gleichungen und Ungleichungen sowie die Zielfunktion als lineare Funktion beschrieben (DOMSCHKE ET AL. 2015, S. 8). In nicht-linearen Optimierungsmodellen existieren Funktionen, die einen nicht-linearen Zusammenhang aufweisen (DEMPE & SCHREIER 2006, S. 14).

Anhand des Definitionsbereiches der Entscheidungsvariablen werden kontinuierliche, ganzzahlige und gemischt-ganzzahlige Optimierungsmodelle unterschieden (DOMSCHKE ET AL. 2015, S. 9; DEMPE & SCHREIER 2006, S. 170; COLLETTE ET AL. 2004, S. 4). Können die Entscheidungsvariablen Zahlenwerte des \mathbb{R}^+ annehmen, ist das Optimierungsmodell als kontinuierlich zu klassifizieren. Im Themenfeld der Produktions- und Instandhaltungsplanung existieren jedoch Entscheidungen, deren Gegenstand unteilbare Mengen sind, z. B. Festlegung des Bestandes an Produkten. Diese Entscheidungsvariablen können keine reellen Zahlenwerte des \mathbb{R}^+ annehmen. Sie weisen einen diskreten Wertebereich auf (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 486). Existieren sowohl kontinuierliche als auch ganzzahlige Entscheidungsvariablen, so wird es als gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell (engl. *mixed integer program (MIP)*) bezeichnet (KALLRATH 2013, S. 14).

Des Weiteren werden statische und dynamische Optimierungsmodelle unterschieden (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 47). In der Klasse der statischen Optimierungsmodelle

2 Grundlagen

existieren ausschließlich Entscheidungsvariablen, die unbekannte Parameterwerte, d. h. Elemente des Euklidischen Raumes \mathbb{R}^n sind (RAO 2009, S. 15). Bei dynamischen Optimierungsproblemen existieren Entscheidungsvariablen, die Element einer Funktion einer unabhängigen Variablen, z. B. der Zeit, sind (RAO 2009, S. 15–16; KIRK 1970, S. 11).

Darüber hinaus können Optimierungsmodelle nach dem Informationsgrad klassifiziert werden. Ein deterministisches Optimierungsmodell liegt vor, wenn die Parameter der Zielfunktion und der Nebenbedingungen bekannt sind (DOMSCHKE ET AL. 2015, S. 7). Erfolgt eine Abbildung von Wahrscheinlichkeiten von Parametern mittels Zufallsvariablen, werden diese als stochastische Modelle bezeichnet (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 460).

Die Abbildung 2.1 zeigt zusammenfassend das Klassifikationsschema für Optimierungsmodelle.

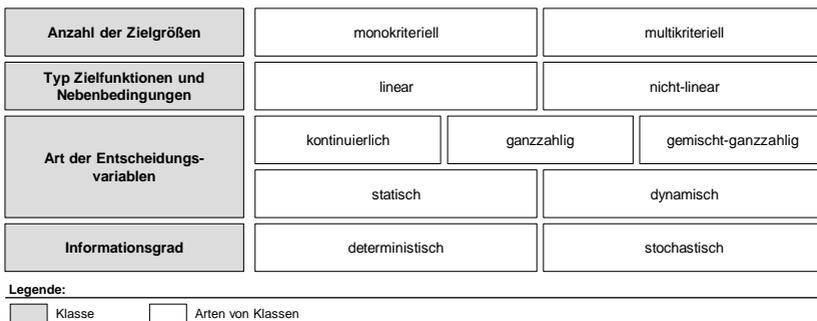


Abbildung 2.1: Klassifikationsschema für Optimierungsmodelle in Anlehnung an DOMSCHKE ET AL. (2015, S. 7) und RAO (2009, S. 15–16)

2.2.2 Lösungsverfahren für multikriterielle Optimierungsmodelle

Im Lösungsprozess eines multikriteriellen Entscheidungsproblems ergeben sich im Vergleich zum monokriteriellen Entscheidungsproblem keine besonderen Herausforderungen, wenn alle Ziele des Zielsystems zueinander vollständig neutral oder komplementär sind (MOSER 2014, S. 19–20). Es wird diejenige Lösung ausgewählt, bei der die Zielgrößenausprägungen optimal sind. Aufgrund der bei multikriteriellen Optimierungsmodellen i. d. R. bestehenden (partiellen) Konkurrenz der Ziele des Zielsystems

existiert keine Lösung, welche bzgl. aller skalarer Zielfunktionen ein Optimum darstellt (DOMSCHKE ET AL. 2015, S. 61). Folglich existiert in diesem Fall keine Handlungsalternative, die für sämtliche Ziele des Zielsystems die beste Lösung darstellt (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 8). Es ist lediglich die Angabe effizienter Lösungen möglich, welche auch als pareto-optimal bzw. undominiert bezeichnet werden (MOSER 2014, S. 20; EHRGOTT 2005, S. 24). Die Menge an effizienten Lösungen wird als effiziente Menge oder als Pareto-Front bezeichnet (UDE 2010, S. 20).

Aus anwendungsorientierter Sicht ist die Angabe der Menge der effizienten Lösungen i. d. R. nicht erstrebenswert, da sie bei praxisrelevanten Problemen sehr groß sein kann (HANNE 1998, S. 11). Das Ziel des Entscheidungsträgers ist vielmehr die Auswahl einer Handlungsalternative. Zur Bestimmung einer oder weniger Handlungsalternativen ist die Angabe einer Artenpräferenz seitens des Entscheidungsträgers erforderlich (SAGER 2019, S. 19; R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 46; PAVAN & TODESCHINI 2009, S. 592).

Eine Artenpräferenz gibt an, welches Ergebnis im Vergleich zu anderen Ergebnissen aus Sicht des Entscheidungsträgers einen höheren Nutzen darstellt (H.-J. ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991, S. 2). Nutzen ist ein Standardmaß, der den Grad der Zufriedenheit des Entscheidungsträgers repräsentiert, welcher aus der Realisierung der gewählten Alternative resultiert (MARLER & ARORA 2004, S. 371).

Die Lösungsverfahren des MODM können nach H.-J. ZIMMERMANN & GUTSCHE (1991, S. 30) basierend auf HWANG & MASUD (1979, S. 8) danach klassifiziert werden, wann ein Entscheidungsträger seine Artenpräferenz als Information in den Lösungsprozess einfließen lässt. Es werden *a priori Information*, *a posteriori Information*, *progressive Information* sowie *keine Informationsartikulation* unterschieden (H.-J. ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991, S. 31; HWANG & MASUD 1979, S. 8). Bei Verfahren der Klasse *a priori Information* ist die Information der Artenpräferenz bereits vor der Durchführung des Verfahrens bekannt (HWANG & MASUD 1979, S. 30). Erfolgt die Angabe der Präferenz erst nach der Anwendung des Lösungsverfahrens, ist das Verfahren Element der Klasse *a posteriori Information*. Bei Verfahren der Klasse *progressive Information* wird die Information durch einen interaktiven Prozess bei der Anwendung erlangt (HWANG & MASUD 1979, S. 102). Verfahren der Klasse *keine Informationsartikulation* treffen Annahmen über die Artenpräferenz des Entscheidungsträgers (HWANG & MASUD 1979, S. 21). Nachfolgend werden in Anlehnung an die in SAGER (2019, S. 24) und MARLER & ARORA (2004) vorgestellte Notation (vgl. Tabelle 2.1) ausgewählte Methoden der Klasse *a priori Information* vorgestellt.

2 Grundlagen

Tabelle 2.1: Notation der Lösungsverfahren der Klasse *a priori Information* in Anlehnung an MARLER & ARORA (2004) und SAGER (2019, S. 24)

Formelzeichen	Bedeutung
\vec{f}	Vektor der Zielfunktionen
f_i	Zielfunktion i
k	Anzahl Zielfunktionen
u	Nutzenfunktion
\vec{w}	Vektor der Gewichtungskoeffizienten
w_i	Gewichtungskoeffizient des Kriteriums i
\vec{x}	Vektor der Entscheidungsvariablen
X	Zulässiger Lösungsraum

2.2.2.1 Weighted-sum-Methode

In der Weighted-sum-Methode (dt. *Zielgewichtung*) werden die einzelnen Zielfunktionen unter Anwendung von Gewichtungsfaktoren zu einer Meta-Zielfunktion aggregiert (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 359). Das multikriterielle Optimierungsmodell wird in ein monokriterielles Ersatzmodell überführt (COLLETTE ET AL. 2004, S. 45). Dabei spiegelt eine Gewichtung einer Zielfunktion die Präferenz des Entscheiders für das jeweilige Ziel wider.

$$u = \sum_{i=1}^k w_i f_i(\vec{x})$$

$$\text{mit } h = i = 1, 2, \dots, k \quad (2.2)$$

Kritikpunkte an der Weighted-sum-Methode sind die Nichterreichbarkeit von effizienten Lösungen der pareto-optimalen Menge bei nicht-konvexen Mengen sowie die Herausforderungen bei der Wahl der Gewichtungsfaktoren in der Anwendung (SUHL & MELLOULI 2013, S. 116; MARLER & ARORA 2004, S. 374; HANNE 1998, S. 17).

2.2.2.2 Lexikographische Methode

In der lexikographischen Methode werden die Zielfunktionen in einer Reihenfolge nach ihrer Wichtigkeit für den Entscheidungsträger sortiert. Das Optimierungsmodell wird, beginnend mit der Zielfunktion der höchsten Wichtigkeit, schrittweise gelöst (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 361). Nach Gleichung (2.3) wird die Reihenfolgeposition einer Zielfunktion durch den Index i angegeben und $f_j(\vec{x}_j^*)$ repräsentiert das Optimum der j . Zielfunktion, welches in der j . Iteration ermittelt wurde (MARLER & ARORA 2004, S. 375).

$$\begin{aligned} \min_{\vec{x} \in X} \quad & f_i(\vec{x}) \\ \text{u. d. N.} \quad & f_j(\vec{x}) \leq f_j(\vec{x}_j^*) \\ \text{mit} \quad & j = 1, 2, \dots, i-1, i > 1, i = 1, 2, \dots, k \end{aligned} \quad (2.3)$$

Die Anwendung der lexikographischen Methode erfordert, dass der Entscheidungsträger die Ziele in eine eindeutige Reihenfolge bringen kann (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 361). Des Weiteren werden die Zielfunktionen f_j vernachlässigt, für die ($i > j$) gilt, wenn in der j . Iteration ein eindeutiges Optimum ermittelt wurde (DEMPE & SCHREIER 2006, S. 64).

2.2.2.3 Goal-Programming-Methode

In der Goal-Programming-Methode (dt. *Zielprogrammierung*) wird für jede Zielfunktion f_j ein Zielwert b_j spezifiziert (MARLER & ARORA 2004, S. 377). Die Zielwerte b_j entsprechen den Zielvorgaben, welche der Entscheidungsträger so genau wie möglich erreichen möchte (CHARNES & COOPER 1977, S. 40). Im Allgemeinen können jedoch nicht alle Zielvorgaben gleichzeitig erreicht werden, wodurch Abweichungen d_j von den Zielvorgaben akzeptiert werden müssen (H.-J. ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991, S. 191). Nach HWANG & MASUD (1979, S. 56) wird als bevorzugte Lösung diejenige Lösung bezeichnet, bei der die Summe aller Abweichungen $\sum_{i=1}^k |d_j|$ von den Zielvorgaben für die Zielfunktionen des Zielsystems minimal werden. Die Abweichungen werden in positive und negative Anteile ($d_j = d_j^+ - d_j^-$) unter den Bedingungen ($d_j^+ \geq 0$), ($d_j^- \geq 0$) und ($d_j^+ d_j^- \geq 0$) unterschieden (MARLER & ARORA 2004, S. 377).

2 Grundlagen

Die Goal-Programming-Methode ermöglicht neben Extremierungszielen auch die Abbildung von Satisfizierungszielen (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 364). Dazu werden Anspruchsniveaus bzw. mindestens zu erreichende oder höchstens annehmbare Schranken für die jeweilige Zielfunktion angegeben (DOMSCHKE ET AL. 2015, S. 62–63).

$$\begin{aligned} \min_{\vec{x} \in X, \vec{d}^+, \vec{d}^-} \quad & \sum_{i=1}^k (d_i^+ + d_i^-) \\ \text{u.d.N.} \quad & f_j(\vec{x}) + d_j^+ - d_j^- = b_j, \quad d_j^+ \geq 0 \quad d_j^- \geq 0, \quad d_j^+ d_j^- \geq 0 \\ \text{mit} \quad & j = 1, 2, \dots, k \end{aligned} \tag{2.4}$$

Als Hauptkritikpunkt ist nach MARLER & ARORA (2004, S. 377) die nicht garantierte Ermittlung einer pareto-optimalen Lösung anzusehen.

2.2.3 Algorithmen zur Lösung von Optimierungsmodellen

Im Anschluss an die Abbildung des multikriteriellen Entscheidungsproblems in einem mathematischen Modell und der Implementierung des Lösungsverfahrens gilt es das Optimierungsmodell zu lösen. Die übergeordnete Zielstellung des Lösungsprozesses ist die Ermittlung der Entscheidungsvariablen derart, dass die bestmögliche Ausprägung der Zielfunktion erreicht wird (SUHL & MELLOULI 2013, S. 19–20). Zur Ermittlung der Entscheidungsvariablen des Modells wird eine Verarbeitungsvorschrift eingesetzt, welche als Lösungsalgorithmus bezeichnet wird (DOMSCHKE ET AL. 2015, S. 2). Es wurden in der Literatur zahlreiche Algorithmen für unterschiedliche Klassen von Optimierungsmodellen entwickelt und in leistungsfähiger Software implementiert (SUHL & MELLOULI 2013, S. 79).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Standardalgorithmus einer leistungsfähigen Software verwendet. Folglich ist für das Verständnis der Ausführungen kein vertieftes Wissen über Algorithmen zur Lösung von Optimierungsmodellen notwendig. Es wird daher für Ausführungen zu Lösungsalgorithmen auf weiterführende Arbeiten verwiesen².

² Umfangreiche Darstellungen zu Lösungsalgorithmen sind u. a. in den Arbeiten KORTE & VYGEN (2018) und DEMPE & SCHREIER (2006) zu finden.

2.3 Informationssysteme in produzierenden Unternehmen

2.3.1 Systeme der Produktionsplanung und -steuerung

Die Informationssysteme der Produktionsplanung und -steuerung dienen der Verwaltung der Daten sowie der operativen Unterstützung. Sie lassen sich anhand ihrer Funktionen sowie anhand des betrachteten Zeithorizontes in sog. Hierarchieebenen untergliedern (VDI 5600; KLETTI 2015, S. 28). Es werden die Unternehmensleit-, die Fertigungsleit- und Fertigungsebene unterschieden.

In der Unternehmensleitebene werden Informationssysteme zur Abdeckung und Unterstützung der Funktionen der kaufmännischen und technischen Auftragsabwicklung eingesetzt (SCHUH ET AL. 2012b, S. 195). Sie werden als Enterprise Resource Planning (ERP) Systeme bezeichnet und betrachten mit dem Horizont von Wochen bis Monaten einen langfristigen Zeithorizont (KLETTI 2015, S. 28). Zusätzlich können diese Systeme Funktionen des Rechnungswesens und der Personalwirtschaft umfassen (O. JACOB 2008, S. 1). Übernehmen die Systeme des ERP im Wesentlichen die Funktionen der Produktionsplanung, werden sie auch als PPS-Systeme bezeichnet (KURBEL 2016, S. 208–209). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der Kopplung mit Systemen des Advanced Planning and Scheduling (APS), welche oftmals auf dem Konzept des Manufacturing Resource Planning (MRP II) basieren und eine Feinterminierung ermöglichen (ENGELHARDT 2015, S. 23; WIENDAHL 2010, S. 330; MARCZINSKI 2008).

Im Vergleich zu ERP-Systemen ermöglichen die Informationssysteme der Fertigungsleitebene einen höheren Detaillierungsgrad (VDI 5600). Es kommen Manufacturing Execution Systeme (MES) zum Einsatz (KURBEL 2016, S. 345). Sie unterstützen die kurzfristige Feinplanung mit dem Zeithorizont von Schichten bis Tagen (KLETTI 2015, S. 28). Funktionen von MES sind u. a. das Betriebsmittelmanagement, die Aggregation von Daten von Produktionssystemressourcen sowie die Weitergabe der Daten an die übergeordnete Ebene (VDI 5600; LOUIS 2009, S. 23).

In der Fertigungsebene werden die Arbeitsgänge gemäß den Vorgaben der übergeordneten Hierarchieebenen umgesetzt. Die Informationssysteme an den Maschinen und Arbeitsplätzen werden zur Unterstützung der Durchführung der Arbeitsgänge sowie zur informationstechnischen Verbindung von Leit- und Feldebene eingesetzt (VDI 5600). Der betrachtete Zeithorizont umfasst Sekunden bis Minuten (KLETTI 2015, S. 28). Es kommen unter anderem Systeme zur Betriebsdatenerfassung (BDE) und

2 Grundlagen

Maschinendatenerfassung (MDE) sowie Automatisierungstechnik wie bspw. speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) zum Einsatz (VDI 5600).

In der betrieblichen Realität existieren neben der dargestellten Gliederung darüber hinaus Lösungen, welche mehrere Funktionen zusammenfassen. Die Trennung der Systeme zwischen den Ebenen ist somit ebenso von der unternehmensspezifischen Umsetzung abhängig (LOUIS 2009, S. 16; BERLAK 2003, S. 15–16).

2.3.2 Systeme der Instandhaltungsplanung und -steuerung

Die Informationssysteme der Instandhaltungsplanung und -steuerung bilden mit ihren Modulen und Funktionen den Auftragsprozess in der Instandhaltung ab und unterstützen bei der Datenverwaltung (BLÜMEL 2011, S. 31; WESTKÄMPER ET AL. 1999, S. 47). Der Auftragsprozess der Instandhaltung umfasst nach WESTKÄMPER ET AL. (1999, S. 47) die Bedarfsmeldung für Instandhaltungsleistungen, die technische Klärung der Ausführungsplanung, -veranlassung und -durchführung bis zum Auftragsabschluss. Die im Auftragsprozess angefallenen Informationen werden in der Datenverwaltung abgelegt (W. KLEIN 1988, S. 37).

Die wesentlichen Funktionen von Systemen der IPS werden nach WESTKÄMPER ET AL. (1999, S. 85) in Objektverwaltung, Basisdatenverwaltung, Kosten-Controlling, Bestellwesen, Ersatzteilwesen, Auftragsplanung, Auftragssteuerung, Sonderfunktionen sowie Auswertungen, Analysen und Grafiken unterschieden. Die Sonderfunktionen, wie bspw. Lebenszyklenkostenanalysen, sind vom Anbieter des Systems sowie vom unternehmensspezifischen Bedarf abhängig (BLÜMEL 2011, S. 32–33).

3 Anforderungen

Im nachfolgenden Abschnitt 3.1 werden die Anforderungen dargestellt, welche seitens eines Ansatzes zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung zu erfüllen sind. Zunächst werden die Anforderungen aus der anwendungsorientierten Wissenschaft abgeleitet. Anschließend erfolgt die Ableitung der Anforderungen aus den beiden Planungsbereichen, welche zur Unterstützung des Planungsprozesses sowie der Sicherung der Planungsqualität notwendig sind (Abschnitt 3.2).

3.1 Anforderungen aus der anwendungsorientierten Wissenschaft

Das Planungsproblem der Produktions- und Instandhaltungsplanung ist primär dem Bereich der anwendungsorientierten Wissenschaften zuzuordnen (vgl. Abschnitt 1.5). Deren Ziel ist es, „[...] Regeln, Modelle und Verfahren für praktisches Handeln zu entwickeln“ (H. ULRICH 1982, S. 1). Aus dieser Zielstellung lassen sich die nachfolgend aufgeführten, übergeordneten Anforderungen ableiten (TESCHEMACHER 2019, S. 37–38; STEINHÄUSSER 2018, S. 35–36; H. ULRICH 1982).

1. *Richtigkeit der Ergebnisse*: Die Ermittlung von richtigen Ergebnissen ist eine grundlegende Anforderung. Dies ist in der vorliegenden Arbeit insbesondere in der Modellbildung sowie in der Lösungsermittlung relevant. Die Modellbildung soll derart erfolgen, dass die Effekte der Realität hinreichend genau beschrieben werden können. Des Weiteren müssen die im Planungsprozess ermittelten Lösungen gültig sein und dürfen keine Restriktionen verletzen.
2. *Anwendbarkeit im Problemkontext*: Die Anwendung der Forschungsergebnisse in deren Problemkontext muss den Anwender dazu befähigen, die dargestellte Problemstellung zu lösen oder zumindest die negativen Auswirkungen der Defizite zu reduzieren. Im Fall der vorliegenden Arbeit ist der industrielle Kontext zu berücksichtigen und die Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse in produzierenden Unternehmen sicherzustellen.

3 Anforderungen

3. *Wirtschaftlichkeit der Anwendung*: Die Generierung eines wirtschaftlichen Vorteils aus der Lösung einer Problemstellung ist das Ziel eines auf langfristigen Fortbestand ausgerichteten produzierenden Unternehmens. Folglich muss der Nutzen, welcher sich aus der Anwendung der Forschungsergebnisse ergibt, die Kosten der Anwendung aus Implementierung und Ausführung übersteigen. Die Wirtschaftlichkeit der Anwendung bezieht sich in der vorliegenden Arbeit auf die effiziente und effektive Durchführung von Produktions- und Instandhaltungsleistungen sowie den Einsatz von Ressourcen des Produktionssystems.
4. *Allgemeingültigkeit*: Die erzielten Ergebnisse müssen ebenfalls auf weitere Problemstellungen, welche sich innerhalb des im Abschnitt 1.4 dargestellten Betrachtungsbereiches befinden, anwendbar sein. Daraus folgt, dass die Ergebnisse allgemein gültig sein müssen. Folglich müssen die erzielten Ergebnisse in der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung nutzbar sein.

Die Anforderungen der anwendungsorientierten Wissenschaft sind mittels Anforderungen aus den Planungsbereichen zu spezifizieren, da der direkten Anwendung die fehlende Eindeutigkeit in Bezug zur Zielsetzung gegenübersteht.

3.2 Anforderungen aus den Planungsbereichen

Ein Ansatz zur Adressierung der Defizite (vgl. Abschnitt 1.2) sowie zur Realisierung der Potenziale einer integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung (vgl. Abschnitt 1.1) muss die nachfolgend dargestellten Anforderungen erfüllen.

A.1 Ausreichende Detailtiefe der Produktionssystemmodellierung: Ein reales Produktionssystem besteht i. d. R. aus mehreren, teilweise voneinander abhängigen Ressourcen (WANG & LIU 2015, S. 182). Zur ganzheitlichen Optimierung der Wirtschaftlichkeit eines Produktionssystems ist die Abbildung mehrerer Ressourcen erforderlich (WONG ET AL. 2012, S. 5683). Es ist eine Modellierung der Ebenen *Segmente*, *Linien* und *Maschinen* notwendig (vgl. Abschnitt 1.4.1.3).

A.2 Berücksichtigung der Restriktionen der Ressourcen des Produktionssystems: Zur Sicherstellung der Zulässigkeit der Handlungsalternativen sind darüber hinaus die existierenden Restriktionen der Ressourcen des Produktionssystems zu berücksichtigen. Ein Beispiel der betrieblichen Realität ist die Einhaltung von maximalen Lagerbeständen.

A.3 Abbildung der Entscheidungsdimensionen der Produktionsplanung:

Die entscheidungsrelevanten Variablen der zu Grunde liegenden Produktionsprozesse sind in der Planung abzubilden (ZELEWSKI ET AL. 2008, S. 2). Folglich sind die in Abschnitt 1.4.2.3 abgeleiteten wesentlichen Entscheidungsdimensionen der Produktionsplanung zu berücksichtigen.

A.4 Abbildung der Entscheidungsdimensionen der Instandhaltungsplanung:

Diese Anforderung ergibt sich analog zur Anforderung der Abbildung der Entscheidungsdimensionen der Produktionsplanung. Die im Abschnitt 1.4.3.3 abgeleiteten wesentlichen Entscheidungsdimensionen der Instandhaltungsplanung müssen abgebildet werden.

A.5 Berücksichtigung verschiedener Instandhaltungsstrategien: Es können in der betrieblichen Realität für die Ressourcen eines Produktionssystems unterschiedliche Instandhaltungsstrategien zur Anwendung kommen (KALUZA ET AL. 1994, S. 22). Obwohl die Festlegung der Instandhaltungsstrategien für Ressourcen nicht Teil der Instandhaltungsplanung ist, würde die Modellierung lediglich einer Strategie zu Einschränkungen des Anwendungsbereiches führen. Es besteht die Anforderung, dass ein Ansatz zur integrierten Planung verschiedene Instandhaltungsstrategien abbilden kann.

A.6 Berücksichtigung der Interdependenzen der Planungsbereiche: Produktion und Instandhaltung nutzen teilweise dieselben Ressourcen des Produktionssystems, welche über eine begrenzte Kapazität verfügen. Zur Ermittlung eines durchführbaren Plans müssen die Nutzung der Kapazität aufeinander abgestimmt und der Einsatz der Ressourcen synchronisiert werden (ALMEDER & ALMADA-LOBO 2011, S. 7317). Des Weiteren existieren Interdependenzen zwischen Nutzungsumfang und Intensität von Produktionsleistungen mit dem Bedarf für Instandhaltungsleistungen (HERZIG 1975, S. 172). Die Wechselwirkungen sind zu modellieren, zu bewerten und in der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen (KRÖNING 2014, S. 6).

A.7 Vollständige Durchsuchung des Lösungsraumes: Aufgrund der Vielzahl an Entscheidungen in der Produktions- und Instandhaltungsplanung kann eine vorab definierte Menge an Handlungsalternativen nicht den gesamten Lösungsraum abdecken und zu suboptimalen Entscheidungen führen. Es ist erforderlich, die Handlungsalternativen implizit zu erfassen und eine vollständige Durchsuchung des gesamten Lösungsraumes zu ermöglichen.

3 Anforderungen

A.8 Berücksichtigung mehrerer Zielgrößen in der Planung: Im Planungsprozess sind sowohl die Zielgrößen der Produktions- als auch der Instandhaltungsplanung zu berücksichtigen (KRÖNING 2014, S. 18). Bei der Ermittlung der Handlungsalternativen muss zwischen den einzelnen Zielen ein Ausgleich erfolgen (BERRICHI ET AL. 2010, S. 1584). Des Weiteren müssen die Produktions- und Instandhaltungsplanung ein integraler Bestandteil der strategischen Geschäftsprozesse sowie die Ressourcen und Prozesse eines Unternehmens auf den Kundennutzen abgestimmt sein (SCHUH ET AL. 2012a, S. 11; WEINSTEIN & CHUNG 1999, S. 1060). Folglich ist die Planung an den für Kunden relevanten Faktoren zu orientieren.

A.9 Erzeugung multipler Handlungsalternativen: Die Notwendigkeit der Ermittlung und Bewertung von Handlungsalternativen anhand rationaler Kriterien ist eine Folge der Charakterisierung der Entscheidungssituation als Konfliktsituation (BERRICHI ET AL. 2009, S. 389; WEINSTEIN & CHUNG 1999, S. 1060). Die Koordination der Leistungen ist durch unterschiedliche Zielsetzungen sowie Informationsstände erforderlich (KRÖNING 2014, S. 18; GÖSSINGER & KALUZNY 2010, S. 5). Die Erzeugung multipler Handlungsalternativen und deren Bewertung ermöglicht eine effiziente Abstimmung der beiden Planungsbereiche und kann einen Beitrag zum Ausgleich der unterschiedlichen Zielsetzungen sowie Informationsstände leisten. Des Weiteren kann dadurch Wissen über das Systemverhalten generiert und gesammelt werden (SUHL & MELLOULI 2013, S. 90).

A.10 Abbildung der Phasen der Entscheidungsfindung: Die Produktions- und Instandhaltungsplanung sollen im Planungsprozess dieselbe Wichtigkeit haben (BERRICHI ET AL. 2010, S. 1584; BERRICHI ET AL. 2010, S. 391). Die Gestaltung des Planungsprozesses als systematisch-methodischer und rationaler Entscheidungsprozess ermöglicht die Konsensfindung. Folglich ist die Entscheidungsfindung in der integrierten Planung am Prozessmodell der präskriptiven Entscheidungstheorie zu orientieren.

Im Anhang A in Tabelle A.1 ist die Zuordnung der mittels der abgeleiteten Anforderungen adressierten Defizite dargestellt.

4 Stand der Erkenntnisse

In den nachfolgenden Abschnitten erfolgt die Darstellung des Standes der Erkenntnisse. Die Klassifikation der relevanten Forschungsrichtungen erfolgt im Abschnitt 4.1. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 4.2 die Ansätze der jeweiligen Forschungsrichtungen vorgestellt. Abschließend werden die Ansätze den Anforderungen gegenübergestellt und das Forschungsdefizit sowie der Handlungsbedarf abgeleitet (Abschnitt 4.3).

4.1 Klassifikation der Forschungsrichtungen in der Literaturanalyse

Der Stand der Erkenntnisse gliedert sich in (1) Ansätze zur Modellierung von Produktionssystemen und planungsrelevanten Informationen in Systemen der Produktions- und Instandhaltungsplanung sowie (2) Ansätze zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung. Die erstgenannten Ansätze dienen der Modellierung der Eigenschaften und Fähigkeiten von Ressourcen sowie der Abbildung der Charakteristika und Anforderungen der Leistungsprozesse. Sie werden im Abschnitt 4.2.1 vorgestellt. Die zweitgenannten Ansätze werden im Abschnitt 4.2.2 dargestellt. In Anlehnung an WERNERS (2013, S. 3–4) werden als Modelle der modellgestützten Planung *Beschreibungsmodelle*, *Prognosemodelle*¹ und *Entscheidungsmodelle* unterschieden (vgl. Abbildung 4.1).

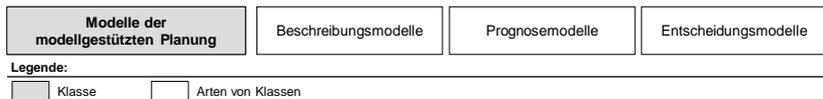


Abbildung 4.1: Klassifikation von Modellen der modellgestützten Planung in Anlehnung an WERNERS (2013, S. 3–4)

¹ WERNERS (2013, S. 3–4) bezeichnet die Klasse der Prognosemodelle als Erklärungs- und Prognosemodelle. Erklärungsmodelle fokussieren die Untersuchung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Parametern mit dem Ziel, das Systemverhalten zu erklären oder Hypothesen über das Verhalten aufzustellen (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 33). Das Ziel dieser Arbeit ist eine in die Zukunft ausgerichtete integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung auszuführen. Folglich werden Prognosemodelle fokussiert.

4 Stand der Erkenntnisse

Beschreibungsmodelle dienen der Abbildung der Realität zur Feststellung eines bestimmten Sachverhaltes sowie zur Problemerkennung (WERNERS 2013, S. 3). Auf Beschreibungsmodellen beruhen Vorgehensweisen und Bewertungsansätze (PRINZ 2016, S. 70). Sie erlauben keine Erklärung oder Prognose realer Vorgänge (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 33). Des Weiteren sind sie rechnerunabhängige, analytisch nicht elaborierte Modelle (SAGER 2019, S. 30). In der vorliegenden Arbeit werden ihnen sog. Prozessmodelle zugeordnet, welche den Ablauf der Prozessphasen der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung beschreiben.

Prognosemodelle dienen der Vorhersage von zukünftigen Entwicklungen sowie der Bestimmung von Konsequenzen geplanter Handlungen (DOMSCHKE ET AL. 2015, S. 3–4; WERNERS 2013, S. 3). Eine in der Planung von Abläufen in Produktionssystemen verbreitete Unterart von Prognosemodellen sind Simulationsmodelle. Simulationsmodelle sind rechnergestützt, analytisch elaboriert und ermöglichen die Untersuchung einer vorab definierten Menge an Handlungsalternativen auf ihre Zielwirkung (WERNERS 2013, S. 258; R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 33–34). Sie werden insbesondere dann eingesetzt, wenn keine analytische Beschreibung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen oder nur eine geringe Anzahl an Handlungsalternativen existiert (DOMSCHKE ET AL. 2015, S. 233; R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 34; HACKSTEIN 1989, S. 123).

Entscheidungsmodelle dienen der Ermittlung von Aktivitäten, welche unter Berücksichtigung äußerer Einflüsse und der Möglichkeiten sowie anhand der Ergebnisbewertung zu möglichst optimalen Entscheidungen führen (WERNERS 2013, S. 3–4). In der Planung angewendete Entscheidungsmodelle sind mathematische Optimierungsmodelle, in welchen die Zusammenhänge und Elemente eines Entscheidungsproblems in formaler Sprache modelliert sind. Sie sind rechnergestützt, analytisch elaboriert und die Handlungsalternativen sind implizit durch Nebenbedingungen gegeben (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 41). Zur Lösung kommen Optimierungsalgorithmen zur Anwendung (UDE 2010, S. 46; F. JACOB 2006, S. 26).

4.2 Literaturanalyse

Nachfolgend werden zunächst die wichtigsten Ansätze zur Modellierung von Produktionssystemen und planungsrelevanten Informationen in Systemen der Produktions- und Instandhaltungsplanung dargestellt. Anschließend werden die bedeutendsten Ansätze der drei Modellklassen der modellgestützten Planung im Themenfeld der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung vorgestellt.

4.2.1 Ansätze zur Modellierung von Produktionssystemen und planungsrelevanten Informationen

Modellierungsansatz nach NAGARUR ET AL. (1999): NAGARUR ET AL. (1999) stellen für ein Informationsmanagementsystem der Instandhaltung einen objektorientierten Modellierungsansatz für Produktionssysteme vor. Das Informationsmanagementsystem setzt sich aus einem Informationssystem und einem Entscheidungsunterstützungssystem, welches in NAGARUR & KAEWPLANG (1999) vorgestellt wird, zusammen. Wesentlicher Bestandteil des Informationsmanagementsystems ist das Informationsmodell des Produktionssystems und der Instandhaltung. Zur Realisierung einer modularen Gestalt werden die drei Klassen physische Objekte, Informationsobjekte und Steuerungs-/Entscheidungsobjekte differenziert. Die Klasse der physischen Objekte beinhaltet physische Ressourcen, z. B. Maschinen. Informationsobjekte umfassen materielle oder immaterielle Informationseinheiten, z. B. Arbeits- und Instandhaltungspläne. Steuerungs-/Entscheidungsobjekte sind immaterielle Objekte, welche zur Entscheidungsunterstützung benötigt werden, wie z. B. die Wartungsplanung. Zur Analyse des Produktionssystems und der Instandhaltung kommt die Icam-Definition-Methode (IDEF) zur Anwendung. Eine Modellierung der Produktion erfolgt im Ansatz von NAGARUR ET AL. (1999) nicht.

Modellierungsansatz nach MORYSON (2004): MORYSON (2004) stellt eine Methode zur rechnergestützten Generierung und Auswahl von Prozessketten manuell ausgewählter Fertigungsprozesse in der Produktionsplanung vor. Die Methode basiert auf einer feature-basierten Beschreibung von Produkten. Die Produktionsressourcen werden u. a. in organisatorische Informationen, Betriebsmittelfähigkeiten, z. B. Arbeitsraum, Wirtschaftlichkeit, wie z. B. Anschaffungskosten, und Umgebungseinflüsse, z. B. Geräuscheinflüsse, unterteilt. Die ausgewählten Einzelprozesse und die generierten Prozessketten werden in einer Prozessdatenbank gespeichert, die produktseitigen Anforderungen mit den Eigenschaften der Prozesse abgeglichen und eine Zuordnung durchgeführt. Abschließend erfolgt eine Überprüfung der Wechselwirkungen sowie eine Optimierung der Prozessketten. Die Instandhaltung wird im Ansatz nicht betrachtet.

Modellierungsansatz nach OSTGATHE (2012): OSTGATHE (2012) entwickelt ein Datenmodell zur Beschreibung der Fähigkeiten von adaptiven Produktionssystemen. Es dient der strukturierten Abbildung von Informationen für die Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Ressourcen in einem System zur produktbasierten Steuerung von

4 Stand der Erkenntnisse

Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Die Basis des Datenmodells bilden Module von Produkten, Ressourcen und Prozessen, welche OSTGATHE (2012) in Anlehnung an Normen und Richtlinien (u. a. DIN 8580, VDI 2815) entwickelt. Zentrales Element des Datenmodells ist das Ressourcenmodul, welches die Zuordnung von auftragsbezogenen Anforderungen zu ressourcenspezifischen Fähigkeiten ermöglicht. Zur Beschreibung einer Ressource werden die Informationsklassen Organisatorische Informationen, Betriebsmittelfähigkeiten, Wirtschaftlichkeit und Umgebungseinflüsse differenziert. Organisatorische Informationen umfassen die grundlegenden Angaben zu den Betriebsmitteln, z. B. Ressourcen-Nummer. Zur Beschreibung der Fähigkeiten der Ressourcen dienen die Verfahrensarten nach DIN 8580 sowie technische Informationen. Die technischen Informationen beinhalten technologiebezogene Informationen, wie z. B. Werkstoffe, sowie geometriebezogene Informationen, z. B. Arbeitsraum. Informationen der Klasse Wirtschaftlichkeit beinhalten die kostenrelevanten Eigenschaften der Ressource, z. B. Maschinenstundensätze, Instandhaltungs- sowie Rüstzeiten. Die Umgebungseinflüsse umfassen die Rahmenbedingungen für den Einsatz einer Ressource, z. B. Energieverbrauch. Eine Betrachtung der Fähigkeiten von Betriebsmitteln bzgl. Instandhaltungsleistungen erfolgt nicht.

Modellierungsansatz nach DUARTE ET AL. (2013): DUARTE ET AL. (2013) stellen einen Entwurf einer unternehmensübergreifenden Datenbank für planungsrelevante Informationen der Instandhaltung vor. Die Datenbank umfasst Betriebsdaten, Umgebungseinflüsse und -bedingungen sowie Ausfall- und Instandhaltungsdaten. Die Informationen der Datenbank sind durch den Hersteller der jeweiligen Ressource, den Anbieter der Instandhaltungsleistungen oder den Betreiber der Ressource bereitzustellen. Des Weiteren werden ein Vorgehensmodell zur Datenerfassung und -aufbereitung sowie Methoden zur a priori Ermittlung des Bedarfes für Instandhaltungsleistungen vorgestellt. Eine Modellierung von Produktionsleistungen sowie die Abbildung von Produktions- und Instandhaltungsaufträgen erfolgen nicht.

Modellierungsansatz nach F. GEIGER (2015): F. GEIGER (2015) entwickelt ein Datenmodell für ein System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten. Das Datenmodell besteht aus drei Teilmodellen: (1) Auftragsmodell, (2) Ressourcenmodell und (3) Produktionsmodell. Das Auftragsmodell modelliert die Produktionsaufträge sowie den Entstehungsprozess von Produkten. Das Ressourcenmodell dient der Beschreibung von Fähigkeiten von Betriebsmitteln sowie der Auswahl und Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Maschinen. Die Klassifi-

kation der Fähigkeiten erfolgt anhand der Fertigungsverfahren nach DIN 8580. Das Produktionsmodell ermöglicht, die Struktur und das Layout der Produktionsebene zu modellieren. Zur Ermittlung des Maschinenbelegungsplans kommen ein auf Prioritätsregeln basierender Algorithmus sowie ein wissensbasiertes System zum Einsatz. Eine Betrachtung und Modellierung der Instandhaltung erfolgen nicht.

Modellierungsansatz nach HEES (2017): HEES (2017) entwickelt eine Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme sowie eine Methode für die Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme. Ziel der Modellierung und Beschreibung ist die Abbildung konfigurationsabhängiger Eigenschaften für die PPS. HEES (2017) untergliedert die planungsrelevanten Informationen in technische und planerische Informationen. Die technischen Informationen beinhalten die Struktur, z. B. mögliche Module, sowie die Eigenschaften von Ressourcen. Die planerischen Informationen umfassen die Parameter der Planung, z. B. konfigurationsabhängige Bearbeitungszeiten. Die Anforderungen der Arbeitsvorgänge der Produktion sowie die technischen Fähigkeiten der einzelnen Konfigurationen werden mittels Klassifikationschemas für Fertigungsprozesse auf Basis von DIN 8580 und für die Montage- und Handhabungsprozesse basierend auf VDI 2860 spezifiziert und in Technologievektoren überführt. Die Zuordnung erfolgt durch einen Technologieabgleich der jeweiligen Technologievektoren. Des Weiteren werden die Skalierbarkeit der Kapazitäten von Ressourcen sowie Aufwände zur Rekonfiguration modelliert. Die Ermittlung des Produktionsplans erfolgt unter Einsatz eines monokriteriellen Optimierungsmodells im Rahmen der Methode. Eine Modellierung der Anforderungen und Fähigkeiten der Ressourcen für Instandhaltungsleistungen erfolgt nicht.

Fazit zu den Modellierungsansätzen: Die Modellierung von Produktionssystemen und planungsrelevanten Informationen bildet die informationstechnische Basis für einen Ansatz zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung. Es sind folglich eine ausreichende Detailtiefe der Modellierung sowie die Berücksichtigung der Restriktionen sicherzustellen. Es zeigt sich, dass kein Ansatz eine integrierte Modellierung und Beschreibung von Leistungen der Produktion und Instandhaltung beinhaltet. Die Ansätze von NAGARUR ET AL. (1999) und DUARTE ET AL. (2013) betrachten die planungsrelevanten Informationen der Instandhaltung. Die Modellierung der technischen Anforderungen und Fähigkeiten der Ressourcen des Produktionssystems für Instandhaltungsleistungen erfolgt jedoch nicht. Der Ansatz von OSTGATHE (2012) umfasst Instandhaltungszeiten, jedoch ohne Modellierung der Ressourcen und Leistungen.

Gleichwohl zeichnen sich die Ansätze von OSTGATHE (2012) und F. GEIGER (2015) durch eine umfangreiche Modellierung der Ressourcen des Produktionssystems für Leistungen der Produktion aus. HEES (2017) stellt mit der Übertragung auf rekonfigurierbare Produktionssysteme die breite Anwendbarkeit dieser Modellierung dar und entwickelt mit dem Technologieabgleich einen leistungsfähigen Ansatz.

4.2.2 Ansätze zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Im nachfolgenden Abschnitt werden die bedeutendsten Ansätze der modellgestützten Planung im Themenfeld der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung anhand der in Abschnitt 4.1 eingeführten Klassifikation vorgestellt.

4.2.2.1 Beschreibungsmodelle der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Beschreibungsmodell nach KALUZA ET AL. (1994): Ein Beschreibungsmodell zur integrierten Planung und Steuerung der Produktion und Instandhaltung stellen KALUZA ET AL. (1994) im Rahmen eines Ansatzes zur Just-in-time-Instandhaltung vor. Den Ausgangspunkt des Modells stellt die Identifikation der Bedarfe für Instandhaltungsleistungen durch Meisterbereiche oder Anlagenbedienpersonal dar. Anschließend erfolgt durch die Instandhaltung eine Analyse bzgl. der Durchführung von Leistungen während der Nutzungszeiten der Produktion. Innerhalb der Nutzungszeiträume der Produktion durchzuführende Leistungen werden anhand von verbindlichen oder groben Durchführungszeitpunkten klassifiziert. Anschließend erfolgt ein Informationsaustausch der Planungsbereiche und die durchzuführenden Leistungen werden unter Anpassung der jeweiligen Kapazitäten terminiert. Das Ziel ist die Minimierung der direkten Instandhaltungskosten bei möglichst geringen Produktionsausfällen. Die Freigabe der Leistungen erfolgt durch ein gemeinsames Team der Produktions- und Instandhaltungssteuerung.

Das Beschreibungsmodell nach KALUZA ET AL. (1994) berücksichtigt die Phasen des Entscheidungsprozesses sowie beschreibt die Aufgaben der integrierten Planung, insbesondere der Instandhaltungsplanung. Eine Darstellung, *wie* die einzelnen Prozessschritte durchgeführt werden sollen, erfolgt jedoch nicht. Des Weiteren wird die Produktionsplanung lediglich vereinfacht betrachtet.

Beschreibungsmodell nach PAPROCKA (2019): PAPROCKA (2019) stellt ein Beschreibungsmodell zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung vor. Es besteht aus insgesamt vier Phasen. In der ersten Phase erfolgt eine Datenerhebung zu Ausfällen und Fehlern im Betrieb, zu Dauern von Reparaturen sowie zu störungsfreien Betriebszeiten. Im Fokus der Datenerhebung steht die Engpassmaschine des Produktionssystems. Die erfassten Daten werden in einer Failure-Mode-and-Effects-Analysis-Datenbank (FMEA) gespeichert und dienen als Datenbasis bei der Identifikation möglicher Risiken, Fehlerursachen und geeigneter Instandhaltungsmaßnahmen. In der zweiten Phase erfolgt die Ermittlung von statistischen Kennzahlen, z. B. Mean Time Between Failures (MTBF), welche der Vorhersage der Häufigkeit und Dauer von Störungen sowie der störungsfreien Betriebszeiten dienen. In der dritten Phase erfolgt die Ermittlung des integrierten Plans, welche in Anwendung einer in PAPROCKA & SKOŁUD (2017) vorgestellten Heuristik erfolgen kann. In der vierten Phase findet eine Evaluation des ermittelten Plans anhand von Key Performance Indicators (KPIs) statt.

Das Beschreibungsmodell nach PAPROCKA (2019) deckt die Phasen der Datenerhebung, Entwicklung von Handlungsalternativen sowie Bewertung ab. Die Nutzung von statistischen Kennzahlen sowie KPIs zur Bewertung stellen innovative Aspekte des Ansatzes dar. Aufgrund der Vernachlässigung der Identifikation des Handlungsbedarfes, Definition der Aufgabenstellung sowie der Präzisierung der Zielsysteme kann das Modell nicht alle Defizite der prozessualen Komplexität adressieren. Außerdem befähigt der Ansatz nicht zur systematischen Entwicklung eines integrierten Plans.

4.2.2.2 Prognosemodelle der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Prognosemodell nach GHARBI & KENNÉ (2005): Das Prognosemodell nach GHARBI & KENNÉ (2005) ist ein simulationsbasierter Ansatz zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung und -steuerung. Das Produktionssystem besteht aus nicht-identischen Maschinen. Es werden als finanzielle Ziele der Produktionsplanung die Lager- und Strafkosten sowie die Inspektions- und Reparaturkosten der Instandhaltungsplanung im Modell berücksichtigt. Das Ziel ist die Minimierung der Kosten durch die Bestimmung optimaler Produktions- und Instandhaltungsraten. Der Ansatz beinhaltet eine Methode, welche die analytische Ermittlung der optimalen Entscheidungsvariablen, ein Simulationsmodell sowie ein auf statistischer Versuchsplanung basierendes Vorgehen zur Bewertung der Auswirkungen auf die Ziele umfasst.

4 Stand der Erkenntnisse

Der Ansatz nach GHARBI & KENNÉ (2005) bildet die Entscheidungsprozessphasen der Entwicklung von Handlungsalternativen und der Bewertung ab. Mit der Annahme einer über die Zeit konstanten Nachfrage nach Produkten vernachlässigt der Ansatz einen wesentlichen Aspekt der betrieblichen Realität bei der Ermittlung des integrierten Plans. Es werden ausschließlich finanzielle Zielen und keine Ressourcen der Instandhaltung modelliert. Darüber hinaus erfolgt keine Synchronisation des Einsatzes von Ressourcen im Produktionssystem.

Prognosemodell nach KRÖNING (2014): KRÖNING (2014) stellt einen simulationsbasierten Ansatz zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung und -steuerung vor. Als Zielgrößen werden die Produktions- und Instandhaltungskosten modelliert. Der Ansatz umfasst eine Methode, welche die Phasen der Entscheidungsfindung weitestgehend abbildet. Lediglich die Phase der Identifikation des Handlungsbedarfes wird nicht berücksichtigt. Ausgehend von isoliert erstellten Produktions- und Instandhaltungsplänen erfolgt die Ermittlung von gegenseitigen Beeinträchtigungen unter Einsatz eines Simulationsmodells. Zur Koordination von existierenden Beeinträchtigungen stellt KRÖNING (2014) drei Ansätze vor: (1) Variation der Parameter der Produktion, (2) Variation der Parameter der Instandhaltung und (3) Kombination der Parametervariation beider Planungsbereiche. Unter Berücksichtigung der unternehmensspezifischen Freiheitsgrade und Restriktionen werden die definierten Planungsszenarien simuliert und bewertet.

Das Prognosemodell nach KRÖNING (2014) setzt mit der weitgehenden Abbildung der Phasen der Entscheidungsfindung sowie der umfangreichen Abbildung der Freiheitsgrade und Restriktionen von Produktionssystemen neue Maßstäbe. Die Ermittlung des integrierten Plans erfolgt jedoch nicht mittels einer vollständigen Durchsuchung des Lösungsraumes, sondern basiert auf der Anpassung von bereits vorab ermittelten, isoliert geplanten Produktions- bzw. Instandhaltungsplänen. Die Ermittlung eines optimalen Plans kann dadurch nicht garantiert werden. Weiterhin werden ausschließlich finanzielle Größen berücksichtigt.

4.2.2.3 Entscheidungsmodelle der Produktions- und Instandhaltungsplanung

Es wird eine große Anzahl an Entscheidungsmodellen zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung vorgestellt. Gemäß dem Betrachtungsbereich werden nur Ansätze für Produktionssysteme mit mehreren Ressourcen betrachtet. Des Weiteren zeigt

sich, dass in der Fachliteratur eine hohe Anzahl an monokriteriellen Optimierungsmodellen vorgestellt wird. Der Zielsetzung der Arbeit entsprechend werden multikriterielle Optimierungsmodelle fokussiert. Gleichwohl werden ausgewählte, innovative Aspekte beinhaltende, monokriterielle Optimierungsmodelle berücksichtigt. Die Zuordnung der Ansätze zu den Klassen der mono- oder multikriteriellen Optimierungsmodelle erfolgt mittels der Anzahl und Zugehörigkeit der Ziele zu Zielgrößenklassen, welche Ziele derselben Einheit zusammenfassen. Es werden finanzielle Ziele, zeitliche Ziele und qualitative Ziele differenziert. In der vorliegenden Arbeit wird ein Modell als multikriterielles Optimierungsmodell klassifiziert, wenn es mindestens zwei Ziele unterschiedlicher Zielgrößenklassen beinhaltet. Nachfolgend erfolgt zunächst die Darstellung der Klassifikation der Optimierungsmodelle. Anschließend werden ausgewählte Optimierungsmodelle in chronologischer Reihenfolge detailliert vorgestellt.

Klassifikation der Optimierungsmodelle: Die Optimierungsmodelle lassen sich anhand folgender Kriterien (K) klassifizieren:

1. *Planungshorizont:* Es werden Modelle mit einem unendlichen (U) oder endlichen (E) Planungshorizont unterschieden. Modelle mit einem endlichen Planungshorizont unterteilen diesen in Perioden.
2. *Informationsgrad der Modellparameter:* Erfolgt die Modellierung von Parametern mittels Wahrscheinlichkeiten, liegt ein stochastisches Modell (S) vor. In deterministischen Modellen (D) sind die Modellparameter sowie deren Veränderungen im Planungshorizont bekannt.
3. *Betrachtungstiefe:* Es sind die modellierten Ressourcen von Produktionssystemen zu gliedern. Es werden Betriebsmittel (B), Maschinen (M) und Instandhaltungsressourcen (I) unterschieden.
4. *Produktionsschritte:* Die Produktion eines Produktes kann mehrere Produktionsschritte erfordern. Werden im Modell mindestens zwei Produktionsschritte berücksichtigt, ist das Modell mehrstufig (MS). Erfolgt die Modellierung eines Produktionsschrittes, so ist das Modell einstufig (ES).
5. *Typus Zielfunktion/Nebenbedingungen:* Erfolgt die Modellierung aller Zielfunktionen und Nebenbedingungen linear, werden sie der Klasse der linearen Modelle (L) zugeordnet. Bei nicht-linearen Optimierungsmodellen (N) existieren Gleichungen, Ungleichungen oder Funktionen, die einen nicht-linearen Zusammenhang aufweisen.

4 Stand der Erkenntnisse

6. *Zielgrößen der Produktionsplanung*: Als finanzielle Zielgrößen der Produktionsplanung werden die Produktionskosten (PK), Logistikkosten (LK) und Energiekosten (EK) unterschieden. Darüber hinaus werden die Zielgrößen Zeit (PZ), die qualitativen Ziele der Termintreue der Produktionsleistungen (PT) sowie Sonstiges (SO) differenziert.
7. *Zielgrößen der Instandhaltungsplanung*: In der Instandhaltungsplanung werden die finanziellen Zielgrößen der Instandhaltungskosten (IK) und Energiekosten (EK) unterschieden. Ein zeitliches Ziel ist die (Nicht-)Verfügbarkeit (IV) und die qualitativen Ziele sind die Termintreue der Instandhaltungsleistungen (IT) und die Zuverlässigkeit (ZU).
8. *Entscheidungsvariablen der Produktionsplanung*: Als Variablen der Produktionsplanung werden die Bestimmung der Losgröße (LP), der Ressourcenzuordnung (ZP), der Reihenfolge (FP) und der Terminierung (TP) differenziert.
9. *Entscheidungsvariablen der Instandhaltungsplanung*: Es erfolgt eine Unterscheidung der Entscheidungsvariablen der Instandhaltungsplanung von der Art der Instandhaltungsleistung (AI), der Anzahl der Instandhaltungsleistungen (NI), der Ressourcenzuordnung (ZI), der Reihenfolge (FI) sowie Terminierung (TI).
10. *Instandhaltungsstrategien*: Es werden für verschiedene Ressourcen angewendete korrektive (R), zeitbasierte (T) und zustandsorientierte (Z) Instandhaltungsstrategien unterschieden.
11. *Restriktionen*: Ein reales Produktionssystem unterliegt Restriktionen. Es werden die Restriktionen der Kapazität (C) und Befähigungen (B) differenziert.
12. *Lösungsmethode*: Die Lösung von Optimierungsproblemen kann durch eine Vielzahl an teilweise problemspezifisch entwickelten Algorithmen erfolgen. Es werden Standardsolver (S), z. B. CPLEX, und Heuristiken (H) unterschieden. In einigen Veröffentlichungen erfolgt keine Angabe der Lösungsmethode.
13. *Art des Anwendungsbereiches*: Der praktische Anwendungsfall hat sehr hohe Relevanz für die Nutzung eines Optimierungsmodells. Es werden unterschieden: Fließfertigung (FF), Werkstattfertigung (WF) und parallele Maschinen (PM).

Die Tabelle 4.1 zeigt zusammenfassend die klassifizierten Ansätze der Produktions- und Instandhaltungsplanung mittels mathematischer Optimierung.

Tabelle 4.1: Klassifikation der Optimierungsmodelle zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Modelle	Kriterien												
	K.1 Planungshorizont	K.2 Informationsgrad	K.3 Betrachtungstiefe	K.4 Produktionsschritte	K.5 Typus Zielfunktion	K.6 Zielgroßen Produktionsplanung	K.7 Zielgroßen Instandhaltungsplanung	K.8 Entscheidungsvariablen Produktionsplanung	K.9 Entscheidungsvariablen Instandhaltungsplanung	K.10 Instandhaltungsstrategien	K.11 Restriktionen	K.12 Lösungsmethode	K.13 Anwendungsbereich
AZADEH ET AL. (2015)	U	D	M	ES	L	PZ,PT	IV	FP	NI	T	-	H	WF
BEN ALI ET AL. (2011)	U	D	M	ES	L	PZ	IK	ZP	ZI, TI	T, Z	-	H	WF
BERRICHI ET AL. (2009)	U	S	M	ES	N	PZ	IV	ZP	ZI, TI	T	-	H	PM
HNAIEN & YALAOUI (2013)	U	D	M	ES	L	PZ	IT	ZP	ZI, TI	T	-	S, H	FF
JING & TOMOHIRO (2010)	U	S	M	MS	L	PZ, SO	ZU	ZP	-	-	B	H	WF
KASPER (2016)	E	D	M, B	ES	L	PK	IK	LP, FP	TI	Z	C	H	WF
KHATAMI & ZEGORDI (2017)	U	S	M	MS	N	PZ	IV	ZP	NI, TI	T	C	H	FF
LIAO ET AL. (2017)	U	S	M	ES	N	PZ	IK	ZP, FP	NI, TI	Z	-	H	PM
MIRABEDINI & IRANMANESH (2014)	U	S	M	ES	N	PZ, PT, SO	IK	ZP, FP	ZI	Z	-	H	PM
MOKHTARI ET AL. (2012)	U	S	M	ES	N	PZ	IV	ZP, FP	AI, NI, TI	T	-	H	PM
MORADI ET AL. (2011)	U	S	M	MS	N	PZ	IV	ZP, FP	ZI	T	B, C	H	WF
SAFAEI ET AL. (2010)	U	S	M	MS	N	PK, LK	IK	ZP	NI, ZI	Z	B, C	H	WF
SONG ET AL. (2014)	U	S	M	MS	N	EK, PZ	EK	ZP, FP	ZI, TI	T	-	H	WF
WANG & LIU (2015)	U	S	M, B	ES	N	PZ	IV	ZP, FP	ZI	T	B	H	PM
WOLTER (2016)	E	D	M, B	ES	L, N	PK	IK	LP, ZP, FP, TP	AI, NI, TI	Z	B, C	H	PM
YE & MA (2015)	U	S	M	MS	N	PZ	IK	ZP, FP	ZI	R, T	-	H	WF

Monokriterielles Optimierungsmodell nach BERRICHI & YALAOUI (2013b):

Ein monokriterielles Optimierungsmodell zur Zuordnung von Produktionsaufträgen zu Maschinen sowie zur Festlegung von Zeitpunkten von Instandhaltungsleistungen stellen BERRICHI & YALAOUI (2013b) vor. Das nicht-lineare, stochastische Modell wird in BERRICHI ET AL. (2009) zuerst vorgestellt. Als Ziel der Instandhaltung wird die Minimierung der Unverfügbarkeit des Produktionssystems modelliert. Als Ziel der Produktionsplanung wird in BERRICHI & YALAOUI (2013a), BERRICHI ET AL. (2010) sowie BERRICHI ET AL. (2009) die Minimierung der Produktionszeit und in BERRICHI & YALAOUI (2013a) und BERRICHI & YALAOUI (2013b) mit Minimierung der Verspätung der Produktionsaufträge jeweils ein Ziel der Klasse Zeit verfolgt. Das zugrundeliegende Produktionssystem besteht stets aus parallelen, gleichartigen Maschinen. Die Zuverlässigkeit wird über die Ausfallrate der Maschinen modelliert. In den Publikationen werden verschiedene Heuristiken zur Lösung des Optimierungsmodells entwickelt und optimiert.

Das Optimierungsmodell von BERRICHI & YALAOUI (2013b) bietet durch die Modellierung von Lieferterminen von Produktionsaufträgen neue Möglichkeiten für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung. Eine Ableitung der Zielgrößen aus strategischen Unternehmenszielen findet nicht statt. Mit der Vernachlässigung kapazitiver Restriktionen und der Annahme, dass alle Produktionsaufträge auf allen Maschinen dieselbe Produktionszeit erfordern, werden wesentliche Charakteristika der betrieblichen Realität nicht berücksichtigt.

Monokriterielles Optimierungsmodell nach WANG & LIU (2015): Das monokriterielle, nicht-lineare Optimierungsmodell von WANG & LIU (2015) betrachtet ein Produktionssystem mit parallelen Maschinen. Die Entscheidungsdimensionen sind die Zuordnung von Produktionsleistungen zu Maschinen sowie Betriebsmitteln, die Reihenfolge der Produktionsleistungen und die Durchführung von Instandhaltungsleistungen an Maschinen sowie Betriebsmitteln. Die Modellierung von zeitorientierten Instandhaltungsleistungen an Maschinen und Betriebsmitteln basiert auf dem Ansatz von BERRICHI ET AL. (2009). Als Anwendungsbeispiel dient ein Produktionssystem aus dem Automobilsektor mit zehn parallelen Maschinen und Gussformen als Betriebsmittel. Als zeitliche Ziele sind für die Produktionsplanung die Minimierung der Produktionsdauer und für die Instandhaltungsplanung die Minimierung der Unverfügbarkeit der Maschinen sowie die Minimierung der Unverfügbarkeit der Gussformen modelliert. Die Lösung erfolgt mittels einer Metaheuristik.

Das Modell von WANG & LIU (2015) bietet durch die Berücksichtigung von Befähigungen von Maschinen und Betriebsmitteln für Produktionsleistungen sowie der Modellierung von Instandhaltungsleistungen an Maschinen und Betriebsmitteln umfangreiche Möglichkeiten. Es erfolgt jedoch keine Modellierung von reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten und keine Berücksichtigung von Lieferterminen von Produktionsaufträgen. Darüber hinaus werden variable Dauern von verschiedenen Instandhaltungsleistungen sowie die Abbildung der Phasen der Entscheidungsfindung vernachlässigt.

Monokriterielles Optimierungsmodell nach KASPER (2016): Das Proportional Lot-Sizing and Scheduling Problem with Setup Classes and Maintenance (PLSP-SC-M) Modell von KASPER (2016) ist ein monokriterielles, lineares, gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell. Es basiert auf dem Proportional Lot-Sizing and Scheduling Problem (PLSP). Im Modell werden zeitlich flexible, produktreihenfolgeabhängige und periodenübergreifende Rüstvorgänge modelliert. Des Weiteren werden Rüstklassen eingeführt, welche Rüstvorgänge vergleichbarer Dauer zu einer Klasse zusammenfassen. Die Modellierung der Abnutzung ist produktabhängig und erfolgt an den Komponenten der Maschinen. Es werden vollständige Instandhaltungsmaßnahmen abgebildet, welche in maximal zwei aufeinander folgenden Planungsperioden auszuführen sind. Bei der Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen werden sowohl Fälle mit und ohne Rüstverlust betrachtet. Als Zielgrößen werden Lager-, Produktions- und Instandhaltungskosten berücksichtigt. Zur Lösung wird eine Heuristik eingesetzt und als Anwendungsbeispiel dient ein Produktionssystem aus der Automobilindustrie.

Das monokriterielle Optimierungsmodell von KASPER (2016) bietet umfangreiche Möglichkeiten zur Modellierung realer Produktionssysteme. Es werden jedoch keine Betriebsmittel zur Produktion eines Produktes auf einer Maschine sowie keine Ressourcen der Instandhaltung modelliert. Zudem erfolgt keine Synchronisation der Ressourcen, wodurch nicht durchführbare Pläne entstehen können. Es werden ausschließlich finanzielle Größen berücksichtigt. Das im Anwendungsbeispiel präsentierte Vorgehen betrachtet nicht die Phasen der Entscheidungsfindung.

Monokriterielles Optimierungsmodell nach WOLTER (2016): WOLTER (2016) stellt ein monokriterielles, lineares, gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell vor, welches als General Lot-Sizing and Maintenance Scheduling Problem (GLSMSP) eingeführt wird. WOLTER (2016) stellt darüber hinaus drei Erweiterungen des GLSMSP vor. Die umfangreichste Erweiterung stellt das General Lot-Sizing and Maintenance Scheduling Problem with Multiple Resources and Maintenance Teams (GLMSP-MR-

4 Stand der Erkenntnisse

MT) dar. Das Produktionssystem umfasst mehrere parallele Maschinen. Die Maschinen bestehen aus Komponenten, welche im Leistungserstellungsprozess produktabhängig verschleßen. Es wird die zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie modelliert und es werden partielle und vollständige Instandsetzung, serielles und paralleles Rüsten und Instandsetzen mit und ohne Rüsterhalt bei Durchführung der Instandsetzung unterschieden. Als finanzielle Ziele werden in der Zielfunktion Rüst-, Produktions-, Lager- und Instandhaltungskosten modelliert. Das Optimierungsmodell wird mittels einer Heuristik gelöst.

Das Optimierungsmodell von WOLTER (2016) ermöglicht die Abbildung von produktabhängigen Verschleißraten und bietet umfangreiche Möglichkeiten der Modellierung von Rüstvorgängen und Instandsetzung auf Ebene der Maschinen. Mit der Vernachlässigung von reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten und maschinenspezifischer Kapazität sowie dem Verzicht auf die Modellierung von eigenen Ressourcen der Instandhaltung werden jedoch relevante Restriktionen der betrieblichen Realität vernachlässigt. Es werden ausschließlich finanzielle Ziele modelliert und der Entscheidungsprozesses bleibt unberücksichtigt.

Monokriterielles Optimierungsmodell nach KHATAMI & ZEGORDI (2017): Ein monokriterielles Optimierungsmodell stellen KHATAMI & ZEGORDI (2017) vor. Es basiert auf dem Modell von BERRICHI ET AL. (2009) und erweitert dieses um variable Zeitdauern von Instandhaltungsleistungen sowie eine maximale Anzahl von Instandhaltungsleistungen an einer Ressource. Eine andere Erweiterung stellt die Restriktion der Durchführung von maximal einer Instandhaltungsleistung zum selben Zeitpunkt an den Maschinen des Produktionssystems dar. Das Ziel der Produktionsplanung ist die Minimierung der Produktionszeit. Das Ziel der Instandhaltungsplanung ist die Minimierung der Unverfügbarkeit. Zur Lösung des Optimierungsproblems wird eine Heuristik vorgestellt.

Die Berücksichtigung der begrenzten Kapazität der Instandhaltung mittels Begrenzung der Anzahl von Instandhaltungsleistungen stellt einen innovativen Aspekt des Ansatzes von KHATAMI & ZEGORDI (2017) dar. Die Autoren vernachlässigen jedoch reihenfolgeabhängige Rüstzeiten und verzichten auf die Herleitung der Ziele. Des Weiteren ist die Erzeugung multipler Handlungsmöglichkeiten nicht vorgesehen.

Multikriterielles Optimierungsmodell nach YOUSSEF ET AL. (2003): Eines der ältesten multikriteriellen Optimierungsmodelle geht auf YOUSSEF ET AL. (2003) zurück. Das einperiodige, deterministische Modell hat die Ziele der Minimierung der Instandhaltungskosten sowie der Minimierung der Produktionszeit. Es wird ein Produktionssystem aus parallelen Maschinen betrachtet. Das Modell dient zur Erstellung eines Instandhaltungsplans unter Berücksichtigung von vorab festgelegten Produktionsaufträgen. Die optimalen Zeitpunkte für zustandsorientierte Instandhaltungsleistungen werden unter Berücksichtigung der Abnutzung der Maschinen durch die Produktionsaufträge ermittelt. Die Lösung erfolgt durch eine Metaheuristik.

Das Optimierungsmodell von YOUSSEF ET AL. (2003) beinhaltet die Festlegung des Ablaufes von Produktions- und Instandhaltungsleistungen unter der Berücksichtigung, dass Produktions- und Instandhaltungsleistungen i. d. R. nicht gleichzeitig an einer Anlage durchgeführt werden können. Die Produktionsplanung ist jedoch durch die vorab erfolgte Auswahl der Produktionsaufträge stark vereinfacht modelliert. Darüber hinaus erfolgt keine Modellierung von Betriebsmitteln an Maschinen sowie bleiben Restriktionen von Produktionssystemen unberücksichtigt.

Multikriterielles Optimierungsmodell nach JING & TOMOHIRO (2010): JING & TOMOHIRO (2010) stellen ein multikriterielles Optimierungsmodell für parallele Maschinen in einer Werkstattfertigung vor. Das Modell ermöglicht die Zuordnung von Produktionsaufträgen und die Festlegung der Reihenfolge. Die Zuordnung erfolgt unter Berücksichtigung der Befähigungen von Maschinen sowie der Arbeitsvorgänge der Produktionsaufträge. Der Planungshorizont ist unendlich und der Bedarfszeitpunkt der Produktionsaufträge deterministisch modelliert. Der Zeitraum der Instandhaltungsleistungen an einer Maschine ist vorgegeben. Die Zielgrößen sind Produktionszeit, Kundenzufriedenheit und Maschinenzuverlässigkeit. Zur Lösung des Optimierungsproblems kommt ein kombinierter Ansatz von Heuristiken zum Einsatz.

Das Modell von JING & TOMOHIRO (2010) ermöglicht die Abbildung von Arbeitsvorgängen in Produktionsaufträgen. Des Weiteren werden verfrühte oder verspätete Aufträge sowie die Restriktion, dass während einer Instandhaltungsleistung an einer Maschine kein neuer Produktionsauftrag gestartet werden kann, modelliert. Eine Berücksichtigung des Entscheidungsfindungsprozesses findet nicht statt. Darüber hinaus werden eine über den Planungshorizont schwankende Nachfrage sowie Rüstvorgänge vernachlässigt. Die Ziele werden nicht aus den Unternehmenszielen abgeleitet und auf eine Modellierung von Kosten wird verzichtet.

Multikriterielles Optimierungsmodell nach BEN ALI ET AL. (2011): BEN ALI ET AL. (2011) stellen ein deterministisches, multikriterielles Optimierungsmodell für ein Produktionssystem aus parallelen Maschinen vor. Der Ansatz beinhaltet zeit- und zustandsorientierte Instandhaltungsleistungen für Maschinen, welche zu früh, rechtzeitig oder zu spät eingeplant werden können. Die Abweichung vom Bedarfszeitpunkt wird mit Strafkosten abgebildet. Das Modell beinhaltet eine Anpassung der vorab definierten Instandhaltungsintervalle für zeitorientierte Instandhaltungsleistungen. Die Minimierung der Produktionszeit wird als Ziel der Produktionsplanung modelliert. Als Ziel der Instandhaltung ist die Minimierung der Gesamtinstandhaltungskosten integriert. Das Optimierungsproblem wird mittels einer Heuristik gelöst.

Das Optimierungsmodell von BEN ALI ET AL. (2011) deckt durch die Modellierung von verfrühten und verspäteten Instandhaltungsleistungen sowie die Anpassung der Zeiten für zeitorientierte Instandhaltungsleistungen wichtige Funktionen der Instandhaltungsplanung ab. Mit der Vernachlässigung der Restriktionen eines Produktionssystems wird jedoch ein relevanter Faktor der betrieblichen Realität übergangen. Eine Ableitung der Zielgrößen sowie eine Berücksichtigung des Entscheidungsprozesses erfolgen nicht.

Fazit zu den Ansätzen zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung: Die Beschreibungsmodelle nach KALUZA ET AL. (1994) und PAPROCKA (2019) berücksichtigen umfangreiche Aspekte des Ablaufes von Entscheidungsprozessen und beschreiben die Aufgaben der integrierten Planung. Die Vernachlässigung einzelner Prozessschritte sowie der Verzicht auf die detaillierte Darstellung, *wie* einzelne Prozesse durchgeführt werden sollen, führt dazu, dass diese Ansätze nicht zur Ermittlung von integrierten Produktions- und Instandhaltungsplänen befähigen.

Die vorgestellten Prognosemodelle eignen sich für die Simulation zur Analyse und Bewertung von expliziten Handlungsalternativen. Des Weiteren können die Ansätze im Rahmen einer Produktions- und Instandhaltungssteuerung zur Anwendung kommen. Der Ansatz von KRÖNING (2014) zeichnet sich durch eine hohe Detailtiefe der Produktionssystemmodellierung sowie eine weitgehende Abbildung der Phasen der Entscheidungsfindung aus. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Ansätze weniger zur Ermittlung von Handlungsalternativen in dem sehr großen Lösungsraum der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung geeignet sind.

Es wird eine große Anzahl an Entscheidungsmodellen für eine integrierte Planung vorgestellt. Daraus lässt sich die Eignung dieses Verfahrens für eine integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung ableiten. Die mono- und multikriteriellen Optimierungs-

modelle ermöglichen durch die implizite Formulierung der Handlungsalternativen die vollständige Durchsuchung des Lösungsraumes. Die Berücksichtigung von Restriktionen in den multikriteriellen Ansätzen von JING & TOMOHIRO (2010) und KHATAMI & ZEGORDI (2017) ermöglicht die Abbildung realer Abläufe in Produktionssystemen. Es zeigt sich jedoch, dass keines der vorgestellten Optimierungsmodelle alle Entscheidungsdimensionen abdeckt und die Ziele der Produktions- und Instandhaltungsplanung integriert berücksichtigt. Des Weiteren zeigen sich Defizite in der Detailtiefe der Produktionssystemmodellierung sowie bei der Abbildung des Entscheidungsprozesses einer integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die multikriterielle Optimierung einen vielversprechenden Ansatz für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung darstellt.

4.3 Forschungsdefizit und Handlungsbedarf

Aus einer übergeordneten Betrachtung der Ansätze des Standes der Erkenntnisse zeigt sich, dass neben den in Abschnitt 4.2 dargestellten individuellen Defiziten in der Literatur bisher kein Ansatz existiert, welcher der Komplexität des Entscheidungsproblems der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung vollständig gerecht wird. Die Defizite der prozessualen und analytischen Komplexität können nicht vollumfänglich adressiert werden. Folglich besteht ein Forschungsdefizit.

Die Mehrheit der existierenden Ansätze zur Modellierung von Produktionssystemen und planungsrelevanten Informationen in Systemen der Produktions- und Instandhaltungsplanung bilden Produktionssysteme in nur unzureichender Detailtiefe ab. Lediglich die Modellierungsansätze von OSTGATHE (2012) und F. GEIGER (2015) sowie von HEES (2017) zeichnen sich durch eine umfangreiche Modellierung der Ressourcen des Produktionssystems aus. Sie ermöglichen für Produktionsleistungen eine Gegenüberstellung von technischen Fähigkeitsanforderungen der Leistungen und dem technischen Fähigkeitsangebot der Ressourcen. Es zeigt sich jedoch, dass kein Ansatz existiert, welcher sowohl für die Produktions- als auch die Instandhaltungsplanung eine übergeordnete gemeinsame Struktur für die Charakteristika und Fähigkeiten von Ressourcen und Eigenschaften sowie für die Anforderungen der Leistungsprozesse bereitstellt. Jedoch können die vorgestellten Ansätze als Ausgangspunkt für die Entwicklung einer integrierten Modellierung dienen.

4 Stand der Erkenntnisse

Das Prognosemodell von KRÖNING (2014) zeichnet sich durch eine hohe Detailtiefe der Produktionssystemmodellierung sowie eine umfangreiche Berücksichtigung von Restriktionen aus. Der Ansatz basiert jedoch auf der Anpassung von bereits vorab ermittelten, isoliert geplanten Produktions- und Instandhaltungsplänen. Folglich ist der Ansatz von KRÖNING (2014) eher zur Bewertung von Plänen sowie zur Steuerung von Produktions- und Instandhaltungsleistungen als zur Ermittlung von Handlungsalternativen geeignet. Die Entscheidungsmodelle in Form der Optimierungsmodelle weisen analytische Stärken auf. Insbesondere ermöglichen sie die vollständige Durchsuchung des Lösungsraumes zur Ermittlung der Handlungsalternativen. Dies adressiert die analytische Komplexität der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung. Es zeigt sich jedoch, dass die Modellierung der Produktionssysteme in den Optimierungsmodellen oftmals vereinfacht erfolgt sowie Restriktionen des Produktionsbetriebs nicht berücksichtigt werden. Des Weiteren ist festzustellen, dass die Entscheidungsdimensionen der Planungsbereiche i. d. R. nur unvollständig berücksichtigt werden. Die monokriteriellen Ansätze von WOLTER (2016), KASPER (2016) sowie der multikriterielle Ansatz von BEN ALI ET AL. (2011) bilden am umfangreichsten die Entscheidungsdimensionen von Produktions- und Instandhaltungsplanung ab. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Synchronisation des Einsatzes der Ressourcen im Produktionssystem vernachlässigt wird. Dadurch kann es in der betrieblichen Realität zu nicht durchführbaren integrierten Produktions- und Instandhaltungsplänen kommen. Diese Defizite wirken sich zusammenfassend negativ auf die Planungsqualität aus.

Der Entscheidungsprozess wird nur in wenigen Ansätzen zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung berücksichtigt. Die Ansätze von KRÖNING (2014) und PAPROCKA (2019) bilden ihn am umfangreichsten ab. Die Vernachlässigung des Entscheidungsprozesses beeinflusst den Planungsprozess negativ. In der Planung der Produktions- und Instandhaltungsleistungen kann es zu Konfliktsituationen sowie zu nicht auf Basis von rationalen Kriterien getroffenen Entscheidungen kommen.

Die zusammenfassende Bewertung der vorgestellten Ansätze in Bezug auf die in Abschnitt 3.2 abgeleiteten Anforderungen zeigt die Tabelle 4.2.

4.3 Forschungsdefizit und Handlungsbedarf

Tabelle 4.2: Anforderungsabgleich von bestehenden Ansätzen zur Modellierung von Produktionssystemen und planungsrelevanten Informationen sowie Ansätzen zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Modelle	Anforderungen									
	A.1 Detaillierte Modellierung	A.2 Berücksichtigung Restriktionen	A.3 Entscheidungsdimensionen PP	A.4 Entscheidungsdimensionen IP	A.5 Instandhaltungsstrategien	A.6 Interdependenzen Planungsbereiche	A.7 Durchsuchung Lösungsraum	A.8 Mehrere Zielgrößen	A.9 Mehrere Handlungsalternativen	A.10 Phasen der Entscheidungsfindung
<i>Modelle von Produktionssystemen und Informationen</i>										
NAGARUR ET AL. (1999)	●	●	■	■	■	■	■	■	■	■
MORYSON (2004)	●	●	■	■	■	■	■	■	■	■
DUARTE ET AL. (2013)	●	●	■	■	■	■	■	■	■	■
OSTGATHE (2012)	●	●	■	■	■	■	■	■	■	■
F. GEIGER (2015)	●	●	■	■	■	■	■	■	■	■
HEES (2017)	●	●	■	■	■	■	■	■	■	■
<i>Beschreibungsmodelle</i>										
KALUZA ET AL. (1994)		●	●	●		●		●		●
PAPROCKA (2019)		●	●	●		●		●		●
<i>Prognosemodelle</i>										
GHARBI & KENNÉ (2005)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
KRÖNING (2014)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
<i>Monokriterielle Optimierungsmodelle</i>										
BERRICHI & YALAOUI (2013b)	●		●	●	●	●	●	●	●	●
KASPER (2016)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
KHATAMI & ZEGORDI (2017)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
WANG & LIU (2015)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
WOLTER (2016)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
<i>Multikriterielle Optimierungsmodelle</i>										
YOUSSEF ET AL. (2003)	●		●	●	●	●	●	●	●	●
JING & TOMOHIRO (2010)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
BEN ALI ET AL. (2011)	●		●	●	●	●	●	●	●	●

Die Anforderung an einen Ansatz zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung wird ...

nicht erfüllt. ● ansatzweise erfüllt. ● teilweise erfüllt. ● annähernd erfüllt. ● vollständig erfüllt.

■ Anforderung ist für den Ansatz nicht relevant. PP: Produktionsplanung IP: Instandhaltungsplanung

4 Stand der Erkenntnisse

Auf Basis des bestehenden Forschungsdefizits lässt sich der Handlungsbedarf in den nachfolgend aufgeführten Punkten zusammenfassen.

1. *Modellierung des Produktionssystems*: Zur Ermittlung eines in der betrieblichen Realität durchführbaren integrierten Plans ist eine Modellierung der Leistungen und der Ressourcen eines Produktionssystems in ausreichender Detailtiefe zu entwickeln. Es sind die Ressourcen des Produktionssystems mit ihren Eigenschaften und Fähigkeiten sowie ihre Restriktionen abzubilden. Des Weiteren sind die Produktions- und Instandhaltungsleistungen mit ihren Fähigkeitsanforderungen zu modellieren sowie ein Abgleich von Anforderungen und Fähigkeiten zu ermöglichen.
2. *Entscheidungsdimensionen*: Die Entscheidungsdimensionen von Produktions- und Instandhaltungsplanung stellen die zu treffenden Entscheidungen im Planungsprozess dar. Zur Verbesserung der Planungsqualität ist es erforderlich, ein Modell zu entwickeln, welches die wesentlichen Entscheidungsdimensionen beider Planungsbereiche berücksichtigt sowie den Einsatz der Ressourcen synchronisiert. Dies ermöglicht die Abstimmung der Leistungsreihenfolgen und des Ressourceneinsatzes unter Berücksichtigung der Interdependenzen von Produktion und Instandhaltung.
3. *Ziele*: In der Planung sind sowohl die Zielgrößen der Produktions- als auch der Instandhaltungsplanung zu berücksichtigen (KRÖNING 2014, S. 18). Des Weiteren sind die strategischen Erfolgsfaktoren eines produzierenden Unternehmens in den Zielbildungsprozess einzubeziehen (ALCALDE RASCH 2000, S. 40). Folglich ist ein Ansatz zu entwickeln, der die Abbildung von mehreren Zielen ermöglicht und diese für eine integrierte Berücksichtigung in der Planung zusammenführt.
4. *Entscheidungsprozess der Produktions- und Instandhaltungsplanung*: Die Aufgabe der Produktions- und Instandhaltungsplanung ist als Gesamtplanungsproblem zusammenzufassen. Eine gemeinsame Entscheidungsgrundlage führt zu einem Überwinden des Bereichsdenkens und ermöglicht ein ganzheitliches Optimum der Abläufe im Produktionssystem (HENKE ET AL. 2019, S. 32). Folglich ist eine methodische Unterstützung des Entscheidungsprozesses der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung zu entwickeln.

5 System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Das nachfolgende Kapitel stellt das System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung vor. Es basiert auf dem in SCHREIBER ET AL. (2018) vorgestellten Ansatz. Im Abschnitt 5.1 erfolgt die Darstellung des Lösungsansatzes, welcher der Adressierung der analytischen und prozessualen Komplexität der integrierten Planung und der Erfüllung der abgeleiteten Anforderungen (vgl. Kapitel 3) dient. Aufbauend auf dem Lösungsansatz werden im Abschnitt 5.2 die Systemelemente konzeptioniert. Dazu werden die einzelnen Elemente des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung spezifiziert und klassifiziert. Im Abschnitt 5.3 erfolgt die Zusammenführung der Systemelemente im System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung. Abschließend wird die Adressierung des Handlungsbedarfes durch das System dargestellt (Abschnitt 5.4).

5.1 Lösungsansatz

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung zur Ermittlung von effizienten Leistungsreihenfolgen bei gleichzeitiger Verbesserung der Entscheidungsfindung (vgl. Abschnitt 1.3). Als Ausgangspunkt des Lösungsansatzes dient die Betrachtung eines produzierenden Unternehmens mit einem Produktionssystem als soziotechnisches System. Ein soziotechnisches System ist ein offenes, dynamisches System und setzt sich aus einem technischen und einem sozialen Teilsystem zusammen (ULICH 2013, S. 4; TRIST & BAMFORTH 1951). Das technische Teilsystem umfasst die Betriebsmittel des Unternehmens sowie die technischen und räumlichen Arbeitsbedingungen (ULICH 2013, S. 4). Das soziale Teilsystem beinhaltet die „Menschen mit ihren Qualifikationen und Bedürfnissen“ (ULICH 1993, S. 32). Die Gestaltung soziotechnischer Systeme erfordert die integrierte Optimierung des technischen und sozialen Teilsystems (ULICH 2013, S. 5). Nach ULICH (1993, S. 37) führt „[...] nur eine gemeinsame und gleichzeitige

5 System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Optimierung des technischen und sozialen Teilsystems zum gewünschten wirtschaftlichen Erfolg“ (ULICH 1993, S. 37) eines produzierenden Unternehmens. Folglich sind die drei Dimensionen Technologie, Organisation und Humanressourcen gleichzeitig in der Optimierungsaufgabe zu berücksichtigen (ULICH 2005, S. 196).

Aus der Betrachtung produzierender Unternehmen mit Produktionssystemen als sozio-technische Systeme lässt sich unmittelbar ableiten, dass das System die Defizite der analytischen Komplexität mittels eines technischen Teilsystems sowie die Defizite der prozessualen Komplexität mit einem sozialen Teilsystem adressieren muss. Folglich stellen das technische und das soziale Teilsystem die Basis des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung dar. Die vorgenannten Teilsysteme setzen sich jeweils aus Systemelementen zusammen, welche nachfolgend dargestellt werden.

Die Ermittlung von effizienten Leistungsreihenfolgen setzt voraus, dass die Modellierung der Produktions- und Instandhaltungsleistungen derart erfolgt, dass sie simultan und gleichwertig berücksichtigt werden können. Dazu sind die Anforderungen der Leistungen sowie die Fähigkeiten der Ressourcen zu strukturieren und zu modellieren. Des Weiteren werden im Planungsprozess eine Vielzahl an Informationen aus den Planungsbereichen benötigt. Zur Absicherung der Konsistenz der Informationen sowie zur Ermöglichung einer Wiederverwendung sind sie formal zu beschreiben. Diese Funktionen übernehmen die *Informationsmodelle für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung*, welche das erste Systemelement darstellen.

Die im Produktionssystem zur Verfügung stehenden Ressourcen sollen zielgerichtet eingeplant werden, um effiziente und effektive Leistungsprozesse zu ermöglichen. Die Ziele der Planungsbereiche sind mittels eines integrierten Zielsystems zusammenzuführen. Darüber hinaus ist es erforderlich, die Restriktionen des Produktionssystems im Planungsprozess zu berücksichtigen sowie die Entscheidungsdimensionen der Planungsbereiche abzubilden (vgl. Abschnitt 3.2). Zur Ermittlung anhand von Zielen optimaler Leistungsreihenfolgen unter Berücksichtigung von Restriktionen sind insbesondere mathematische, multikriterielle Optimierungsmodelle geeignet (SUHL & MELLOULI 2013, S. 18). Nach KALLRATH (2013, S. 35–36) ist die Optimierung ein Werkzeug, welches komplexe Entscheidungsprozesse quantitativ unterstützen kann. Die Fähigkeit optimale Lösungen zu berechnen, bietet das Potenzial, „[...] erhebliche Kosten zu sparen, die Effizienz zu erhöhen und sorgfältig mit limitierten Ressourcen umzugehen“ (KALLRATH 2013, S. 35). Darüber hinaus zeigt sich in der betrieblichen Praxis, dass sich separate und mit eigenen Zielen agierende Abteilungen durch den Einsatz

von abteilungsübergreifenden Modellen konstruktiv auf das Gesamtwohl eines Unternehmens fokussieren und ein verbessertes Verständnis für das Entscheidungsproblem entwickeln (KALLRATH 2013, S. 35; SUHL & MELLOULI 2013, S. 19). Folglich ist das zweite Systemelement des Systems ein *multikriterielles Optimierungsmodell zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung*. Der Einsatz eines multikriteriellen Optimierungsmodells stellt eine hohe Lösungsqualität der ermittelten Leistungsreihenfolgen sicher und adressiert die analytische Komplexität des Planungsproblems.

Als Betrachtungsgegenstand des sozialen Teilsystems sollen die Entscheidungsträger der Produktions- und Instandhaltungsplanung im Entscheidungsprozess methodisch unterstützt werden. Der Entscheidungsprozess der integrierten Planung ist unter Anwendung eines methodischen Vorgehens anhand rationaler Kriterien auszuführen. Folglich bildet die präskriptive Entscheidungstheorie die wissenschaftliche Basis der *Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung*, welches das dritte Systemelement darstellt. Die Methode adressiert die prozessuale Komplexität, ermöglicht die Konsensfindung und trägt folglich zur Auflösung der Konfliktsituation der Entscheidungsträger in der Produktions- und Instandhaltungsplanung bei.

5.2 Konzeptionierung der Systemelemente

5.2.1 Informationsmodelle für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung

Die Informationsmodelle haben als Systemelement des technischen Teilsystems die Funktion, die Vielzahl der im Planungsprozess erforderlichen Informationen bzgl. der Ressourcen des Produktionssystems sowie der Leistungen der Planungsbereiche zu strukturieren. Des Weiteren sichert die formale Beschreibung die Konsistenz sowie die Wiederverwendbarkeit der Informationen ab. Zur Erfüllung der Anforderung der Allgemeingültigkeit ist es erforderlich, dass die Informationsmodelle auf anerkannten Normen und Richtlinien basieren.

Die Nachfrage nach Produkten des produzierenden Unternehmens geht von Kunden und/oder Absatzmärkten aus und stellt einen externen Einfluss dar. Sie führt zu internen Bedarfen an Produktions- und Instandhaltungsleistungen im Produktionssystem. Die Leistungen werden unter Einsatz von Ressourcen des Produktionssystems erbracht. Es gilt in der Planung sicherzustellen, dass Leistungen nur Ressourcen zugeordnet werden,

welche über die notwendigen technischen Fähigkeiten verfügen. Folglich sind ein *Informationsmodell der Ressourcen des Produktionssystems* und ein *Informationsmodell der Leistungen* zu erarbeiten. Die Funktion des Informationsmodells der Ressourcen des Produktionssystems ist die eindeutige Klassifikation und Beschreibung der Eigenschaften sowie der Fähigkeiten. Das Informationsmodell der Leistungen strukturiert und modelliert die Charakteristika und Anforderungen der Leistungen. Darüber hinaus ist es erforderlich, eine *Verbindung der Informationsmodelle* vorzunehmen, sodass die Informationen als informationstechnische Grundlage für das System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung genutzt werden können.

5.2.2 Multikriterielles Optimierungsmodell zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

5.2.2.1 Spezifikation des Optimierungsmodells

Das multikriterielle Optimierungsmodell ermöglicht auf Basis der in den Informationsmodellen zur Verfügung gestellten Planungsinformationen die Ermittlung von effizienten Reihenfolgen von Produktions- und Instandhaltungsleistungen. Im Planungsprozess sind sowohl die Zielgrößen der Produktions- als auch der Instandhaltungsplanung zu berücksichtigen (KRÖNING 2014, S. 18). Darüber hinaus gilt es die strategischen Erfolgsfaktoren produzierender Unternehmen zu integrieren. In Verbindung mit der Anforderung, mehrere Zielgrößen in der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 3.2), gilt es ein multikriterielles Optimierungsmodell zu erarbeiten.

In heutigen Produktionssystemen wird bereits eine Vielzahl an Daten erfasst und gespeichert, welche zur Identifikation und Parametrisierung von Zustandsgrößen von Ressourcen genutzt werden können. Einige Zustandsgrößen weisen nicht-lineare Verläufe auf. Die exakte Parametrisierung eines nicht-linearen Verlaufes erfordert i. d. R. die Verfügbarkeit einer geeigneten Messmethode, die unmittelbare Erfassung von Zustandsänderungen sowie eine umfangreiche Datenanalyse durch Experten unter Einsatz statistischer Verfahren und Algorithmen des Maschinellen Lernens (BLÜMEL 2011, S. 10–11). Dies führt zu hohen Kosten sowie hohem Zeitaufwand. Darüber hinaus existieren Ressourcen, bei denen die Erfassung der Zustandsparameter nur indirekt möglich ist oder sich aufgrund hoher Investitionskosten betriebswirtschaftlich nicht lohnt. Daraus folgt, dass die Planungsabteilungen in der betrieblichen Realität oftmals nicht

über die notwendige Datengrundlage zur exakten Parametrisierung von nicht-linearen Zusammenhängen verfügen (HENKE ET AL. 2019, S. 17). Daneben führt eine nicht-lineare Modellierung in Optimierungsmodellen zu langen Rechendauern (ALMEDER ET AL. 2015, S. 729). In der Fachliteratur wird eine Vielzahl an Lösungsalgorithmen vorgeschlagen, diese sind jedoch problemspezifisch und können die stets effiziente Lösungsermittlung nicht garantieren (SUHL & MELLOULI 2013, S. 13, S. 96). Zur Adressierung der Anforderung der Anwendbarkeit im Problemkontext kommt folglich eine lineare Modellierung zur Anwendung.

Der Definitionsbereich der Entscheidungsvariablen ist entsprechend den Entscheidungsdimensionen der Produktions- und Instandhaltungsplanung (vgl. Abschnitte 1.4.2.3 und 1.4.3.3) festzulegen. Das Planungsproblem beinhaltet Entscheidungen, deren Gegenstand nicht kontinuierliche Mengen sind. Daraus folgt die Forderung, ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell zu entwickeln. Des Weiteren existieren zeitabhängige Entscheidungen, weshalb eine dynamische Modellierung zu wählen ist.

Im Rahmen der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung existieren Parameter, die mit Wahrscheinlichkeiten verbunden sind. Analog zur nicht-linearen Modellierung bestehen in der betrieblichen Realität jedoch Einschränkungen bezüglich der verfügbaren Datengrundlage. Zusätzlich ist eine stochastische Modellierung für die Entscheidungsträger durch die zugrundeliegende Darstellung von Unsicherheiten bzgl. der Transparenz sowie des Analyse- und Interpretationsaufwandes der Optimierungsergebnisse nachteilig. Den Anforderungen der Anwendbarkeit im Problemkontext sowie der Wirtschaftlichkeit der Anwendung folgend (vgl. Abschnitt 3.1) wird das Modell deterministisch modelliert. Die Auswirkungen einer deterministischen Modellierung im Vergleich zu einer stochastischen Modellierung sind aufgrund des kurzen, operativen Planungshorizontes der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung als gering einzuschätzen.

Die Abbildung 5.1 zeigt zusammenfassend die Spezifikation des Optimierungsmodells des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung anhand des in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Klassifikationsschemas.

5 System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Anzahl der Zielgrößen	monokriteriell	multikriteriell	
Typ Zielfunktionen und Nebenbedingungen	linear		nicht-linear
Art der Entscheidungsvariablen	kontinuierlich	ganzzahlig	gemischt-ganzzahlig
	statisch		dynamisch
Informationsgrad	deterministisch		stochastisch

Legende:

Klasse
 Arten von Klassen
 Spezifikation des Optimierungsmodells

Abbildung 5.1: Spezifikation des Optimierungsmodells der vorliegenden Arbeit

5.2.2.2 Auswahl des Lösungsverfahrens

Die Ziele der Produktions- und Instandhaltungsplanung sind zueinander und innerhalb der Planungsbereiche nicht vollständig komplementär oder indifferent. Folglich ist zur Ermittlung der Handlungsalternativen die Angabe der Artenpräferenz erforderlich und ein Lösungsverfahren entsprechend der in Abschnitt 2.2.2 vorgestellten Klassifikation nach Zeitpunkt der Angabe der Artenpräferenz nach H.-J. ZIMMERMANN & GUTSCHE (1991, S. 30) und HWANG & MASUD (1979, S. 8) für das multikriterielle Optimierungsmodell auszuwählen.

Die Entscheidungen in der Produktions- und Instandhaltungsplanung werden durch die verantwortlichen Entscheidungsträger der beiden Planungsbereiche getroffen. Folglich nehmen sie am Planungsprozess teil, wodurch Verfahren der Klasse *keine Informationsartikulation* ausgeschlossen werden. Die Abstimmung und Koordination erfolgt i. d. R. in Abstimmungstreffen, in denen lediglich ein kurzer Zeitraum zur Verfügung steht. Die Verfahren der Klasse *progressive Information* werden folglich als nicht geeignet angesehen. Entsprechend der Synthese zum Ablauf von Entscheidungsprozessen nach SAGER (2019, S. 16–18) erfolgt die Präzisierung des Zielsystems vor Anwendung des Lösungsverfahrens zur Entwicklung von Handlungsalternativen. Daraus lässt sich ableiten, dass das Lösungsverfahren für das System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung als *a priori Information* zu gestalten ist.

Gemäß der Anforderung mehrere Zielgrößen, aus den Planungsbereichen zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 3.2), sind die Ziele der Produktions- und Instandhaltungsplanung in einem *Zielsystem* zusammenzuführen und ein Ausgleich zwischen den Zielen zu

ermöglichen. Folglich ist die Anwendung eines Lösungsverfahrens für multikriterielle Optimierungsmodelle notwendig (vgl. Abschnitt 2.2.2). Die lexikographische Methode erfordert die Angabe der Ziele in einer eindeutigen Rangfolge nach ihrer Wichtigkeit, wodurch sie für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung auszuschließen ist. Die Weighted-sum-Methode sowie die Goal-Programming-Methode ermöglichen die gleichwertige Berücksichtigung der Ziele. Die Goal-Programming-Methode bietet durch die Angabe von Zielwerten sowie von Gewichtungsfaktoren für die Abweichungen eine größere Flexibilität für die Gestaltung des Zielsystems. Folglich wird die Goal-Programming-Methode als Lösungsverfahren angewendet.

5.2.3 Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Mit den Informationsmodellen und dem multikriteriellen Optimierungsmodell stehen die Systemelemente des technischen Teilsystems zur Verfügung. Die Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung hat die Funktion, die Entscheidungsträger durch die einzelnen Phasen der integrierten Planung zu führen, den Entscheidungsfindungsprozess zu unterstützen und die prozessuale Komplexität zu adressieren. Die Synthese des Ablaufes von Entscheidungsprozessen der präskriptiven Entscheidungstheorie (vgl. Abschnitt 2.1.2) stellt zur Erfüllung der Anforderungen Abbildung der Phasen der Entscheidungsfindung sowie Erzeugung multipler Handlungsalternativen (vgl. Abschnitt 3.2) die wissenschaftliche Basis für die Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung dar.

Das Vorliegen von Zuständen im Produktionssystem, welche Vorgaben nicht erfüllen oder seitens der Entscheidungsträger der Produktions- und Instandhaltungsplanung als unzureichend bzw. verbesserungsfähig empfunden werden, führt zur Notwendigkeit einer Neuplanung bzw. Anpassung eines bestehenden Plans. Dies repräsentiert den Ausgangspunkt bzw. den Anlass der Planung. Folglich ist die *Identifikation des Handlungsbedarfes* die erste Phase der Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung. Anschließend erfolgt die *Definition der Aufgabenstellung*. In dieser zweiten Phase der Methode gilt es das zu betrachtende Produktionssystem festzulegen, die Leistungsportfolios der Produktion und der Instandhaltung auszuwählen und die Entscheidungsdimensionen zu spezifizieren. Darüber hinaus erfolgt die Definition des Planungshorizontes und der Planungsperioden sowie die Ermittlung der Restriktionen der Planung. In der dritten Phase *Präzisierung der Zielsysteme* sind die

5 System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Zielsysteme der integrierten Planung zu entwickeln. Dies erfolgt unter Anpassung der Gewichtungsfaktoren der Zielgrößen. In der vierten Phase *Datenerhebung* werden die erforderlichen Planungsinformationen erhoben und aktualisiert. Es sind die Daten zu den Leistungen sowie den Ressourcen des Produktionssystems zu erheben und in die Struktur der Informationsmodelle zu überführen. In der fünften Phase erfolgt unter Einsatz des multikriteriellen Optimierungsmodells sowie der entwickelten Zielsysteme die *Entwicklung der Handlungsalternativen*. Jedes Zielsystem führt dabei zu einem integrierten Produktions- und Instandhaltungsplan. Die ermittelten integrierten Pläne stellen die Handlungsalternativen der Entscheidungsträger dar. Die Handlungsalternativen werden in der sechsten Phase *Bewertung* analysiert und im Hinblick auf die erreichbaren Ausprägungen der Leistungsattribute gegenübergestellt. In der siebten Phase *Auswahl* erfolgt die Selektion einer Handlungsalternative durch die Entscheidungsträger. Die Phase der Realisierung der präskriptiven Entscheidungsfindung, welche die operative Ausführung des integrierten Produktions- und Instandhaltungsplans beinhaltet, ist entsprechend dem spezifizierten Betrachtungsbereich (vgl. Abschnitt 1.4) nicht mehr Bestandteil der Planung und wird folglich in der Methode nicht berücksichtigt. Die Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

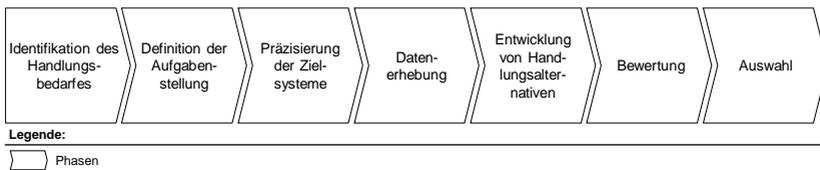


Abbildung 5.2: Prozessphasen der Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Des Weiteren sind hauptverantwortliche Entscheidungsträger je Planungsbereich zu benennen. Die Entscheidungsträger repräsentieren die Systemanwender und begleiten den Planungsprozess von der Identifikation des Handlungsbedarfes bis zur Auswahl eines integrierten Plans. Sie verantworten die Planungsergebnisse sowie die Entscheidungen gegenüber dem Management.

5.3 Systemüberblick

Auf Basis des in Abschnitt 5.1 vorgestellten Lösungsansatzes und gemäß den in Abschnitt 5.2 konzeptionierten Systemelementen setzt sich das System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung aus dem technischen Teilsystem mit den Elementen *Informationsmodelle* und *multikriterielles Optimierungsmodell* sowie dem sozialen Teilsystem mit dem Element *Methode* zusammen. Das System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung ist in Abbildung 5.3 abgebildet. Die Systemelemente werden in den jeweiligen Kapiteln detailliert beschrieben.

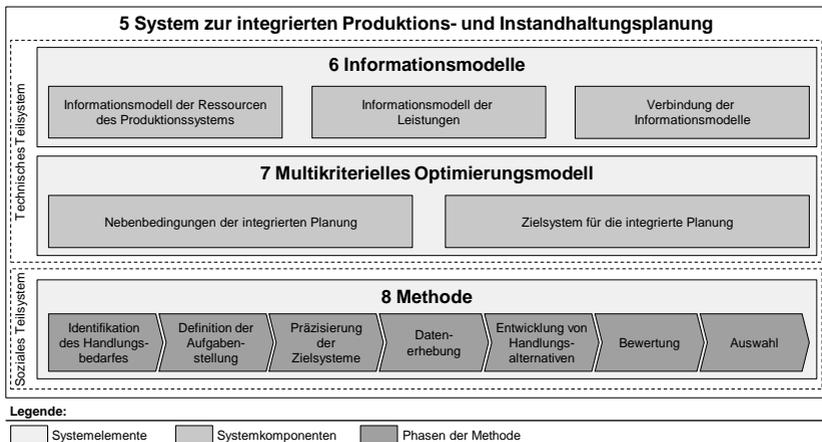


Abbildung 5.3: System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

5.4 Fazit

Das System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung wurde auf Basis der abgeleiteten Anforderungen entwickelt. Die konzeptionierten Systemelemente stellen die Grundlage zur Erfüllung des Zieles der Ermittlung von effizienten Leistungsreihenfolgen bei gleichzeitiger Verbesserung der Entscheidungsfindung in der Produktions- und Instandhaltungsplanung dar. Das System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung leistet damit einen Beitrag zur Auflösung bzw. Verminderung der Defizite der prozessualen und analytischen Komplexität (vgl. Abschnitt 1.2) sowie zur Realisierung der Potenziale (vgl. Abschnitt 1.1).

5 System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Das System adressiert den in Abschnitt 4.3 dargestellten Handlungsbedarf wie folgt:

1. *Modellierung des Produktionssystems*: Die Entwicklung von Informationsmodellen für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung dient der Strukturierung und Modellierung der Eigenschaften und Fähigkeiten der Ressourcen des Produktionssystems sowie der Charakteristika und Anforderungen der Leistungen. Als informationstechnische Grundlage ermöglichen die Informationsmodelle eine ausreichende Detailtiefe der Produktionssystemmodellierung sowie die Berücksichtigung der Restriktionen und realen Abläufe.
2. *Entscheidungsdimensionen*: Die Entwicklung eines multikriteriellen, linearen, gemischt-ganzzahligen, dynamischen und deterministischen Optimierungsmodells mit den wesentlichen Entscheidungsdimensionen von Produktions- und Instandhaltungsplanung ermöglicht die Berücksichtigung der Interdependenzen der Planungsbereiche. Darüber hinaus befähigt es zur Synchronisation des Einsatzes von gemeinsam verwendeten Ressourcen und zur vollständigen Durchsuchung des Lösungsraumes. Dies dient der besseren Abbildung des realen Entscheidungsproblems und der Ermittlung von effizienten Leistungsreihenfolgen.
3. *Ziele*: Die Bildung eines multikriteriellen Zielsystems mit Zielgrößen der Produktions- und Instandhaltungsplanung unter Berücksichtigung von strategischen Erfolgsfaktoren produzierender Unternehmen stellt die integrierte Betrachtung der Ziele sicher. Die Anwendung der Goal-Programming-Methode ermöglicht die Angabe von Zielwerten und bietet Flexibilität bei der Gestaltung der Zielsysteme für die Ermittlung der Handlungsalternativen.
4. *Entscheidungsprozess der Produktions- und Instandhaltungsplanung*: Die Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung führt die Entscheidungsträger durch die Phasen der integrierten Planung. Die auf der präskriptiven Entscheidungsfindung basierende Methode ermöglicht u. a. mit der Entwicklung und Bewertung von Handlungsalternativen den systematisch-methodischen und rationalen Entscheidungsprozess und trägt somit zur Auflösung der Konfliktsituation bei.

6 Informationsmodelle für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung

Die Informationsmodelle als Systemelement innerhalb des technischen Teilsystems übernehmen die Aufgabe, die für eine integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung benötigten Informationen strukturiert zu verwalten und für das Optimierungsmodell bereitzustellen. Des Weiteren beschreiben die Informationsmodelle die Eigenschaften und Fähigkeiten der Ressourcen des Produktionssystems sowie die Charakteristika und Anforderungen der Leistungen.

Zunächst ist eine Abgrenzung der oftmals synonym verwendeten Begrifflichkeiten *Daten* und *Informationen* erforderlich. Daten bezeichnen analoge oder digitale Zeichen oder Signale, welche nach einer Syntax zu Zeichenfolgen zusammengesetzt werden (BRACHT ET AL. 2018, S. 173). Sie enthalten keine Verwendungshinweise und können folglich in unterschiedlicher Art und Weise interpretiert werden. Informationen entstehen durch die Interpretation von Daten und beinhalten die Bedeutung von Daten im jeweiligen Kontext (BRACHT ET AL. 2018, S. 174). Informationen umfassen „[...] kennzeichnende Angaben über ein Objekt (Sachverhalt, Tatbestand, Ereignis, Vorgang, Prozess oder Phänomen)“ (HETTICH 1981, S. 14–15) und dienen „[...] als Mittel für das Auffinden und Bilden von Zielen sowie für die bewusste, zielgerichtete Vornahme von Handlungen“ (HETTICH 1981, S. 15). Sie sind folglich immer mit dem Zustand und einer Funktion zur Planung, Steuerung und Kontrolle eines Systems verbunden (CHRIST 1979, S. 24). Für die effektive und effiziente Ausführung des Leistungserstellungsprozesses werden Informationen eine zentrale Bedeutung beigemessen (HEINRICH 2013, S. 9). Den vorgestellten Definitionen folgend, bezeichnen Daten in der vorliegenden Arbeit die informationstechnische Beschreibung einzelner Aspekte von Ressourcen oder Leistungen. Als Informationen werden die in der erforderlichen Struktur der Informationsmodelle des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung vorhandenen Daten bezeichnet.

Es werden das Informationsmodell der Ressourcen des Produktionssystems und das Informationsmodell der Leistungen unterschieden. Die Abbildung der jeweiligen In-

Informationsmodelle in Klassendiagrammen erfolgt in der Unified Modelling Language (UML). Die UML-Notation zeichnet sich durch eine kompakte Darstellung sowie vielfältige Anwendungsmöglichkeiten aus, was zu einer hohen Akzeptanz und Verbreitung führte (RUMPE 2011, S. 3; CZUCHRA 2010, S. 18). Die Klassendiagramme dienen der grafischen Darstellung der statischen Relationen der Ressourcen des Produktionssystems und der Leistungen. Nachfolgend wird im Abschnitt 6.1 das Informationsmodell der Ressourcen des Produktionssystems vorgestellt. Anschließend erfolgt im Abschnitt 6.2 die Darstellung des Informationsmodells der Leistungen der Produktion und Instandhaltung. Das Kapitel schließt mit der Darstellung des Technologieabgleiches zur Verbindung von Leistungen und Ressourcen (Abschnitt 6.3).

6.1 Informationsmodell der Ressourcen des Produktionssystems

Das Informationsmodell der Ressourcen des Produktionssystems dient der Beschreibung des grundlegenden Fähigkeitsangebotes sowie der Modellierung der technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Daten der an den Leistungserstellungsprozessen beteiligten Ressourcen. Die erforderlichen Daten stammen aus den beiden Planungsbereichen. Der Prozess der Datenerhebung wird in Abschnitt 8.4 beschrieben.

Ausgangspunkt der Modellierung ist der spezifizierte Betrachtungsbereich. Er umfasst das Produktionssystem eines produzierenden Unternehmens sowie die unmittelbar an den Leistungserstellungsprozessen beteiligten Ressourcen. Zur eindeutigen Strukturierung eines Produktionssystems und der Ressourcen kommen das Ebenenmodell nach WIENDAHL ET AL. (2007, S. 785–786) und WESTKÄMPER (2007) sowie die Klassifizierung nach VDI 2898 zur Anwendung (vgl. Abschnitt 1.4.1). Im Kontext dieser Arbeit ist die oberste zu betrachtende Hierarchie des Ebenenmodells die Ebene der Segmente. In der betrieblichen Realität existierende Segmente sind z. B. die Fertigung, die Instandhaltung und die Montage. In den Segmenten befinden sich Linien. Die Linien besitzen oftmals eine Vielzahl an ein- und ausgehenden Materialflüssen. Zudem beinhalten sie i. d. R. eine Menge an aufeinander folgenden Leistungserstellungsprozessen, welche an Maschinen stattfinden. Maschinen repräsentieren nach SCHUH ET AL. (2012a, S. 74) die wesentlichen dispositiven Ressourcen in Produktionssystemen. Darüber hinaus erfordern die Leistungen der Produktions- und Instandhaltung i. d. R. den kombinierten Einsatz von Ressourcen des Produktionssystems. Daraus leitet sich die Notwendigkeit ab, an den Maschinen eingesetzte weitere Betriebsmittel zur Durchführung der

6.1 Informationsmodell der Ressourcen des Produktionssystems

Leistungen zu berücksichtigen. Die weiteren Betriebsmittel können nach VDI 2815 gegliedert werden. Sie sind in Tabelle 6.1 zusammenfassend dargestellt und werden nachfolgend als Equipments bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit stellen die Maschinen und die Equipments nicht weiter unterteilbare Produktionssystemressourcen dar.

Tabelle 6.1: Gliederung der Betriebsmittel in Produktionssystemen nach VDI 2815

Betriebsmittel	Beschreibungen
Fertigungsmittel	Mittel zur direkten oder indirekten Form, Substanz oder Fertigungszustandsänderung, mechanischer bzw. chemisch-physikalischer Art
Fördermittel	Mittel zur Orts- und Lageveränderung von Material, Erzeugnissen und anderen Gegenständen
Lagermittel	Mittel zum Abstellen und Aufbewahren von Material, Erzeugnissen und anderen Gegenständen
Prüfmittel	Mittel, die bei der Durchführung von Fertigungsaufgaben zum Prüfen von Maßhaltigkeit, Funktion, Beschaffenheit und besonderen Eigenschaften dienen
Organisationsmittel	Mittel, die als Hilfsmittel der Ablauforganisation eingesetzt werden, welche nicht der Be- oder Verarbeitung von Material oder Erzeugnissen dienen

Im Fokus der vorliegenden Arbeit liegen für Produktionsleistungen die Fertigungsmittel, da sie i. d. R. unmittelbar am Leistungsprozess beteiligt sind. Des Weiteren entstehen beim Einsatz der Fertigungsmittel aufgrund von Abnutzung und Verschleiß Bedarfe für Instandhaltungsleistungen. Die Instandhaltung verfügt zur Durchführung der Instandhaltungsleistungen über eigene Ressourcen, deren Kapazitäten und Verfügbarkeiten zu berücksichtigen sind. Es sind Ressourcen der ortsflexiblen und ortsgewunden Instandhaltungsleistungen zu unterscheiden. Die Differenzierung dient der Abbildung verschiedener Instandhaltungsbereiche für die Instandhaltungsobjekte. Ein Instandhaltungsbereich ist nach DIN 13306 ein Ort innerhalb einer Organisation, an dem definierte Instandhaltungstätigkeiten an einer Einheit durchzuführen sind. Ein Instandhaltungsobjekt ist eine Einheit, welche einen „[...] potenziellen oder tatsächlichen Wert für eine Organisation darstellt“ (DIN 13306) und an der Instandhaltungsleistungen durchgeführt werden. Ressourcen der ortsflexiblen Instandhaltungsleistungen sind Ressourcen, deren Einsatzorte variabel sind und welche sich zum Zeitpunkt der Durchführung einer Instandhaltungsleistung am Instandhaltungsobjekt befinden. Sie werden in der Klassifikationsstruktur den Equipments zugeordnet. Ein Beispiel ist ein Instandhalter mit Werkzeugset (Instandhaltungsressource), der eine Wartung einer Maschine (Instand-

6 Informationsmodelle

haltungsobjekt) durchführt. Ressourcen der ortsgebundenen Instandhaltungsleistungen befinden sich an einem definierten Standort und werden in der Klassifikationsstruktur den Maschinen zugeordnet. Sie können (kurzfristig) nicht an den Ort des Bedarfes der Instandhaltungsleistung versetzt werden oder es ist mit geringerem Aufwand verbunden, das Instandhaltungsobjekt zur Instandhaltungsressource zu transportieren. Ein Beispiel ist die Instandsetzung eines in der Produktion eingesetzten Fertigungsmittels (Instandhaltungsobjekt) an einer Maschine in der Instandhaltungswerkstatt (Instandhaltungsressource).

Die zur Durchführung einer Leistung gleichzeitig eingesetzten Ressourcen des Produktionssystems werden im Informationsmodell als Ressourcenkombinationen zusammengeführt. Es wird die Annahme getroffen, dass sich zur Durchführung einer Leistung alle Ressourcen im Prozesszeitraum am selben Ort befinden müssen. Die Festlegung der in der Planung zu betrachtenden Ressourcenkombinationen erfolgt im jeweiligen Anwendungsfall. Die Klassifikationsstruktur zur Beschreibung von Ressourcenkombinationen für Produktions- und Instandhaltungsleistungen ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

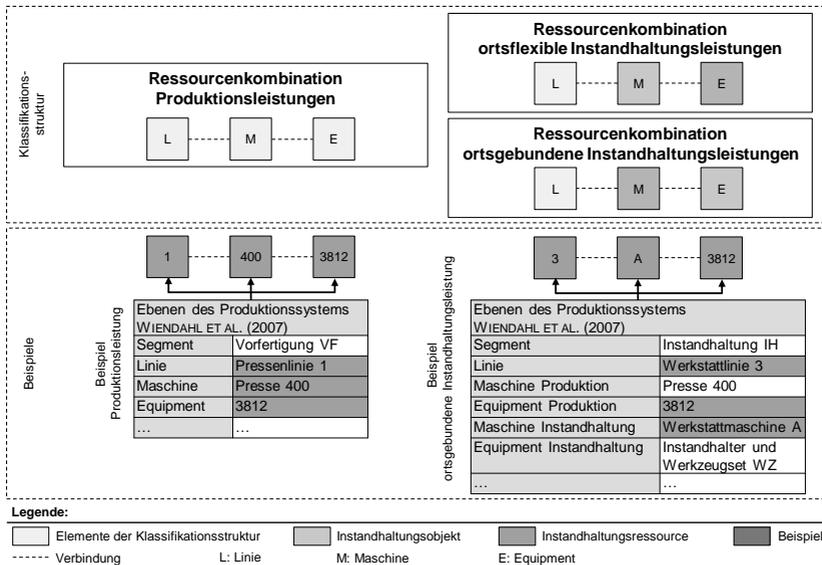


Abbildung 6.1: Klassifikationsstruktur zur Beschreibung von Ressourcenkombinationen für Produktions- und Instandhaltungsleistungen

6.1 Informationsmodell der Ressourcen des Produktionssystems

Die informationstechnische Spezifikation der organisatorischen, wirtschaftlichen und technischen Eigenschaften der Ressourcenkombinationen¹ erfolgt in Anlehnung an F. GEIGER (2015) und OSTGATHE (2012).

Die Klasse der organisatorischen Informationen beinhaltet die grundlegenden Angaben der Ressourcenkombination (u. a. ID, Bezeichnung, Ort, Kostenstelle). Eine Ressourcenkombination kann nach DIN 13306 in verschiedenen Betriebsmodi bzw. -profilen betrieben werden, welche durch die Klassen Wirtschaftlichkeit und Umgebungseinflüsse zu spezifizieren sind. Die Klasse der Wirtschaftlichkeit umfasst Angaben zu den Kosten (u. a. Stundensatz). Die Daten zu den allgemeinen Rahmenbedingungen des Einsatzes der Ressourcenkombination (u. a. Verschleiß, Energieverbrauch) werden der Klasse Umgebungseinflüsse zugeordnet. Die Klasse der technischen Fähigkeiten beinhaltet die Beschreibung der zur Verfügung stehenden technischen Funktionalitäten. Die technischen Fähigkeiten einer Ressourcenkombination werden in einem Technologievektor zusammengeführt. Die Klassifikationsstruktur ist mit einem Beispiel für Produktionsleistungen in Abbildung 6.2 dargestellt.

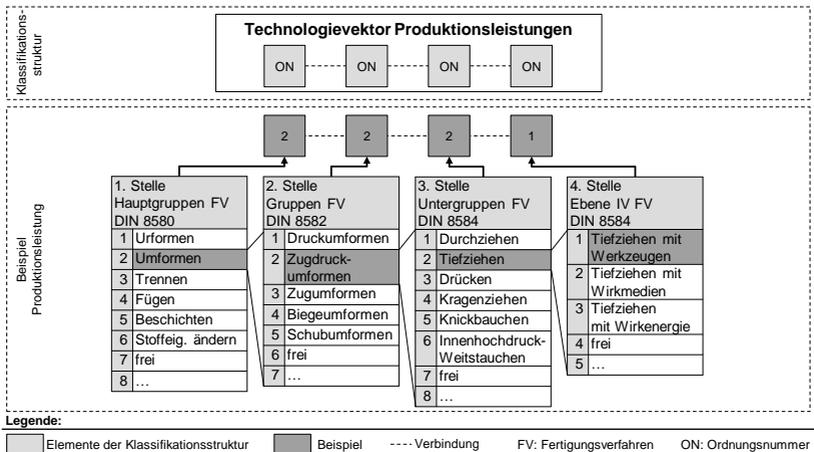


Abbildung 6.2: Klassifikationsstruktur zur Beschreibung der Fähigkeiten von Ressourcenkombinationen für Produktionsleistungen

¹ Es besteht die Möglichkeit der informationstechnischen Spezifikation jeder einzelnen Ressource des Produktionssystems. Aufgrund des dargestellten Einsatzes von Kombinationen von Ressourcen des Produktionssystems zur Durchführung von Produktions- und Instandhaltungsleistungen erfolgt in der vorliegenden Arbeit die Spezifikation von Ressourcenkombinationen.

6 Informationsmodelle

Die Klassifikation der Fähigkeiten der Ressourcenkombinationen für Produktionsleistungen erfolgt anhand der DIN 8580. Als Elemente im Technologievektor dienen die Ordnungsnummern der Hauptgruppen, Gruppen und Untergruppen der DIN 8580 im Rahmen der Einteilung der Fertigungsverfahren.

Die Fähigkeiten der Ressourcenkombinationen für Instandhaltungsleistungen werden anhand der DIN 31051 sowie der DIN 13306 klassifiziert. Die Ordnungsnummern der differenzierten Grundmaßnahmen und Tätigkeiten dienen als Elemente im Technologievektor. Die Klassifikationsstruktur ist mit einem Beispiel in Abbildung 6.3 dargestellt.

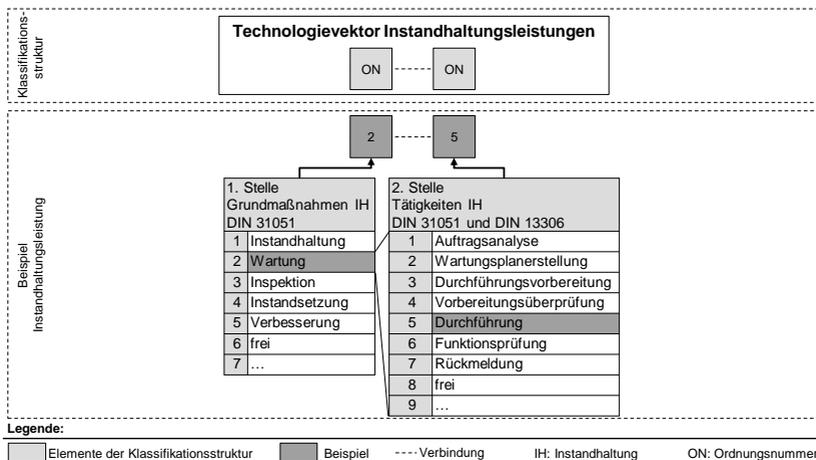


Abbildung 6.3: Klassifikationsstruktur zur Beschreibung der Fähigkeiten von Ressourcenkombinationen für Instandhaltungsleistungen

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Klassifikation der Fähigkeiten in einem Technologievektor die Beschreibung der fertigungs- sowie instandhaltungstechnischen Fähigkeiten einer Ressourcenkombination ermöglicht. Eine Fähigkeit repräsentiert die Möglichkeit der Durchführung einer Produktions- oder Instandhaltungsleistung an bzw. unter Einsatz der Ressourcenkombination.

Die Modellierung führt zum Informationsmodell der Ressourcen des Produktionssystems. Eine Instanz der Klasse des Produktionssystems besteht mindestens aus einer Instanz der Klasse Ressourcenkombination. Weitere Ressourcenkombinationen können durch zusätzliche Instanzen der Klasse Ressourcenkombination abgebildet werden. Zur

6.1 Informationsmodell der Ressourcen des Produktionssystems

Sicherung der einheitlichen Struktur setzt sich die Klasse Ressourcenkombination aus den assoziierten Klassen Linien, Maschinen und Equipments zusammen. Die eindeutige informationstechnische Beschreibung einer Instanz einer Ressourcenkombination erfolgt durch die Zuordnung jeweils einer Instanz der Klassen organisatorische Daten, technische Fähigkeiten sowie Betriebsmodi. Eine Instanz der technischen Fähigkeiten wird durch den Technologievektor der Klasse Verfahrensarten sowie durch technische Daten spezifiziert. Eine Instanz des Betriebsmodi wird durch die Wirtschaftlichkeit und Umgebungseinflüsse charakterisiert. Das Informationsmodell der Ressourcen des Produktionssystems als Klassendiagramm in UML-Notation ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

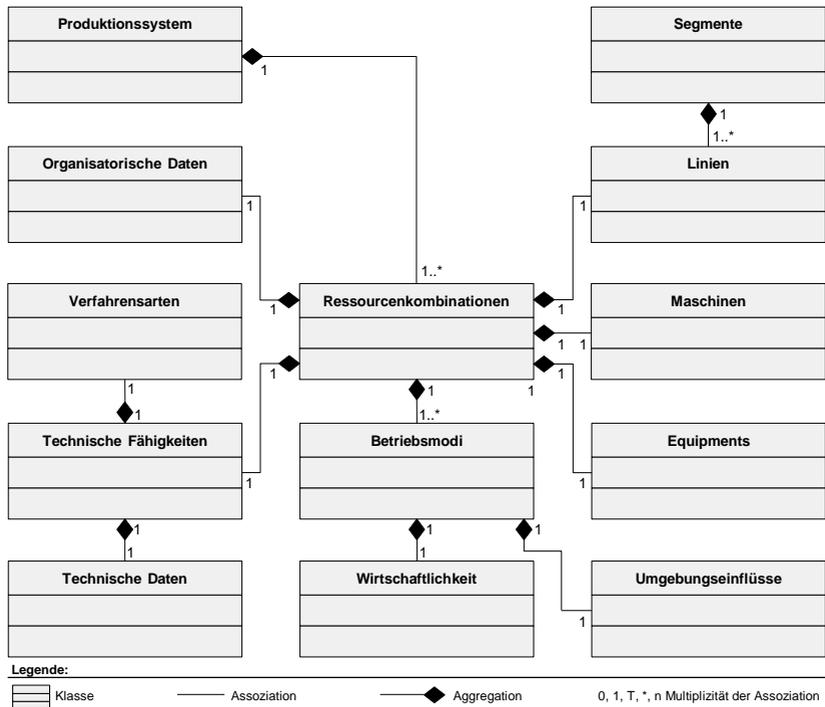


Abbildung 6.4: Darstellung des Informationsmodells der Ressourcen des Produktionssystems in UML-Notation

6.2 Informationsmodell der Leistungen

Das Informationsmodell der Leistungen modelliert die Fähigkeitsanforderungen der Leistungen an die Ressourcen des Produktionssystems und dient der informationstechnischen Spezifikation der organisatorischen, wirtschaftlichen und technischen Eigenschaften von Produktions- und Instandhaltungsleistungen. Zur Erreichung des übergeordneten Zieles der geeigneten Zuordnung von Leistungen zu Ressourcen erfolgt die Modellierung der technischen Anforderungen der Leistungen von Produktion und Instandhaltung analog zu den technischen Fähigkeiten der Ressourcen des Produktionssystems.

Voraussetzung für die Spezifikation der Leistungen ist die Kenntnis der zur Durchführung erforderlichen Arbeitsvorgänge. Eine Leistung umfasst dabei eine Menge an Arbeitsvorgängen, welche unmittelbar aufeinander folgen und an bzw. unter Einsatz derselben Ressourcenkombination durchgeführt werden. Die Ermittlung der notwendigen Arbeitsvorgänge erfolgt in der Arbeitsplanung. Das Ergebnis wird im Arbeitsplan festgehalten und beschreibt die Arbeitsvorgangsfolge zur Herstellung eines Teils, einer Gruppe oder eines Erzeugnisses (F. GEIGER 2015, S. 62; REFA 1991) bzw. die Arbeitsvorgangsfolge einer Instandhaltungsleistung² (VDI 2890). Die Arbeitsplanung ist entsprechend dem Betrachtungsbereich (vgl. Abschnitt 1.4) nicht Bestandteil der Produktions- und Instandhaltungsplanung. Folglich stellen Arbeitspläne mit den darin enthaltenen Arbeitsvorgängen Eingangsinformationen für das System dar.

Eine Leistung kann vollständig durch die Klassen organisatorische Daten, Wirtschaftlichkeit und technische Anforderungen modelliert werden. Die Klasse der organisatorischen Daten umfasst Daten zur eindeutigen Identifikation (u. a. ID, Beschreibung) sowie Daten zur Beschreibung des Bedarfes einer Leistung (u. a. Bedarfsmenge und Bedarfstermin). Die Klasse der Wirtschaftlichkeit beinhaltet die Daten, welche die bei der Durchführung der Leistung anfallenden Aufwände charakterisieren (u. a. Zeiten, Kosten). Die technischen Anforderungen umfassen Daten zu benötigten Verfahrensarten und Technologien (u. a. Werkstoffe und deren Eigenschaften).

² Die Arbeitspläne der Instandhaltung werden in Abhängigkeit von der jeweiligen Grundmaßnahme der Instandhaltung (vgl. Abschnitt 1.4.3.1) ebenso als Wartungs-, Inspektions- und Prüfplan bezeichnet. Aufgrund der Zusammenfassung der Grundmaßnahmen der Instandhaltung als Leistungen erfolgt in der vorliegenden Arbeit keine Differenzierung. Weiterführende Informationen enthalten VDI 2890 und DIN 31051.

Die Produktionsleistungen stellen diejenigen Leistungserstellungsprozesse dar, welche unmittelbar mit der Herstellung von Produkten verbunden sind. Die Klassifikation der technischen Anforderungen der Produktionsleistungen im Technologievektor erfolgt analog zu den Fähigkeiten der Ressourcen anhand der DIN 8580. Die Instandhaltungsleistungen garantieren die Leistungsfähigkeit der Ressourcen und dienen der Absicherung und Verbesserung der Leistungserstellungsprozesse der Produktion zur Herstellung von Produkten. Die Klassifikation der Anforderungen der Instandhaltungsleistungen erfolgt nach DIN 31051 und DIN 13306. Sind im Rahmen einer Leistung mehrere Arbeitsvorgänge durch eine Ressourcenkombination durchzuführen, so sind die Anforderungen im Technologievektor zu subsumieren. Die Menge der Produktions- und Instandhaltungsleistungen wird als Leistungsportfolio bezeichnet. Das Informationsmodell der Leistungen ist in UML-Notation in Abbildung 6.5 dargestellt.

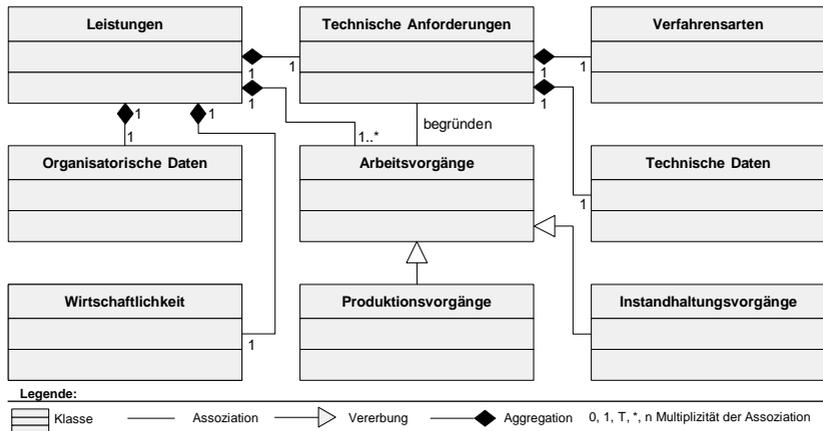


Abbildung 6.5: Darstellung des Informationsmodells der Leistungen in UML-Notation

6.3 Verbindung der Informationsmodelle der Ressourcen des Produktionssystems und der Leistungen

Im Planungsprozess werden die durchzuführenden Leistungen der beiden Planungsbereiche den Ressourcen des Produktionssystems zugeordnet. Dieser Vorgang wird auch als Allokation bezeichnet. Voraussetzung für die Allokation ist die Kenntnis der möglichen

6 Informationsmodelle

Allokationen. Die Menge der möglichen Allokationen wird in der vorliegenden Arbeit als Allokationsbereich definiert. Zur Bestimmung des Allokationsbereiches müssen die technischen Fähigkeiten der Ressourcen des Produktionssystems, welche das Fähigkeitsangebot repräsentieren, den Fähigkeitsanforderungen der Leistungen gegenübergestellt werden. Die Fähigkeitsanforderungen werden aus den technischen Anforderungen der einzelnen Produktions- bzw. Instandhaltungsleistungen abgeleitet. Die Gegenüberstellung der Fähigkeiten und der Anforderungen kann mittels Technologieabgleich erfolgen. Er ist in Abbildung 6.6 dargestellt.

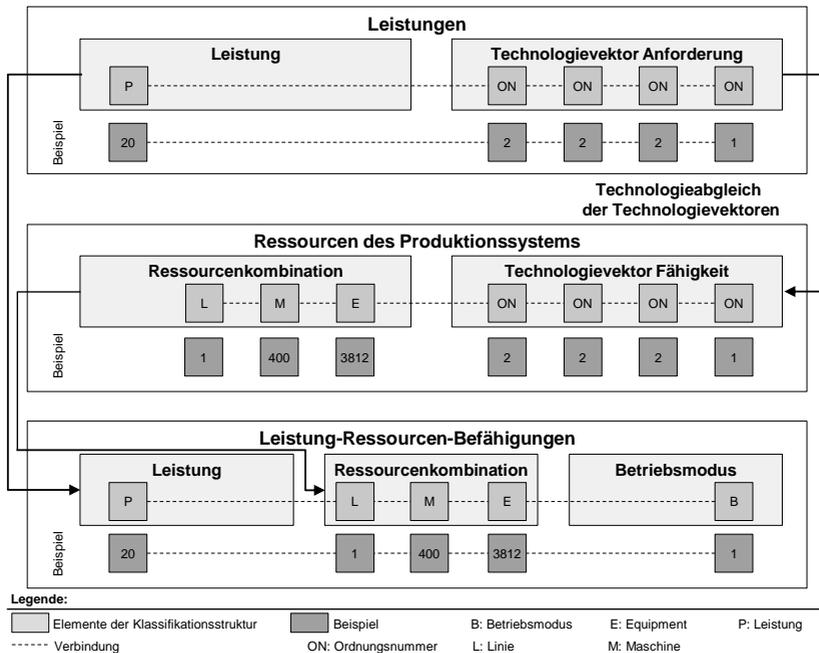


Abbildung 6.6: Technologieabgleich zur Bestimmung der Struktur des Produktionssystems und der Leistungen

Im Technologieabgleich erfolgt ein Vergleich der technischen Anforderungen der Leistungen mit den technischen Fähigkeiten der Ressourcenkombinationen des Produktionssystems, welche durch die jeweiligen Technologievektoren modelliert sind. Übereinstimmende Technologievektoren repräsentieren, dass die Ressourcenkombination die Durchführung der Leistung ermöglicht. Diejenigen Leistungen und Ressourcen,

deren Technologievektoren übereinstimmen, sind zusammenzuführen. Sie stellen die existierenden Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Kombinationen dar und werden im System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung in der Menge *PLMEB* zusammengefasst. Sie werden nachfolgend als Leistung-Ressourcen-Befähigungen bezeichnet. Die Menge der Leistung-Ressourcen-Befähigungen repräsentiert den Allokationsbereich.

Die Leistung-Ressourcen-Befähigungen sind zur Abbildung aller notwendigen Informationen der Planungsbereiche zusätzlich zu parametrisieren. Zur Parametrisierung der Befähigungen werden in Anlehnung an HEES (2017) planerische Informationen und technische Informationen differenziert. Die planerischen Informationen beinhalten die Vorgaben des Managements der beteiligten Planungsbereiche sowie Angaben zu den betrieblichen Abläufen des Produktionssystems (u. a. Betriebszeiten, Rüstkosten und -zeiten). Die technischen Informationen umfassen die technischen Daten der Leistung-Ressourcen-Befähigungen sowie des Produktionssystems (u. a. Verschleißrate).

Mit der Verbindung von Leistungen und Ressourcen des Produktionssystems sowie der Parametrisierung ist die grundlegende Strukturierung der Informationen abgeschlossen. Die zusammengeführten Informationsmodelle bilden die informationstechnische Struktur des Produktionssystems sowie der Leistungen innerhalb des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung. Die Entscheidung, welche Leistung durch welche Ressourcen durchzuführen ist, erfolgt durch die Auswahl einer Handlungsalternative. Die Handlungsalternativen werden unter Einsatz des multikriteriellen Optimierungsmodells ermittelt. Die dargestellte allgemeine Klassifikation ermöglicht eine anwendungsfallspezifische Festlegung der zu berücksichtigenden Ressourcen und Leistungen sowie eine anwendungsfallspezifische Abbildung der Betrachtungstiefe. Zusätzlich kann das Klassifikationsschema für den jeweiligen Anwendungsfall angepasst und erweitert werden. Zum Beispiel kann eine Übertragung auf die Montage³ unter Anwendung der VDI 2860 sowie eine Erweiterung um Anforderungen an Oberflächengestalten von Produkten sowie der sich daraus ableitenden erforderlichen fertigungstechnischen Fähigkeiten erfolgen.

³ Ein beispielhaftes Klassifikationsschema für die Montage wird in HEES (2017, S. 68–71) vorgestellt.

7 Multikriterielles Optimierungsmodell zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Den Ausführungen des Abschnittes 5.2 folgend, ist innerhalb des technischen Teilsystems als Systemelement ein multikriterielles, gemischt-ganzzahliges, lineares, dynamisches und deterministisches Optimierungsmodell zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung zu entwickeln. Nachfolgend wird zunächst die Modellbildung dargestellt (Abschnitt 7.1). Anschließend wird im Abschnitt 7.2 das mathematische Modell vorgestellt.

7.1 Modellbildung

Das Ziel der Modellbildung ist, das reale Entscheidungsproblem der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung in ein konzeptionelles Modell zu überführen. Der spezifizierte Betrachtungsbereich (vgl. Abschnitt 1.4), der abgeleitete Systemansatz (vgl. Kapitel 5) sowie die Informationsmodelle (vgl. Kapitel 6) bilden hierzu die Ausgangsbasis. Die Modellbildung gliedert sich in vier Abschnitte. Zunächst erfolgt im Abschnitt 7.1.1 die Festlegung der Struktur der Zeit. Anschließend wird das Leistungsportfolio spezifiziert (Abschnitt 7.1.2). Weiterhin erfolgt die Darstellung der zu berücksichtigenden funktionalen Nebenbedingungen der integrierten Planung (Abschnitt 7.1.3). Die im Planungsprozess zu berücksichtigenden Ziele werden im Abschnitt 7.1.4 identifiziert. Die Struktur der Modellbildung ist in Abbildung 7.1 dargestellt.

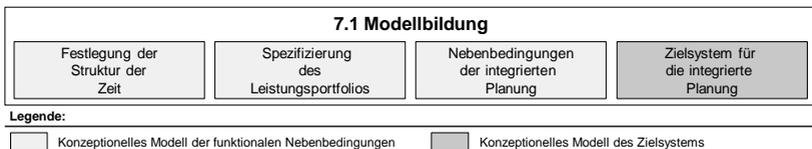


Abbildung 7.1: Struktur der Modellbildung des multikriteriellen Optimierungsmodells zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

7.1.1 Festlegung der Struktur der Zeit

Die Produktions- und Instandhaltungsplanung erfolgt in der betrieblichen Realität in regelmäßigen Abständen für einen definierten Planungszeitraum, den sog. Planungshorizont. Die Ausführungsfrequenz kann von täglich bis monatlich reichen (HACKSTEIN 1989, S. 8). Der Planungshorizont wird i. d. R. in zeitlich kürzere Planungsperioden unterteilt, z. B. Tage und Schichten, und somit diskretisiert. Daraus leitet sich die Anforderung der Berücksichtigung der Struktur der Zeit des Planungszeitraumes ab. Im Bereich der Produktionsplanung, insbesondere der Losgrößenplanung, differenziert die Fachliteratur zwei Modellklassen für mathematische Modelle mit diskret modellierter Zeit: Modelle mit langen Zeitperioden (engl. *Big Bucket*) und Modelle mit kurzen Zeitperioden (engl. *Small Bucket*) (STAMMEN-HEGENER 2002, S. 30; DREXL & KIMMS 1997, S. 227). Beide Modellklassen weisen charakteristische Eigenschaften auf, deren Eignung¹ nachfolgend untersucht wird.

Big Bucket-Modelle, wie z. B. das Capacitated Lot-Sizing Problem (CLSP), unterteilen den Planungshorizont in wenige lange Planungsperioden (ALMEDER & ALMADA-LOBO 2011, S. 7316). Innerhalb einer Planungsperiode können mehrere Produkttypen und Rüstvorgänge eingeplant werden (DREXL & KIMMS 1997, S. 224). Modelle dieser Klasse verfügen i. d. R. über eine geringe Anzahl an Entscheidungsvariablen, was die Lösungszeit positiv beeinflusst. Eine Festlegung von Terminen und Reihenfolgen innerhalb der Planungsperioden erfolgt nicht (ALMEDER & ALMADA-LOBO 2011, S. 7316). Dies erschwert die Modellierung von reihenfolgeabhängigen Kosten sowie Zeiten und kann in der betrieblichen Realität zu nicht durchführbaren Plänen führen (ALMEDER & ALMADA-LOBO 2011, S. 7315; DREXL & KIMMS 1997, S. 225).

Small Bucket-Modelle, wie z. B. das Discrete Lot-Sizing and Scheduling Problem (DLSP), unterteilen den Planungshorizont in viele kurze Planungsperioden (ALMEDER & ALMADA-LOBO 2011, S. 7317). Die Modelle charakterisieren sich durch eine restriktive Modellierung der möglichen Anzahl an Produkttypen und Rüstvorgängen innerhalb einer Planungsperiode, wodurch die Angabe von Terminen und Reihenfolgen ermöglicht wird. Modelle dieser Klasse treffen i. d. R. die Annahme, dass ein Produkt

¹ Eine detaillierte Darstellung von Small Bucket- und Big Bucket-Modellen mit ihren Charakteristika ist aufgrund der Vielzahl im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich. Die Charakteristika beziehen sich auf die Standardmodelle der jeweiligen Klassen. Weiterführende wissenschaftliche Analysen sind in der einschlägigen Fachliteratur zu finden, u. a. KASPER (2016) und STAMMEN-HEGENER (2002).

die gesamte verfügbare Ressourcenkapazität einer Periode beanspruchen muss. Dies kann zu unnötig hohen Lagerbeständen führen und verhindert die Einplanung von Freiheitsgraden (STAMMEN-HEGENER 2002, S. 73). Darüber hinaus ergibt sich eine größere Anzahl an Entscheidungsvariablen, was die Problemgröße ansteigen lässt und die Lösungszeit negativ beeinflusst (ALMEDER & ALMADA-LOBO 2011, S. 7317).

FLEISCHMANN & MEYR (1997) stellen auf Basis von PRESSMAR (1980) mit dem General Lot-Sizing and Scheduling Problem (GLSP) einen Ansatz vor, welcher die Vorteile beider Klassen zu kombinieren versucht. Die Zeit wird mittels Makroperioden t und Mikroperioden s zweistufig strukturiert. Makroperioden t unterteilen den endlichen Planungshorizont in eine feste Anzahl an Planungsperioden und haben eine definierte Länge. Jede Makroperiode t wird durch eine definierte Anzahl an Mikroperioden s mit variabler Länge unterteilt (STAMMEN-HEGENER 2002, S. 92). Die Länge einer Mikroperiode s wird durch die stattfindenden Vorgänge determiniert (STAMMEN-HEGENER 2002, S. 97–98). Dies ermöglicht eine eindeutige Ermittlung von Terminen und Reihenfolgen. Das GLSP wird aufgrund seiner übergeordneten Gliederung der Zeit mittels Makroperioden t den Big Bucket-Modellen zugeordnet.

Es zeigt sich, dass die Strukturierung der Zeit auf Basis des Ansatzes von FLEISCHMANN & MEYR (1997) für ein mathematisches Modell zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung vorteilhaft ist. Sie ermöglicht eine flexible Modellierung von Vorgängen, die Ermittlung von Terminen und Reihenfolgen sowie die Einplanung von Freiheitsgraden. Folglich ist die Strukturierung der Zeit mittels Makroperioden t und Mikroperioden s umzusetzen. Die Strukturierung der Zeit ist in Abbildung 7.2 dargestellt.

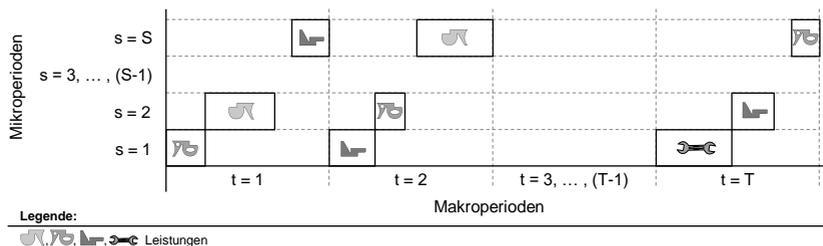


Abbildung 7.2: Strukturierung der Zeit eines endlichen Planungshorizontes mittels Makro- und Mikroperioden

7.1.2 Spezifizierung des Leistungsportfolios

Das Leistungsportfolio stellt den Leistungsumfang der Planungsbereiche dar. Es setzt sich aus dem Leistungsportfolio der Produktion und dem Leistungsportfolio der Instandhaltung zusammen.

Leistungsportfolio der Produktion: Das Ergebnis der Produktionsleistungen sind die Produkte. Sie setzen sich in der betrieblichen Realität i. d. R. aus einer Vielzahl von Baugruppen und Einzelteilen zusammen (WIENDAHL 2010, S. 139). Die Gliederung eines Erzeugnisses wird in der Produktstruktur (engl. *Bill of Materials*) dokumentiert, welche Informationen über die zur Herstellung benötigten Rohmaterialien, Teile und Baugruppen mit Art und Menge umfasst (WIENDAHL 2010, S. 140; STONEBRAKER 1996, S. 252). Aufgrund der Gliederung der Produkte ist eine Modellierung mehrstufiger Leistungsprozesse der Produktion vorzunehmen. Es sind Zwischen- und Endprodukte als Leistungsportfolio der Produktion zu modellieren. Die Endprodukte repräsentieren diejenigen Produkte, welche für den Verkauf an Kunden oder in den Absatzmärkten vorgesehen sind. Als Zwischenprodukte werden die Baugruppen und Einzelteile definiert, welche zur Herstellung der Endprodukte benötigt sowie innerhalb des Produktionssystems im Rahmen der Eigenfertigung hergestellt werden. Die Bedarfe an Zwischenprodukten leiten sich folglich aus den Bedarfen der Endprodukte sowie den in den Produktstrukturen enthaltenen Art- und Mengeninformatoren ab.

Leistungsportfolio der Instandhaltung: Zur Abbildung verschiedener Instandhaltungsbereiche für die Instandhaltungsobjekte sind ortsflexible und ortsgebundene Instandhaltungsleistungen zu differenzieren (vgl. Kapitel 6). Darüber hinaus können in einem Produktionssystem für die Ressourcen unterschiedliche Instandhaltungsstrategien zur Anwendung kommen (KALUZA ET AL. 1994, S. 22). Eine Instandhaltungsstrategie ist definiert als Vorgehensweise des Managements zur Erreichung der Instandhaltungsziele (DIN 13306). Nach SCHUH ET AL. (2005) und DIN 13306 werden die *präventive* sowie *korrektive Instandhaltungsstrategie* unterschieden. Bei Anwendung der präventiven Strategie wird davon ausgegangen, dass die Bedarfszeitpunkte für Instandhaltungsleistungen bekannt sind oder durch die Analyse von Daten zu Ausfallverhalten, Nutzungszeit und -umfang, Intensität sowie mittels Inspektionen ermittelt werden können (KALUZA ET AL. 1994, S. 22–23). Die präventive Strategie lässt sich des Weiteren in die *zeit-* und die *zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie* unterscheiden (SCHUH ET AL. 2005). Bei Anwendung einer zeitorientierten Strategie werden die Instandhaltungs-

leistungen in zeitlich fixen Abständen, unabhängig von der realen Abnutzung bzw. dem Verschleiß der Ressource, eingeplant (WOLTER 2016, S. 1; PROKSCH 2002, S. 30). Als zustandsorientierte Strategie wird in der vorliegenden Arbeit die Einplanung von Instandhaltungsleistungen bei Überschreitung einer ressourcenspezifischen Verschleißgrenze unter Kenntnis des Ausgangszustands sowie des Verlaufes des Verschleißes verstanden. Der Verlauf des Verschleißes steht in Abhängigkeit von Nutzungsumfang und Intensität. Bei Anwendung einer korrektiven Instandhaltungsstrategie werden bis zum Zeitpunkt des Eintretens eines Ausfalles keine Instandhaltungsleistungen eingeplant. Nach Eintritt eines Ausfalls sind die *sofortige* und die *aufgeschobene korrektive Instandhaltung* zu unterscheiden (DIN 13306). Die sofortige korrektive Instandhaltung erfolgt unverzüglich. Dies entspricht dem Betrachtungsbereich der Instandhaltungssteuerung und folglich sind aus Sicht der Instandhaltungsplanung keine Instandhaltungsleistungen einzuplanen. Die aufgeschobene korrektive Instandhaltung gleicht der zeitorientierten Strategie, da Bedarfszeitpunkte für die Instandhaltungsleistungen angegeben werden können. Zusammenfassend sind ortsflexible und ortsgebundene Instandhaltungsleistungen der zeit- und zustandsorientierten Instandhaltungsstrategien abzubilden.

7.1.3 Nebenbedingungen der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Vorüberlegungen: Die Durchführung von Produktions- und Instandhaltungsleistungen erfordert, wie in Kapitel 6 dargestellt, den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Ressourcen des Produktionssystems in Ressourcenkombinationen. Aufgrund der mit der Beschaffung und dem Betrieb verbundenen Kosten stehen die Ressourcen i. d. R. nur in begrenzter Anzahl zur Verfügung. Dies gilt neben Maschinen auch für mit hohen Investitionskosten verbundene Fertigungsmittel oder Instandhaltungswerkzeuge sowie für Mitarbeitende in der Fertigung bzw. Instandhaltung. Folglich ist der Einsatz dieser Ressourcen durch die Produktions- und Instandhaltungsplanung zu synchronisieren.

ALMEDER & ALMADA-LOBO (2011) stellen einen Ansatz für die Produktionsplanung in einem Produktionssystem aus parallelen Maschinen mit Synchronisation des Einsatzes von Fertigungsmitteln vor. Die Planung des Einsatzes erfolgt mittels der maschinenspezifischen Festlegung der Startzeitpunkte der Mikroperioden s sowie der Freigabezeitpunkte der Fertigungsmittel. Ein Fertigungsmittel muss sich für den gesamten Zeitraum der Herstellung eines Produktes an der Maschine befinden. Der gleichzeitige Einsatz eines Fertigungsmittels an den Maschinen im Produktionssystem ist nicht möglich. Der

7 Multikriterielles Optimierungsmodell

Ansatz von ALMEDER & ALMADA-LOBO (2011) ermöglicht neben der Synchronisation des Einsatzes von Fertigungsmitteln die Darstellung von reihenfolgeabhängigen Vorgängen der Produktion. Er dient als Ausgangsbasis des Optimierungsmodells zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung.

Nachfolgend werden die funktionalen Nebenbedingungen der integrierten Planung (NIP) dargestellt.

NIP.1 Ermittlung eindeutiger Startzeitpunkte und Längen der Planungsperioden: Grundlage für die Synchronisation des Einsatzes der Ressourcen im Produktionssystem ist die Ermittlung der Startzeitpunkte und der Dauer der jeweiligen Nutzung. Als wesentliche dispositive Ressourcen sind Maschinen zu modellieren und der Planungshorizont mittels Makroperioden t und Mikroperioden s zu unterteilen. Die Länge einer Mikroperiode s an einer Maschine soll die Dauer der stattfindenden Vorgänge und Leistungen repräsentieren. Folglich sind die Startzeitpunkte sowie die Längen der Mikroperioden s maschinenspezifisch festzulegen.

NIP.2 Definierte Reihenfolge der Planungsperioden: Zur Beschreibung der Abfolge der Vorgänge und Leistungen sowie zur Synchronisation der Ressourcen innerhalb des Produktionssystems sind die Reihenfolgen der Mikroperioden s der Makroperioden t zwischen den Maschinen eindeutig zu definieren.

NIP.3 Eindeutige Allokation und Abbildung der Aktivität von Leistung-Ressourcen-Befähigungen: Es sind die eindeutige Allokation und die Abbildung der Aktivität von Leistung-Ressourcen-Befähigungen in den Mikroperioden s der Makroperioden t zu gewährleisten. Der gleichzeitige Einsatz einer Ressource in verschiedenen Leistung-Ressourcen-Befähigungen ist auszuschließen. Des Weiteren soll eine Leistung ausschließlich in einem aktiven Zustand der Leistung-Ressourcen-Befähigung durchgeführt werden können. Die Durchführung einer Produktions- bzw. Instandhaltungsleistung kann nur dann erfolgen, wenn eine entsprechende Befähigung existiert.

NIP.4 Abbildung von Wechseln von Leistungen und Equipments: Es sind die Vorgänge der Wechsel von Leistungen, der Wechsel von Equipments sowie deren Kombination abzubilden. Der Vorgang des Wechsels von aktiven Leistung-Ressourcen-Kombinationen wird als Rüstvorgang definiert. Des Weiteren sind die bei Wechseln anfallenden Aufwände in Abhängigkeit von der Reihenfolge der aktiven Leistung-

Ressourcen-Kombinationen zu modellieren. Im Modell sind die Aufwände bzgl. Zeit und Kosten zu differenzieren. Eine Wechselmatrix von Leistungen und Equipments ist in Abbildung 7.3 dargestellt.

Wechselmatrix von Leistungen und Equipments										
Maschine m	Equipment e_2	$e=1$			$e=2, \dots, (E-1)$			$e=E$		
Equipment e_1	Leistung p_1	Leistung p_2								
		$p=1$	$p=2, \dots, (P-1)$	$p=P$	$p=1$	$p=2, \dots, (P-1)$	$p=P$	$p=1$	$p=2, \dots, (P-1)$	$p=P$
$e=1$	$p=1$	0	...	$A_{1,p,1,1}$	...	...	...	$A_{1,1,1,E}$	...	$A_{1,p,1,E}$
	$p=2, \dots, (P-1)$	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	$p=P$	$A_{p,1,1,1}$	...	0	...	...	...	$A_{p,1,1,E}$	...	$A_{p,p,1,E}$
$e=2, \dots, (E-1)$	1	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	$p=2, \dots, (P-1)$	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	$p=P$	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$e=E$	1	$A_{1,1,E,1}$	...	$A_{1,p,E,1}$	...	...	...	0	...	$A_{1,p,E,E}$
	$p=2, \dots, (P-1)$	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	$p=P$	$A_{p,1,E,1}$	...	$A_{p,p,E,1}$	...	...	...	$A_{p,1,E,E}$	...	0

Legende:

P: Leistung E: Equipment

$A_{p_1 p_2 e_1 e_2}^m$: Aufwand des Wechsels von Leistung p_1 zu p_2 oder Equipment e_1 zu e_2 oder deren Kombination an Maschine m

Abbildung 7.3: Wechselmatrix von Leistungen und Equipments an einer Maschine

NIP.5 Definierte Freigabe und Synchronisation des Einsatzes von

Equipments: Der Einsatz der Ressourcen des Produktionssystems ist zu synchronisieren. Für Maschinen kann dies implizit durch die eindeutige Allokation der Leistung-Ressourcen-Kombinationen gewährleistet werden. Die Equipments stellen die ortsflexiblen Ressourcen des Produktionssystems dar. In der betrieblichen Realität kann ein Equipment an mehreren Maschinen befähigt und folglich Element mehrerer Leistung-Ressourcen-Kombinationen sein. Es ist sicherzustellen, dass ein Equipment erst dann in einer anderen Leistung-Ressourcen-Kombination eingesetzt werden kann, wenn der vorherige Einsatz des Equipments abgeschlossen ist. Darüber hinaus ist der Einsatz eines Equipments zum gleichen Zeitpunkt in unterschiedlichen Leistung-Ressourcen-Kombinationen auszuschließen.

NIP.6 Abbildung der Bedarfe an Leistungen: Die Gliederung des Leistungsportfolios der Produktion in Zwischen- und Endprodukte erfordert die Modellierung einer Produktstruktur. Es gilt abzubilden, dass sich die Bedarfe an Zwischenprodukten aus den Leistungsvolumina der Herstellung der Endprodukte ergeben. Die Bedarfe an Endprodukten resultieren aus der Nachfrage der Kunden oder der Absatzmärkte. Die Bedarfe an Produkten können in der betrieblichen Realität von den in der jeweiligen Planungsperiode produzierten Leistungsvolumina oder den im Lager befindlichen Beständen erfüllt werden. Kann der Bedarf eines Endproduktes weder durch das Leistungsvolumen, den Lagerbestand oder deren Kombination erfüllt werden, tritt Lieferrückstand auf. Folglich sind bei Abbildung der Bedarfe an Leistungen außerdem Lagerbestände und Lieferrückstände abzubilden sowie die Materialflusserhaltung zu berücksichtigen. Die Gliederung des Leistungsportfolios der Instandhaltung erfordert die Modellierung der zeit- und zustandsorientierten Instandhaltungsleistungen. Für zeitorientierte Instandhaltungsleistungen existieren Bedarfszeitpunkte, welche im Modell abzubilden sind. Darüber hinaus kann eine zeitorientierte Instandhaltungsleistung im Vergleich zum Bedarfszeitpunkt vorzeitig oder verspätet durchgeführt werden. Dies ist im Modell unter Berücksichtigung der Leistungserhaltung zu modellieren. Die Bedarfe für zustandsorientierte Instandhaltungsleistungen resultieren aus dem Verschleißverlauf, welcher in Abhängigkeit von Nutzungsumfang und Intensität zu modellieren ist. Die Bedarfe für die Endprodukte sowie der zeitorientierten Instandhaltung werden als dynamisch und im Planungshorizont als bekannt angenommen.

NIP.7 Berücksichtigung von Vorgaben zur Sicherstellung des Betriebes: In Produktionssystemen können nicht planbare Ereignisse, z. B. Spontanausfälle von Produktionsressourcen, auftreten, welche zur Unterbrechung des Betriebes führen. Zur Absicherung der Lieferfähigkeit können seitens der Unternehmensführung Vorgaben zu Mindestbeständen von Produkten bestehen, welche in der Planung zu berücksichtigen sind.

NIP.8 Berücksichtigung von Kapazitätsrestriktionen: Die Kapazität des Lagers kann aufgrund von Restriktionen, z. B. einer maximal zur Verfügung stehenden Fläche oder einer maximalen Ladungsträgeranzahl, beschränkt sein. Diese Kapazitätsrestriktionen sind im Modell zu berücksichtigen.

NIP.9 Abbildung von Betriebsmodi: Eine Leistung-Ressourcen-Befähigung kann in verschiedenen Betriebsmodi betrieben werden, z. B. Normal- und Hochleistungsbetriebsmodus. Seitens der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung sind der Beginn und die Länge der Aktivität eines Betriebsmodus eindeutig festzulegen. Des Weiteren sind Wechsel von Betriebsmodi abzubilden.

NIP.10 Abbildung der Zustandsänderungen von Ressourcen durch

Leistungen: Es sind die Zustandsänderungen durch Produktions- und Instandhaltungsleistungen von Equipments und Maschinen mit zustandsorientierter Instandhaltungsstrategie zu berücksichtigen. Der Betrag der Zustandsänderung durch Produktionsleistungen ist abhängig von dem Leistungsvolumen und der spezifischen Verschleißrate je Einheit der aktiven Leistung-Ressourcen-Befähigung. In der vorliegenden Arbeit wird von einem ressourcenspezifischen, deterministischen, linearen Verschleiß ausgegangen. Des Weiteren sind die Zustandserhaltung, die Zustandsänderungen durch Instandhaltungsleistungen, ressourcenspezifische Zustandsparameter für die Durchführung von Instandhaltungsleistungen sowie Verschleißgrenzen zu modellieren.

NIP.11 Berücksichtigung der initialen Zustände der Ressourcen: Die in den vorherigen Planungsperioden stattgefundenen Leistungserstellungsprozesse können an den Ressourcen Verschleiß verursacht haben. Zu Beginn des Planungshorizontes sind die initial vorliegenden Zustände der Ressourcen zu berücksichtigen.

NIP.12 Berücksichtigung der technischen Restriktionen der Ressourcen:

In der betrieblichen Realität wird bei Anwendung der zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie i. d. R. ein Zustandswert definiert, bis zu dem eine Ressource in Produktionsleistungen eingesetzt und ab dem eine Instandhaltungsleistung durchgeführt werden soll. Darüber hinaus existiert oftmals ein Prozessfenster bis zu einem ressourcenspezifischen Grenzschädigungsbetrag bzw. einer Verschleißgrenze, in welcher der Einsatz der Ressource nicht angestrebt, aber prinzipiell weiterhin möglich ist. Der Einsatz einer Ressource über die spezifische Verschleißgrenze hinaus ist auszuschließen, da anderenfalls der sichere Betrieb nicht gewährleistet werden kann.

7.1.4 Zielsystem für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung

Das Zielsystem für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung soll Zielkriterien beider Planungsbereiche beinhalten, damit sie in der Planung integriert berücksichtigt werden können. Darüber hinaus ist das Zielsystem gemäß den Anforderungen aus der angewandten Wissenschaft (vgl. Abschnitt 3.1) allgemeingültig und anwendbar auf produzierende Unternehmen zu formulieren. Daraus folgt, dass kein vollständig fixiertes Zielsystem, sondern unter Anwendung der Goal-Programming-Methode (vgl. Abschnitt 5.2.2.2) ein auf den spezifischen Anwendungsfall adaptierbares Zielsystem zu modellieren ist. In den nachfolgenden Abschnitten erfolgen mit dem Ziel der Entwicklung des konzeptionellen Modells des Zielsystems die Identifikation und Spezifizierung der im Zielsystem zu betrachtenden strategischen Zielgrößen. Die Ableitung wurde in SCHREIBER ET AL. (2020) in ähnlicher Form vorgestellt. Die mathematischen Formeln des Zielsystems werden in Abschnitt 7.2.2 dargestellt.

7.1.4.1 Identifikation strategischer Zielgrößen der integrierten Planung

Produktionssysteme stellen keine unveränderlichen Systeme dar. Sie sind einem kontinuierlichen Wandel unterworfen, welcher mittels des Fabriklebenszyklus nach SCHENK ET AL. (2014, S. 151) beschrieben werden kann. Der Fabriklebenszyklus beinhaltet fünf Planungsphasen von Produktionssystemen, deren Rahmenbedingungen für eine integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung zu untersuchen sind. Die Planungsphasen eines Produktionssystems im Fabriklebenszyklus sind nicht als vollständig sequenziell anzusehen, sondern können sich teilweise überlappen (SCHENK ET AL. 2014, S. 150).

Die erste Planungsphase *Entwicklung* beinhaltet u. a. die Planungen für das Produkt, die Produktherstellungsprozesse sowie den Absatz. Die zweite Planungsphase *Aufbau* umfasst den Systembau und -test. Die beiden Phasen sind Fokus der Produktions- und Instandhaltungsprogrammplanung und sind folglich nicht Bestandteil des Betrachtungsbereiches (vgl. Abschnitt 1.4). Die dritte Phase *Anlauf* umfasst das Anfahren und das Hochlaufen des Produktionssystems mit dem Ziel, das Produktionssystem in den Normalbetrieb zu überführen. Seitens der integrierten Produktions- und Instandhaltungsleistungen sind in dieser Phase Einschränkungen bezüglich der verfügbaren Kapazitäten der Ressourcen des Produktionssystems zu berücksichtigen. In der vierten

Phase *Betrieb* erfolgt die eigentliche Systemnutzung. Der Einsatz der Ressourcen wird geplant, überwacht sowie Verbesserungen und Umbaumaßnahmen an den Ressourcen des Produktionssystems durchgeführt (SCHENK ET AL. 2014, S. 152). Die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung ist in dieser Phase für die Ermittlung der Leistungsreihenfolgen verantwortlich. Seitens der Instandhaltungsplanung sind für Ressourcen, welche sich am Ende des jeweiligen Lebenszyklus befinden, erhöhte Bedarfe an Instandhaltungsleistungen, z. B. Wartungen, anzunehmen. Es sind folglich Anpassungen an den zeitlichen Zyklen und Zustandsgrenzwerten vorzunehmen. Die fünfte Phase des *Abbaus* beinhaltet die Sanierung, Außerbetriebnahme und Verwertung der Ressourcen des Produktionssystems. In dieser Phase erfolgt i. d. R. nur noch eine im Volumen deutlich reduzierte oder keine Produktion. Eine integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung ist nicht erforderlich. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung vorwiegend in die Phase *Betrieb* einzuordnen ist. Die Rahmenbedingungen dieser Planungsphase sind bei der Ableitung der strategischen Zielgrößen der integrierten Planung zu berücksichtigen. Die Planungsphasen von Produktionssystemen sind in Abbildung 7.4 dargestellt.

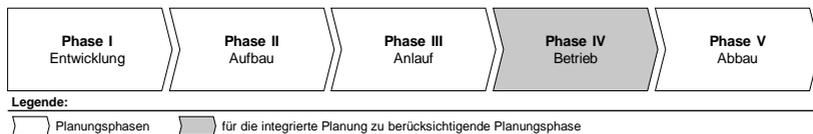


Abbildung 7.4: Planungsphasen von Produktionssystemen im Fabriklebenszyklus in Anlehnung an SCHENK ET AL. (2014, S. 151)

Den Ausgangspunkt der Identifikation strategischer Zielgrößen für das Zielsystem der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung stellt das Axiom dar, wonach das Ziel unternehmerischen Handelns und somit produzierender Unternehmen die Maximierung des Unternehmenserfolges ist (MOSER 2014, S. 17). Der Unternehmenserfolg ergibt sich aus dem Verkauf von Produkten, welche in der geforderten Qualität und zum gewünschten Zeitpunkt produziert werden. Folglich sind die Aktivitäten eines produzierenden Unternehmens zielgerichtet auf den nachhaltigen und langfristigen Unternehmenserfolg durch Kunden-/Marktorientierung auszurichten. Daraus leitet sich unmittelbar ab, dass die Produktion und Instandhaltung in den Zielbildungsprozess des Unternehmens einzubetten sind.

7 Multikriterielles Optimierungsmodell

Des Weiteren ist eine Analyse erforderlich, welchen Beitrag die Ressourcen eines Produktionssystems und die Leistungen von Produktion und Instandhaltung zum strategischen Unternehmenserfolg leisten können. Die Ermittlung von strategischen Erfolgsfaktoren ist Bestandteil der Erfolgsfaktorenforschung. Sie basiert auf der Annahme, dass lediglich eine geringe Anzahl an zentralen Faktoren existiert, die einen wesentlichen Einfluss auf den Erfolg oder Misserfolg eines Unternehmens haben (ALCALDE RASCH 2000, S. 37; GÖTTGENS 1996, S. 23–30). Strategische Erfolgsfaktoren ermöglichen das Erringen von Wettbewerbsvorteilen gegenüber der Konkurrenz und bestimmen somit den ökonomischen Erfolg eines Unternehmens (ALCALDE RASCH 2000, S. 36). Die zu erringenden Wettbewerbsvorteile müssen dabei drei Kriterien erfüllen: (1) sie müssen ein für den Kunden wichtiges Leistungsmerkmal betreffen, (2) sie müssen vom Kunden wahrgenommen werden können und (3) eine Dauerhaftigkeit aufweisen, d. h. von Wettbewerbern nicht schnell einholbar sein (SIMON 1988, S. 4). Darüber hinaus sichert die gezielte Verfolgung von strategischen Erfolgsfaktoren den nachhaltigen sowie langfristigen Unternehmenserfolg (KLENTNER 1995, S. 17).

ALCALDE RASCH (2000, S. 40) ermittelt Kosten, Zeit, Qualität und Flexibilität als branchenneutrale, strategische Erfolgsfaktoren produzierender Unternehmen. Diese Erfolgskriterien werden nachfolgend in Bezug auf die Erfüllung der drei Kriterien zur Erringung von Wettbewerbsvorteilen sowie auf ihre Anwendbarkeit in einer integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung untersucht.

Kosten: Aus Sicht des Kunden sind nicht die Kosten eines produzierenden Unternehmens, sondern der Preis eines Produktes am Markt das unmittelbar wahrgenommene Leistungsmerkmal (ALCALDE RASCH 2000, S. 40). Die Märkte für Produkte sind heutzutage i. d. R. Käufermärkte (GRABNER 2019, S. 10). Ein Käufermarkt ist durch einen Angebotsüberschuss gekennzeichnet (HUBERT 2019, S. 133). Die Preise für Güter und Dienstleistungen werden auf dem jeweiligen Käufermarkt bestimmt (HUBERT 2019, S. 134). Der auf dem jeweiligen Markt erlösbare Preis eines Produktes kann nicht durch eine integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung beeinflusst werden. Jedoch sind Kosten für ein produzierendes Unternehmen ein wichtiger Aspekt zur Erzielung eines Wettbewerbsvorteiles (ALCALDE RASCH 2000, S. 40; PORTER 1996, S. 62). Die Differenz zwischen dem am Markt erzielten Erlös und den im Zusammenhang mit der Produktion eines Produktes anfallenden Kosten bestimmt maßgeblich den wirtschaftlichen Überschuss (HUBERT 2019, S. 134). Die anfallenden Kosten bestimmen langfristig die untere Grenze des Preises eines Produktes, welcher am Markt erzielt werden muss,

um den Fortbestand des Unternehmens zu sichern (ALCALDE RASCH 2000, S. 40). Unternehmen mit einem Kostenniveau über dem Marktpreis können i. d. R. nicht langfristig am Markt bestehen (EMANS 1988, S. 129). Folglich stellen Kostenvorteile eines Unternehmens im Vergleich zum Wettbewerb einen strategischen Erfolgsfaktor dar (STEIN 1988, S. 400) und somit sind Kosten als Ziel im Zielsystem der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung zu berücksichtigen. Es gilt sowohl die in der Phase *Betrieb* eines Produktionssystems in der Produktion als auch der Instandhaltung anfallenden Kosten zu modellieren. Die finanziellen Größen der Investition, z. B. für neue Betriebsmittel, sind vorwiegend in den Planungsphasen *Entwicklung* und *Aufbau* zu berücksichtigen und folglich nicht Bestandteil des Zielsystems.

Zeit: Der strategische Erfolgsfaktor *Zeit* ist in den *Zeitwettbewerb hinsichtlich der Einführung neuer Produkte und Technologien* sowie den *Zeitwettbewerb der Reaktionsgeschwindigkeit auf die Kundennachfrage nach bestehenden Produkten* zu unterscheiden (THUN 2002, S. 33–34). Sie werden auch als Produktentwicklungs- und Produktentstehungszyklen bezeichnet. Bei neuen Produkten und Technologien besteht ein Trend zu sich verkürzenden Produktlebenszyklen (SCHWELLBACH 2004, S. 93–94). Dadurch reduziert sich die Zeitdauer, in welcher durch den Absatz von Produkten das Marktpotenzial auszuschöpfen und ein angemessener Gewinn zu erreichen ist (SCHWELLBACH 2004, S. 93–94; GLASER 2000, S. 177). Die Entwicklungszeit von Produkten und Technologien ist weitestgehend von den Entwicklungsprozessen eines Unternehmens abhängig und kann nicht maßgeblich durch eine integrierte Planung beeinflusst werden. Im Zeitwettbewerb der Reaktionsgeschwindigkeit auf die Kundennachfrage haben produzierende Unternehmen versucht, Vorteile durch die Verkürzung der Durchlauf- und Lieferzeiten von Kundenaufträgen zu erzielen (VOIGT 2000, S. 197). Insbesondere die Durchlaufzeit eines Auftrages im Produktionssystem ist als Indikator für die Leistungsfähigkeit gegenüber dem Markt bedeutsam (EIDENMÜLLER 1991, S. 236). Folglich ist seitens der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung das Ziel der Minimierung der Durchlaufzeit der Aufträge im Zielsystem zu modellieren.

Qualität: Qualität ist definiert als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“ (DIN EN ISO 9000). Nach ALCALDE RASCH (2000, S. 41) werden die *Produktqualität* und *Qualität der Leistungserstellungsprozesse* eines Unternehmens unterschieden. In der vorliegenden Arbeit wird die Prämisse getroffen, dass ein produzierendes Unternehmen ausschließlich Produkte ausliefert, welche den Anforderungen der Produktqualität genügen. Maßnahmen zur Sicherung und Verbes-

7 Multikriterielles Optimierungsmodell

serung der Produktqualität sind dem Qualitätsmanagement zuzuordnen und folglich nicht im Zielsystem zu berücksichtigen. Die Qualität der Leistungserstellungsprozesse wird aus Kundensicht maßgeblich durch die Einhaltung der Liefertermine, die Lieferzuverlässigkeit, wahrgenommen und ist folglich in das Zielsystem zu integrieren. Die Qualität der Leistungserstellungsprozesse der Instandhaltung ist aus Kundensicht nicht unmittelbar sichtbar. In der vorliegenden Arbeit werden die Annahmen getroffen, dass Instandhaltungsleistungen fehlerfrei ausgeführt werden und das zum Bedarfszeitpunkt durchgeführte Instandhaltungsleistungen die Qualität der Leistungserstellungsprozesse absichern. Eine verspätete Durchführung einer Instandhaltungsleistung führt dazu, dass eine Ressource über die geplante Betriebszeit hinaus eingesetzt oder ein Zustandsparameter ungewollt überschritten wird. Eine vorzeitige Durchführung einer Instandhaltungsleistung bewirkt, dass der Verschleißvorrat der Ressource nicht optimal ausgenutzt wird. Folglich führen Abweichungen der Instandhaltungsleistungen von den Bedarfszeitpunkten zu erhöhten Kosten und sind entsprechend im Zielsystem in den Kosten zu berücksichtigen. Zusammenfassend ist im Zielsystem als Zielgröße der Qualität die Lieferzuverlässigkeit zu modellieren. Es besteht dabei eine Interdependenz zum strategischen Erfolgsfaktor Zeit, da eine geringe Durchlaufzeit für den Kunden nur dann einen Nutzen generiert, wenn die Produkte zum gewünschten Liefertermin bereitgestellt werden (SCHWELLBACH 2004, S. 96; THUN 2002, S. 54–55).

Flexibilität: Flexibilität beinhaltet in Bezug auf Unternehmen die reaktive Komponente der Anpassungsfähigkeit und die proaktive Komponente der Beweglichkeit und Änderungsfähigkeit (KALUZA 1996, S. 257). In der Wissenschaft und Forschung wurden umfangreiche Flexibilitätstypen und -dimensionen entwickelt. In der vorliegenden Arbeit kommt die Unterscheidung der Flexibilität nach SEEBACHER (2013) in *Supply-Chain-Flexibilität* und *produktionswirtschaftliche Flexibilität* zur Anwendung. Die *Supply-Chain-Flexibilität* bezieht sich auf die Anpassungsfähigkeit der Zulieferer-Abnehmer-Beziehungen, ohne dass sich Leistungs- oder Kosteneinbußen oder deren Kombination ergeben (DAS & ABDEL-MALEK 2003, S. 172). *Produktionswirtschaftliche Flexibilität* bezeichnet die Fähigkeit der Produktion, „[...] veränderte Produktionsvolumina zu beherrschen und eine veränderliche Produktvielfalt zu fertigen“ (SEEBACHER 2013, S. 10). Die produktionswirtschaftliche Flexibilität ist für produzierende Unternehmen von besonderer Bedeutung (ALCALDE RASCH 2000, S. 43). Die Anpassung der Zulieferer-Abnehmer-Beziehungen ist nicht Bestandteil einer integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung (vgl. Abschnitt 1.4). Zur Sicherung einer hohen produktionswirtschaftlichen Flexibilität ist es notwendig, die verfügbaren

Ressourcen in der Produktion effizient und anforderungsgerecht einzusetzen (SEEBA-CHER 2013, S. 11; DUGUAY ET AL. 1997, S. 1188). Dies entspricht dem Verantwortungsbereich der Produktions- und Instandhaltungsplanung. Folglich ist die produktionswirtschaftliche Flexibilität im Zielsystem zu modellieren.

Die im Zielsystem des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung zu berücksichtigenden Zielgrößen sind in Abbildung 7.5 zusammenfassend dargestellt.



Abbildung 7.5: Zielgrößen der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

7.1.4.2 Spezifizierung der Zielgrößen der integrierten Planung

Die Zielgrößen der integrierten Planung müssen zur Modellierung im mathematischen Modell detailliert werden. Die Spezifizierung der Zielgrößen Kosten, Zeit, Qualität und Flexibilität wird nachfolgend dargestellt.

Kosten: In der Fachliteratur existiert bisher keine Gliederung der Kosten in Produktionssystemen aus Sicht einer integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung. Es ist eine geeignete Modellierung zu entwickeln.

WIENDAHL (2010, S. 252) unterscheidet in der PPS die Prozesskosten sowie die Kapitalbindungs- und Wagniskosten. Die Prozesskosten entstehen bei der Auftragsabwicklung sowie den logistischen Prozessen des Transportes und der Lagerung (WIENDAHL 2010, S. 252). Die Kapitalbindungs- und Wagniskosten beinhalten die finanziellen Größen der Kapitalbindung sowie die Risiken von verspäteter oder fehlerhafter Lieferung (WIENDAHL 2010, S. 252, S. 289).

BEHRENBECK (1994, S. 24) gliedert die Instandhaltungskosten in aktivitäts- und bereichsbezogene Kosten. Die aktivitätsbezogenen Kosten fallen im Zusammenhang

7 Multikriterielles Optimierungsmodell

von Instandhaltungsleistungen an bzw. können ihnen zugeordnet werden (BEHRENBECK 1994, S. 24). Bereitschaftsbezogene Kosten umfassen die Kosten für die Verwaltung, Leitung sowie zur Erhaltung der Leistungskapazität der Instandhaltungsabteilung (BEHRENBECK 1994, S. 24). BLÜMEL (2011, S. 26) und ENGELS-LINDEMANN (2003, S. 23) unterscheiden des Weiteren die Personal-, Material- und Fremdleistungskosten.

Aus dem übergeordneten Ziel der Ermittlung von effizienten Leistungsreihenfolgen folgt, dass die Produktions- und Instandhaltungskosten prozess- bzw. aktivitätsbezogen zu modellieren sind. Die Kosten zur Durchführung einer Leistungseinheit sind spezifisch für jede Leistung-Ressourcen-Befähigung abzubilden und beinhalten alle anfallenden Personalkosten sowie Materialkosten für Ersatzteile, Hilfs- und Betriebsstoffe. Sie sind folglich linear zum Leistungsvolumen. Die Kosten zum Wechsel der Leistungen und Equipments zur Durchführung der Leistungsreihenfolgen sind gemäß Abschnitt 7.1.3 reihenfolgeabhängig zu modellieren. Des Weiteren sind die anfallenden Kosten der Wechsel von Betriebsmodi sowie Transportkosten für Ressourcen abzubilden. Gemäß dem Betrachtungsbereich (vgl. Abschnitt 1.4) werden nur unternehmensinterne Ressourcen eines Produktionssystems betrachtet, wodurch keine Fremdleistungskosten zu betrachten sind. Bereitschaftsbezogene Kosten werden vorwiegend in der Arbeitsplanung determiniert. Sie sind folglich nicht zu berücksichtigen.

Die Kapitalbindungskosten des Lagerbestandes der Zwischen- und Endprodukte entstehen aus im Vergleich zum Bedarfszeitpunkt vorab durchgeführten Leistungserstellungsprozessen. Die vorab durchgeführten Instandhaltungsleistungen führen zu zusätzlichen Kosten, z. B. durch die suboptimale Ausnutzung des Verschleißvorrates oder Express Transporte von Ersatzteilen. Diese Kosten werden als Vorlaufkosten zusammengefasst, sind perioden- und leistungsspezifisch sowie proportional zum Volumen. Die Wagniskosten der PPS nach WIENDAHL (2010, S. 252) werden in der Instandhaltung oftmals als Ausfallfolgekosten bezeichnet und können für das produzierende Unternehmen u. a. aus Kosten für Nacharbeit, entgangenen Deckungsbeiträgen sowie Strafzahlungen aufgrund nicht eingehaltener Liefertermine/-mengen resultieren (ENGELS-LINDEMANN 2003, S. 23). Analog ergeben sich bei verspäteter Durchführung von Instandhaltungsleistungen zusätzliche Ausfallrisiken der Ressourcen, woraus Stillstandkosten resultieren können. Die Kosten einer, im Vergleich zum Bedarfszeitpunkt, verspäteten Durchführung des Leistungserstellungsprozesses werden in der vorliegenden Arbeit als Strafkosten zusammengefasst. Sie sind perioden- und leistungsspezifisch sowie in Abhängigkeit zum Volumen zu modellieren.

Zeit: Die Durchlaufzeit von Aufträgen in Produktionssystemen ergibt sich nach WIENDAHL (2010, S. 263) als Summe der Liegezeiten zwischen Arbeitsvorgängen, den Transportzeiten, den Liegezeiten vor der Bearbeitung, den Rüstzeiten sowie den Bearbeitungszeiten der Arbeitsvorgänge. Die arbeitsvorgangsbezogene Durchlaufzeit eines Produktionsauftrages ist in Abbildung 7.6 dargestellt.

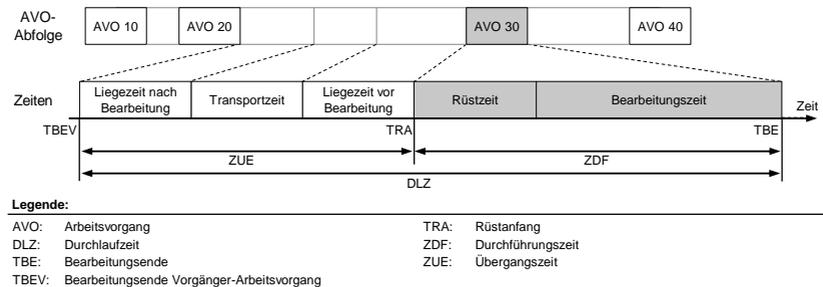


Abbildung 7.6: *Arbeitsvorgangsbezogene Durchlaufzeit eines Produktionsauftrages in Produktionssystemen in Anlehnung an WIENDAHL (2010, S. 263)*

Aus Sicht der integrierten Planung ist darüber hinaus der Einfluss der Instandhaltungsleistungen zu berücksichtigen. Es wird die Annahme getroffen, dass während der Durchführung einer Instandhaltungsleistung an bzw. unter Einsatz einer Ressource diese nicht gleichzeitig für Produktionsleistungen eingesetzt werden kann. Der Einsatz der Ressource für Produktionsleistungen ist erst wieder nach Abschluss der Instandhaltungsleistung möglich. Folglich beeinflussen die Instandhaltungsleistungen die Durchlaufzeit von Aufträgen in Produktionssystemen. Die Liegezeiten zwischen Arbeitsvorgängen ergeben sich indirekt aus der Synchronisation des Einsatzes von Ressourcen sowie der Abfolge der Leistungsreihenfolgen. Eine explizite Modellierung ist folglich nicht erforderlich. Die Transportzeiten stellen seitens der Logistik bedingte Zeitanteile dar und können durch eine integrierte Planung nicht maßgeblich beeinflusst werden. Sie sind daher nicht zu modellieren. Die Rüstzeiten stellen die Wechselvorgänge von Leistungen und Equipments sowie der Betriebsmodi dar. Sie sind proportional zur Anzahl der Wechsel im Planungshorizont und abhängig von den genutzten Ressourcen sowie der Reihenfolge des Einsatzes. Die Bearbeitungszeiten der Arbeitsvorgänge der Produktionsleistungen sowie die Durchführungszeiten für Instandhaltungsleistungen sind als Leistungszeiten zusammenzufassen. Sie sind in Abhängigkeit der Leistung, der Ressourcenkombination sowie proportional zum Leistungsvolumen zu modellieren.

7 Multikriterielles Optimierungsmodell

Qualität: Die Liefertreue als Zielgröße der Qualität der Leistungserstellungsprozesse „[...] muss die Wahrscheinlichkeit ausdrücken, dass Produkte zeit- und mengengetreu geliefert werden“ (SAGER 2019, S. 85) und bezieht sich der Kunden- bzw. Marktorientierung folgend auf die Endprodukte des Leistungsportfolios der Produktion. Die Liefertreue eines Endproduktes ist periodenspezifisch zu ermitteln. Darüber hinaus sind in Abhängigkeit von der Produktstruktur eines Endproduktes ebenso die Lagerbestände der erforderlichen Zwischenprodukte zu berücksichtigen. Des Weiteren beeinflussen die Zustände der Ressourcen des Produktionssystems die Wahrscheinlichkeit der Durchführbarkeit von Produktionsleistungen zur Herstellung der Produkte. Folglich können die Zustände einen Einfluss auf die zeit- und mengengetreue Lieferung der Produkte haben. Es wird die Annahme getroffen, dass eine Ressource in einem neuwertigen Zustand ohne Verschleiß stets eine Produktionsleistung durchführen kann. Ihr Beitrag zur Liefertreue wird mit dem Wert eins bewertet. Die Zunahme des Verschleißes führt zu Einschränkungen des möglichen Beitrages einer Ressource zur Liefertreue und führt folglich zu einer Abnahme des Wertes, den sie für die Liefertreue des Produktes beiträgt. Befindet sich eine Ressource in einem Zustand, der die Durchführung einer Instandhaltungsleistung erfordert, steht sie nicht zur Durchführung von Produktionsleistungen zur Verfügung und der Beitrag zur Liefertreue ist mit dem Wert null zu bewerten. Zusammenfassend ist die Liefertreue abhängig von den verfügbaren Lagerbeständen des Leistungsportfolios der Produktion sowie abhängig von den Zuständen der Ressourcen des Produktionssystems, welche zur Durchführung der Produktionsleistungen benötigt werden, zu modellieren. Zur Sicherstellung der zeit- und mengengetreuen Lieferung ist die Liefertreue eines Produktes als geringster Wert der verfügbaren Lagerbestände und der Zustände der erforderlichen Ressourcen zu ermitteln.

Flexibilität: Die produktionswirtschaftliche Flexibilität nach SEEBACHER (2013, S. 10) beinhaltet die Fähigkeit der Produktion, veränderte Produktionsvolumina zu beherrschen. Aus Sicht der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung ist die Ermittlung der über den Bedarf hinausgehenden Anzahl an Endprodukten im Planungshorizont als Flexibilität von Bedeutung. Im Produktionssystem existiert oftmals eine Vielzahl an Leistung-Ressourcen-Befähigungen, welche für zusätzliche Produktionsleistungen eingesetzt werden können. Aus Kundensicht sind i. d. R. nur zusätzliche Produktionsvolumina für die Endprodukte relevant, welche im Planungshorizont in der Makroperiode t Bedarfe größer null haben. Folglich sind nur die Leistung-Ressourcen-Befähigungen zu berücksichtigen, welche zur Produktion von zusätzlichen

Produktionsvolumina dieser Endprodukte dienen. Zur korrekten Ermittlung der produktionswirtschaftlichen Flexibilität sind des Weiteren die existierenden Betriebsmodi der Leistung-Ressourcen-Befähigungen sowie die Produktstruktur des Leistungsportfolios der Produktion zu berücksichtigen. Die Anpassung des Betriebsmodus einer Leistung-Ressourcen-Befähigung ermöglicht eine flexible Reaktion auf sich verändernde Bedarfe ohne umfangreiche Maßnahmen im Produktionssystem. Bei der Ermittlung der maximalen zusätzlichen Produktionsvolumina ausschließlich der schnellste Betriebsmodus der Leistung-Ressourcen-Befähigungen zu berücksichtigen. In Abhängigkeit der jeweiligen Produktstruktur kann die über den Bedarf hinausgehende Anzahl an Endprodukten durch Zwischenprodukte begrenzt werden. Es gilt, dass das geringere zusätzliche Produktionsvolumen von Zwischen- und Endprodukt einer Produktstruktur die Flexibilität des jeweiligen Endproduktes begrenzt.

Mit der Spezifizierung der Zielgrößen des Zielsystems ist die Modellbildung des multi-kriteriellen Optimierungsmodells zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung abgeschlossen. Nachfolgend wird das mathematische Modell vorgestellt.

7.2 Mathematisches Modell zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Die Vorstellung der mathematischen Formulierungen des Modells erfolgt anhand der in Abbildung 7.7 dargestellten Struktur. Es werden die mathematischen Formulierungen der Nebenbedingungen in Abschnitt 7.2.1 und die des Zielsystems in Abschnitt 7.2.2 vorgestellt. Zur Vermeidung von Wiederholungen wird nachfolgend auf die Darstellung gleichartiger mathematischer Formulierungen des Modells verzichtet. Die zugehörigen mathematischen Formulierungen sind im Anhang C dargestellt. Eine Übersicht der Notation befindet sich im Abschnitt Modellnotation.

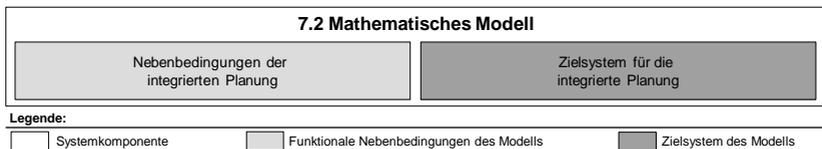


Abbildung 7.7: Struktur des Abschnittes mathematisches Modell zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

7.2.1 Nebenbedingungen der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Der nachfolgende Abschnitt dient der mathematischen Formulierung der funktionalen Nebenbedingungen der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung. Sie werden entsprechend der Struktur der Modellbildung im Einzelnen dargestellt.

NIP.1 Ermittlung eindeutiger Startzeitpunkte und Längen der Planungsperioden: Die Gleichung (7.1) definiert, dass der Startzeitpunkt $fSTAS_{t,sm}$ der ersten Mikroperiode ($s = 1$) einer Makroperiode t an der Maschine m der Zeitpunkt null ist.

$$fSTAS_{t,sm} \equiv 0 \quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s = 1\}, m \in M \quad (7.1)$$

Der Startzeitpunkt $fSTAS_{t,sm}$ einer Mikroperiode ($s > 1$) an der Maschine m ergibt sich nach Gleichung (7.2) aus der Summe des Startzeitpunktes $fSTAS_{t,(s-1)m}$ und der Länge der vorherigen Mikroperiode ($s-1$). Die Länge einer Mikroperiode s wird separat für jede Maschine m berechnet. Sie ergibt sich aus der Summe der Zeit für den Wechsel von Leistungen und Equipments, der Zeit für den Wechsel der Betriebsmodi, der Zeit der Leistung sowie der Leerzeit. Die Zeit für den Wechsel von Leistungen und Equipments berechnet sich als Summation der Multiplikationen der Entscheidungsvariable $bCHPE_{t,(s-1)m,p_1,p_2,e_1,e_2}$ sowie der Wechselzeit $tSET_{mp_1,p_2,e_1,e_2}$ und die Wechselzeit für Betriebsmodi als Summation der Produkte der Entscheidungsvariable $bCHB_{t,(s-1)m,b_1,b_2}$ sowie der Vorgangszeit $tCHB_{mb_1,b_2}$. Die Leistungszeit ergibt sich aus der Summation der Multiplikationen des Leistungsvolumens $iPEPV_{t,(s-1)p_2,l,m,e_2,b_2}$ und der Leistungszeit $tPEP_{p_2,l,m,e_2,b_2}$. Die Leerzeit $fFCAP_{t,(s-1)m}$ kann zur Synchronisation des Einsatzes des Equipments e benötigt werden.

$$\begin{aligned} fSTAS_{t,sm} \equiv & fSTAS_{t,(s-1)m} \\ & + \sum_{(m,p_1,p_2,e_1,e_2) \in MPPEE} (tSET_{mp_1,p_2,e_1,e_2} \cdot bCHPE_{t,(s-1)m,p_1,p_2,e_1,e_2}) \\ & + \sum_{(m,b_1,b_2) \in MBB} (tCHB_{mb_1,b_2} \cdot bCHB_{t,(s-1)m,b_1,b_2}) \\ & + \sum_{(p_2,l,m,e_2,b_2) \in PLMEB} (tPEP_{p_2,l,m,e_2,b_2} \cdot iPEPV_{t,(s-1)p_2,l,m,e_2,b_2}) \\ & + fFCAP_{t,(s-1)m} \quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s > 1\}, m \in M \quad (7.2) \end{aligned}$$

NIP.2 Definierte Reihenfolge der Planungsperioden: Zur Sicherstellung einer definierten Reihenfolge der Mikroperioden s der Makroperioden t unterschiedlicher Maschinen ($m_1 \neq m_2$) dienen die Ungleichung (7.3) und Gleichung (7.4). Die binäre Entscheidungsvariable $bFOLS_{ts_1m_1s_2m_2}$ nimmt nach Ungleichung (7.3) den Wert eins an, wenn die Startzeit $fSTAS_{ts_1m_1}$ der Mikroperiode s_1 der Maschine m_1 nach der Startzeit $fSTAS_{ts_2m_2}$ der Mikroperiode s_2 der Maschine m_2 liegt. Die Gleichung (7.4) stellt sicher, dass nur eine der binären Entscheidungsvariablen $bFOLS_{ts_1m_1s_2m_2}$ und $bFOLS_{ts_2m_2s_1m_1}$ den Wert eins annehmen kann, wodurch die Reihenfolge der Planungsperioden eindeutig definiert ist.

$$bFOLS_{ts_1m_1s_2m_2} \geq fSTAS_{ts_1m_1} - fSTAS_{ts_2m_2} \quad \forall t \in T, (s_1, s_2) \in S, (m_1, m_2) \in \{M \mid m_1 \neq m_2\} \quad (7.3)$$

$$bFOLS_{ts_1m_1s_2m_2} + bFOLS_{ts_2m_2s_1m_1} \equiv 1 \quad \forall t \in T, (s_1, s_2) \in S, (m_1, m_2) \in \{M \mid m_1 \neq m_2\} \quad (7.4)$$

NIP.3 Eindeutige Allokation und Abbildung der Aktivität von Leistung-

Ressourcen-Befähigungen: Die Summe der binären Entscheidungsvariable $bUSE_{tsplmeb}$ muss nach Gleichung (7.5) an der Maschine m in jeder Mikroperiode s der Makroperiode t den Wert eins annehmen, d. h. eine Leistung-Ressourcen-Befähigung eindeutig allokiert sein.

$$\sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB} bUSE_{tsplmeb} \equiv 1 \quad \forall t \in T, s \in S, m \in M \quad (7.5)$$

Die Ungleichung (7.6) stellt sicher, dass ein Equipment e nicht in mehr als einer Leistung-Ressourcen-Befähigung aktiv ist. Die Summe aller binären Entscheidungsvariablen $bUSE_{tsplmeb}$ muss für alle Mikroperioden s in den Makroperioden t kleiner oder gleich dem Wert eins sein. Im realen Betrieb eines Produktionssystems können sich darüber hinaus Ressourcen in einem wartenden Zustand, ungerüsteten Zustand oder in einem wartenden und ungerüsteten Zustand befinden. Der wartende Zustand wird durch die Allokation einer virtuellen Leistung ($p = 1$) modelliert und ist zur Bestimmung eindeutiger Leistungsreihenfolgen zu berücksichtigen. Der ungerüstete Zustand wird durch die Allokation des Equipments ($e = 1$) abgebildet, welches nachfolgend als virtuelles

7 Multikriterielles Optimierungsmodell

Equipment bezeichnet wird. Im Fall der ortsflexiblen Instandhaltungsleistungen kann in Abhängigkeit der betrachteten Ressourcen das virtuelle Equipment den Zustand repräsentieren, dass sich Instandhaltungsressourcen vor oder nach einer Instandhaltungsleistung nicht am Ort des Instandhaltungsobjektes befinden. Eine Limitierung der Allokation des virtuellen Equipments ist nicht erforderlich, da sich mehrere Ressourcen im Produktionssystem gleichzeitig in diesem Zustand befinden können.

$$\sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB} bUSE_{tsplmeb} \leq 1 \quad \forall t \in T, s \in S, e \in \{E \mid e > 1\} \quad (7.6)$$

Eine Leistung p kann nach Ungleichung (7.7) nur durchgeführt werden, wenn die binäre Entscheidungsvariable $bUSE_{tsplmeb}$ den Wert eins annimmt, d. h. die Leistung-Ressourcen-Kombination aktiv ist. Des Weiteren kann die zur Durchführung der Leistung benötigte Zeit, welche sich aus Leistungsvolumen $iPEPV_{plmeb}$ und der für eine Leistungseinheit erforderlichen Zeit $tPEP_{plmeb}$ ergibt, die maximale Länge der Mikroperiode s der Makroperiode t nicht überschreiten. Die maximale Länge ist auf den Betrag eins normiert. Das Leistungsvolumen $iPEPV_{tsplmeb}$ kann nach Ungleichung (7.8) nur dann einen Wert größer null annehmen, wenn die Durchführung der Leistung mittels des Parameters $befPEP_{plmeb}$ befähigt ist.

$$bUSE_{tsplmeb} \geq tPEP_{plmeb} \cdot iPEPV_{plmeb} \quad \forall t \in T, s \in S, (p,l,m,e,b) \in PLMEB \quad (7.7)$$

$$iPEPV_{tsplmeb} \leq BigM \cdot befPEP_{plmeb} \quad \forall t \in T, s \in S, (p,l,m,e,b) \in PLMEB \quad (7.8)$$

NIP.4 Abbildung von Wechseln von Leistungen und Equipments: Der Wechsel von Leistung p_1 zu Leistung p_2 oder von Equipment e_1 zu Equipment e_2 oder deren Kombination an einer Maschine m wird durch die binäre Entscheidungsvariable $bCHPE_{tsmp_1p_2e_1e_2}$ repräsentiert. Sie nimmt nach Ungleichung (7.9) und Ungleichung (7.10) den Wert eins an, wenn an einer Maschine m ein Wechsel von einer in der vorherigen Mikroperiode $(s-1)$ aktiven Leistung-Ressourcen-Kombination $bUSE_{t(s-1)p_1l_1m_1b_1}$ zu einer anderen in Mikroperiode s aktiven Leistung-Ressourcen-Kombination $bUSE_{tsp_2l_2m_2b_2}$ stattfindet. Findet kein Wechsel von Leistungen und Equipments an einer Maschine m statt, dann nimmt die binäre Entscheidungsvariable $bCHPE_{tsmp_1p_2e_1e_2}$ nach Gleichung (7.11) den Wert null an.

$$\begin{aligned}
 & bCHPE_{tsmp_1p_2e_1e_2} \geq \\
 & \sum_{(p_1,l_1,m,e_1,b_1) \in PLMEB} bUSE_{t(s-1)p_1l_1me_1b_1} + \sum_{(p_2,l_2,m,e_2,b_2) \in PLMEB} bUSE_{tsp_2l_2me_2b_2} - 1 \\
 & \forall t \in T, s \in \{S \mid s > 1\}, (p_1, m, e_1 \wedge p_2, m, e_2) \in \{PME \mid p_1 \neq p_2 \vee e_1 \neq e_2\}
 \end{aligned} \tag{7.9}$$

$$\begin{aligned}
 & bCHPE_{tsmp_1p_2e_1e_2} \leq \\
 & \frac{1}{2} \cdot \left(\sum_{(p_1,l_1,m,e_1,b_1) \in PLMEB} bUSE_{t(s-1)p_1l_1me_1b_1} + \sum_{(p_2,l_2,m,e_2,b_2) \in PLMEB} bUSE_{tsp_2l_2me_2b_2} \right) \\
 & \forall t \in T, s \in \{S \mid s > 1\}, (p_1, m, e_1 \wedge p_2, m, e_2) \in \{PME \mid p_1 \neq p_2 \vee e_1 \neq e_2\}
 \end{aligned} \tag{7.10}$$

$$\begin{aligned}
 & bCHPE_{tsmp_1p_2e_1e_2} \equiv 0 \\
 & \forall t \in T, s \in S, (p_1, m, e_1 \wedge p_2, m, e_2) \in \{PME \mid p_1 = p_2 \wedge e_1 = e_2\}
 \end{aligned} \tag{7.11}$$

Die Ungleichungen (7.9) und (7.10) müssen für die erste Mikroperiode ($s = 1$) der Makroperiode ($t > 1$) sowie für die erste Mikroperiode ($s = 1$) der ersten Makroperiode ($t = 1$) abgewandelt werden. Die zugehörigen mathematischen Formulierungen sind im Anhang C in den Formeln (C.1) bis (C.4) dargestellt.

Des Weiteren kann in einer Mikroperiode s einer Makroperiode t an einer Maschine m maximal ein Wechsel von Leistungen und Equipments erfolgen (vgl. Ungleichung (7.12)).

$$\sum_{(m,p_1,p_2,e_1,e_2) \in MPPEE} bCHPE_{tsmp_1p_2e_1e_2} \leq 1 \quad \forall t \in T, s \in S, m \in M \tag{7.12}$$

Aus modellierungstechnischen Gründen muss zur richtigen Abbildung des Wechsels von Leistungen und Equipments das Leistungsvolumen $iPEPV_{tsplmeb}$ in der ersten Mikroperiode ($s = 1$) der Makroperiode t den Wert null annehmen (vgl. Gleichung (7.13))

$$iPEPV_{tsplmeb} \equiv 0 \quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s = 1\}, (p, l, m, e, b) \in PLMEB \tag{7.13}$$

NIP.5 Definierte Freigabe und Synchronisation des Einsatzes von

Equipments: Die Freigabe eines Equipments e_1 an einer Maschine m erfolgt, wenn der Wechsel auf das Equipment e_2 vollständig vollzogen ist. Der Freigabezeitpunkt $fRELE_{tsm}$ eines Equipments e entspricht nach Ungleichung (7.14) dem Startzeitpunkt $fSTAS_{t(s+1)m}$ der nachfolgenden Mikroperiode $(s+1)$ sowie der Wechselzeit von Leistungen und Equipments.

$$\begin{aligned}
 fRELE_{tsm} &\equiv fSTAS_{t(s+1)m} \\
 &+ \sum_{(m,p_1,p_2,e_1,e_2) \in MPPEE} (tSET_{mp_1p_2e_1e_2} \cdot bCHPE_{t(s+1)mp_1p_2e_1e_2}) \\
 &\quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s < s^{max}\}, m \in M \quad (7.14)
 \end{aligned}$$

Die Ungleichung (7.14) muss für die letzte Mikroperiode ($s = s^{max}$) einer Makroperiode t angepasst werden. Der Freigabezeitpunkt $fRELE_{tsm}$ ist nach Gleichung (7.15) gleich der Summe des Startzeitpunktes der Mikroperiode, der Zeit für Wechsel der Leistungen und Equipments, der Zeit für den Wechsel der Betriebsmodi, der Leistungszeit sowie der Leerzeit. Darüber hinaus darf der Freigabezeitpunkt die zur Verfügung stehende maximale Kapazität cap_m und die vorgegebene Planbelegungszeit pbz_{mt} der Maschine m nicht überschreiten (vgl. Gleichung (7.16)).

$$\begin{aligned}
 fRELE_{tsm} &\equiv fSTAS_{tsm} \\
 &+ \sum_{(m,p_1,p_2,e_1,e_2) \in MPPEE} (tSET_{mp_1p_2e_1e_2} \cdot bCHPE_{tsm p_1p_2e_1e_2}) \\
 &+ \sum_{(m,b_1,b_2) \in MBB} (tCHB_{mb_1b_2} \cdot bCHB_{tsm b_1b_2}) \\
 &+ \sum_{(p_2,l,m,e_2,b_2) \in PLMEB} (tPEP_{p_2lme_2b_2} \cdot iPEPV_{tsp_2lme_2b_2}) + fFCAP_{tsm} \\
 &\quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s = s^{max}\}, m \in M \quad (7.15)
 \end{aligned}$$

$$fRELE_{tsm} \equiv cap_m \cdot pbz_{mt} \quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s = s^{max}\}, m \in M \quad (7.16)$$

Zur definierten Freigabe von Equipments muss des Weiteren die Reihenfolge der Freigabe des Equipments sichergestellt werden. Der Freigabezeitpunkt $fRELE_{tsm}$ eines

Equipments e in der Mikroperiode s der Makroperiode t muss größer oder gleich dem Freigabezeitpunkt $fRELE_{t(s-1)m}$ der vorherigen Mikroperiode $(s-1)$ der Makroperiode t sein (vgl. Ungleichung (7.17)).

$$fRELE_{tsm} \geq fRELE_{t(s-1)m} \quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s > 1\}, m \in M \quad (7.17)$$

Die Synchronisation des Einsatzes eines Equipments e ist erforderlich, wenn das Equipment e in der Mikroperiode s_1 sowie Mikroperiode s_2 aktiv ist und die Mikroperioden aufeinander folgen. Nehmen die binären Entscheidungsvariablen $bFOLS_{ts_1m_1s_2m_2}$, $bUSE_{ts_1p_1l_1m_1eb_1}$ und $bUSE_{ts_2p_2l_2m_2eb_2}$ in Ungleichung (7.18) den Wert eins an, muss der Startzeitpunkt $fSTAS_{ts_1m_1}$ der Mikroperiode s_1 größer oder gleich dem Freigabezeitpunkt $fRELE_{ts_2m_2}$ des Equipments e sein.

$$\begin{aligned} fSTAS_{ts_1m_1} &\geq fRELE_{ts_2m_2} \\ &- (3 - bFOLS_{ts_1m_1s_2m_2} - bUSE_{ts_1p_1l_1m_1eb_1} - bUSE_{ts_2p_2l_2m_2eb_2}) \\ &\forall t \in T, (s_1, s_2) \in S, (p_1, l_1, m_1, e, b_1 \wedge p_2, l_2, m_2, e, b_2) \in \\ &\{PLMEB \mid p_1 > 1 \wedge p_2 > 1 \wedge m_1 \neq m_2 \wedge e > 1\} \end{aligned} \quad (7.18)$$

NIP.6 Abbildung der Bedarfe an Leistungen: Es gilt bei der Abbildung der Bedarfe, der Lagerbestände und der Lieferrückstände für Endprodukte im Produktionssystem die Materialflusserhaltung sicherzustellen. Nach Gleichung (7.19) muss für jedes Endprodukt die Summe des Leistungsvolumens $iPEPV_{tsplmeb}$, des Bedarfes dem_{pt} sowie die Änderung des Lagerbestandes von der vorherigen Makroperiode $iINV_{p(t-1)}$ zum aktuellen Lagerbestand $iINV_{pt}$ und die Änderung des Lieferrückstandes der vorherigen Makroperiode $iBAC_{p(t-1)}$ zum aktuellen Lieferrückstand $iBAC_{pt}$ null ergeben.

$$\begin{aligned} iINV_{pt} - iINV_{p(t-1)} - iBAC_{pt} + iBAC_{p(t-1)} + dem_{pt} \\ - \sum_{s \in S} \sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB} iPEPV_{tsplmeb} \equiv 0 \quad \forall t \in \{T \mid t > 1\}, p \in P^{FP} \end{aligned} \quad (7.19)$$

7 Multikriterielles Optimierungsmodell

Als Ergebnis vorheriger Planungen können für Endprodukte initiale Lagerbestände INV_p^{INI} oder Lieferrückstände BAC_p^{INI} existieren. Diese sind in der ersten Makroperiode ($t = 1$) zu berücksichtigen (vgl. Gleichung (7.20)).

$$iINV_{pt} - INV_p^{INI} - iBAC_{pt} + BAC_p^{INI} + dem_{pt} - \sum_{s \in S} \sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB} iPEPV_{tsplmeb} \equiv 0$$

$$\forall t \in \{T \mid t = 1\}, p \in P^{FP} \quad (7.20)$$

Die Ungleichungen (7.21) bis (7.24) dienen der Ermittlung, ob für Endprodukte in einer Makroperiode t Lagerbestände existieren. Dies wird durch die binäre Entscheidungsvariable $bINV_{pt}$ angezeigt. Bei der Bestimmung des Wertes der binären Entscheidungsvariable $bINV_{pt}$ ist zu berücksichtigen, ob für das jeweilige Endprodukt der minimale Lagerbestand INV_p^{MIN} (vgl. Ungleichungen (7.21) und (7.22)) oder die sich aus minimaler Lieferzuverlässigkeit DR_{pt}^{MIN} und dem Bedarfsvolumen dem_{pt} ergebende Anzahl (vgl. Ungleichungen (7.23) und (7.24)) die untere Schranke bildet.

$$bINV_{pt} \cdot BigM \geq iINV_{pt} - INV_p^{MIN}$$

$$\forall t \in T, p \in P^{FP}, INV_p^{MIN} \geq DR_{pt}^{MIN} \cdot dem_{pt} \quad (7.21)$$

$$bINV_{pt} \leq iINV_{pt} - INV_p^{MIN}$$

$$\forall t \in T, p \in P^{FP}, INV_p^{MIN} \geq DR_{pt}^{MIN} \cdot dem_{pt} \quad (7.22)$$

$$bINV_{pt} \cdot BigM \geq iINV_{pt} - DR_{pt}^{MIN} \cdot dem_{pt}$$

$$\forall t \in T, p \in P^{FP}, INV_p^{MIN} < DR_{pt}^{MIN} \cdot dem_{pt} \quad (7.23)$$

$$bINV_{pt} \leq iINV_{pt} - DR_{pt}^{MIN} \cdot dem_{pt}$$

$$\forall t \in T, p \in P^{FP}, INV_p^{MIN} < DR_{pt}^{MIN} \cdot dem_{pt} \quad (7.24)$$

Die Abbildung der Bedarfe an Zwischenprodukten mit den zugehörigen mathematischen Formulierungen sind im Anhang C in den Formeln (C.5) bis (C.12) dargestellt.

Gemäß der Modellbildung sind zeit- und zustandsorientierte Instandhaltungsleistungen abzubilden. Die Bedarfe dem_{pt} an zeitorientierten Instandhaltungsleistungen müssen durch die in einer Makroperiode t oder durch vorzeitig oder verspätet durchgeführte Leistungsvolumina $iPEPV_{tsplmeb}$ gedeckt werden. Dabei ist analog zur Material-

flusserhaltung die Leistungserhaltung im Produktionssystem zu berücksichtigen (vgl. Gleichung (7.25)). Als Ergebnis vorheriger Planungen können vorab durchgeführte Leistungen INV_p^{INI} oder initiale Rückstände BAC_p^{INI} existieren. Diese müssen in der ersten Makroperiode ($t = 1$) berücksichtigt werden (vgl. Gleichung (7.26)).

$$iINV_{pt} - iINV_{p(t-1)} - iBAC_{pt} + iBAC_{p(t-1)} + dem_{pt} - \sum_{s \in S} \sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB} iPEPV_{tsplmeb} \equiv 0 \quad \forall t \in \{T \mid t > 1\}, p \in P^{TME} \quad (7.25)$$

$$iINV_{pt} - INV_p^{INI} - iBAC_{pt} + BAC_p^{INI} + dem_{pt} - \sum_{s \in S} \sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB} iPEPV_{tsplmeb} \equiv 0 \quad \forall t \in \{T \mid t = 1\}, p \in P^{TME} \quad (7.26)$$

Die binäre Entscheidungsvariable $bINV_{pt}$ zeigt an, ob vorzeitig durchgeführte Instandhaltungsleistungen der zeitorientierten Instandhaltungsstrategie existieren. Die Ermittlung erfolgt in den Ungleichungen (7.27) bis (7.28).

$$bINV_{pt} \cdot BigM \geq iINV_{pt} - INV_p^{MIN} \quad \forall t \in T, p \in P^{TME} \quad (7.27)$$

$$bINV_{pt} \leq iINV_{pt} - INV_p^{MIN} \quad \forall t \in T, p \in P^{TME} \quad (7.28)$$

Bei einer virtuellen Leistung kann nach Gleichung (7.29) kein Lagerbestand existieren bzw. eine vorzeitige Durchführung erfolgen.

$$bINV_{pt} \equiv 0, \quad \forall t \in T, p \in P^{VP} \quad (7.29)$$

Die Ungleichungen (7.30) und (7.31) ermitteln, ob Lieferrückstände für Produktionsleistungen existieren oder verspätete zeitorientierte Instandhaltungsleistungen vorliegen. Nach Ungleichung (7.32) kann in Abhängigkeit der Leistung nur Lagerbestand oder Lieferrückstand der Produktionsleistung bzw. eine vorzeitig durchgeführte oder eine verspätete Instandhaltungsleistung existieren.

$$bBAC_{pt} \cdot BigM \geq iBAC_{pt} \quad \forall t \in T, p \in P^{TPME} \quad (7.30)$$

$$bBAC_{pt} \leq iBAC_{pt} \quad \forall t \in T, p \in P^{TPME} \quad (7.31)$$

$$bINV_{pt} + bBAC_{pt} \leq 1 \quad \forall t \in T, p \in P^{TPME} \quad (7.32)$$

NIP.7 Berücksichtigung von Vorgaben zur Sicherstellung des Betriebes:

Die Vorgaben von minimalen Lagerbeständen werden durch Ungleichung (7.33) berücksichtigt. Die ganzzahlige Entscheidungsvariable $iINV_{pt}$ darf in keiner Makroperiode t den minimalen Lagerbestand INV_p^{MIN} der Leistung p unterschreiten.

$$iINV_{pt} \geq INV_p^{MIN} \quad \forall t \in T, p \in P^{TPME} \quad (7.33)$$

NIP.8 Berücksichtigung der Kapazitätsrestriktionen: Die maximale Kapazität des Lagers für die Leistung p wird durch INV_p^{MAX} angegeben. Die Ungleichung (7.34) gewährleistet, dass die ganzzahlige Entscheidungsvariable $iINV_{pt}$ des Lagerbestandes in keiner Makroperiode t die maximale Lagermenge überschreitet.

$$iINV_{pt} \leq INV_p^{MAX} \quad \forall t \in T, p \in P^{TPME} \quad (7.34)$$

NIP.9 Abbildung von Betriebsmodi: Ein Betriebsmodus ist aktiv, bis der Wechselvorgang vollständig abgeschlossen ist. Die Zeit der Aktivität des Betriebsmodus entspricht nach Gleichung (7.35) dem Startzeitpunkt $fSTAS_{t(s+1)m}$ der nachfolgenden Mikroperiode $(s+1)$ und der Zeit für den Wechsel des Betriebsmodus, welche durch die binäre Entscheidungsvariable $bCHB_{t(s+1)mb_1b_2}$ und der Vorgangszeit zum Wechsel $tCHB_{mb_1b_2}$ modelliert wird.

$$fACTB_{tism} \equiv fSTAS_{t(s+1)m} + \sum_{(m,b_1,b_2) \in MBB} (tCHB_{mb_1b_2} \cdot bCHB_{t(s+1)mb_1b_2}) \quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s < s^{max}\}, m \in M \quad (7.35)$$

Die Zeit der Aktivität des Betriebsmodus muss in der letzten Mikroperiode ($s = s^{max}$) einer Makroperiode t angepasst werden. Die Gleichung (7.36) gewährleistet, dass der Betriebsmodus b_2 bis zum Abschluss der Wechselvorgänge von Leistungen und Equipment, des Wechsels von Betriebsmodi b_1 zum Betriebsmodi b_2 , der Leistungszeit und Leerzeit aktiv ist. Darüber hinaus kann nach Gleichung (7.37) die Zeit der Aktivität des Betriebsmodus b_2 in der letzten Mikroperiode ($s = s^{max}$) der Makroperiode t die maximale Belegungszeit nicht überschreiten.

$$\begin{aligned}
 fACTB_{tsm} &\equiv fSTAS_{tsm} \\
 &+ \sum_{(m,p_1,p_2,e_1,e_2) \in MPPEE} (tSET_{mp_1p_2e_1e_2} \cdot bCHPE_{tspm_1p_2e_1e_2}) \\
 &+ \sum_{(m,b_1,b_2) \in MBB} (tCHB_{mb_1b_2} \cdot bCHB_{tsm b_1b_2}) \\
 &+ \sum_{(p_2,l,m,e_2,b) \in PLMEB} (tPEP_{p_2lme_2b} \cdot iPEPV_{tspm_2lme_2b}) + fFCAP_{tsm} \\
 &\quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s = s^{max}\}, m \in M \quad (7.36)
 \end{aligned}$$

$$fACTB_{tsm} \equiv cap_{tsm} \cdot pbz_{mt} \quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s = s^{max}\}, m \in M \quad (7.37)$$

Die eindeutige Reihenfolge der Betriebsmodi wird durch Ungleichung (7.38) sichergestellt.

$$fACTB_{tsm} \geq fACTB_{t(s-1)m} \quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s > 1\}, m \in M \quad (7.38)$$

Der Wechsel der Betriebsmodi an einer Maschine m wird durch die binäre Entscheidungsvariable $bCHB_{tsm b_1b_2}$ modelliert. Sie nimmt nach Ungleichungen (7.39) und (7.40) den Wert eins an, wenn an einer Maschine m ein Wechsel des Betriebsmodus ($b_1 \neq b_2$) von einer in der vorherigen Mikroperiode ($s-1$) aktiven Leistung-Ressourcen-Kombination $bUSE_{t(s-1)p_1l_1me_1b_1}$ zu einer anderen in Mikroperiode s aktiven Leistung-Ressourcen-Kombination $bUSE_{tsp_2l_2me_2b_2}$ stattfindet.

$$\begin{aligned}
 & bCHB_{tsmb_1b_2} \geq \\
 & \sum_{(p_1, l_1, m, e_1, b_1) \in PLMEB} bUSE_{t(s-1)p_1l_1me_1b_1} + \sum_{(p_2, l_2, m, e_2, b_2) \in PLMEB} bUSE_{tsp_2l_2me_2b_2} - 1 \\
 & \forall t \in T, s \in \{S \mid s > 1\}, (m, b_1 \wedge m, b_2) \in \{MB \mid b_1 \neq b_2\} \quad (7.39)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & bCHB_{tsmb_1b_2} \leq \\
 & \frac{1}{2} \cdot \left(\sum_{(p_1, l_1, m, e_1, b_1) \in PLMEB} bUSE_{t(s-1)p_1l_1me_1b_1} + \sum_{(p_2, l_2, m, e_2, b_2) \in PLMEB} bUSE_{tsp_2l_2me_2b_2} \right) \\
 & \forall t \in T, s \in \{S \mid s > 1\}, (m, b_1 \wedge m, b_2) \in \{MB \mid b_1 \neq b_2\} \quad (7.40)
 \end{aligned}$$

Die Ungleichungen (7.39) und (7.40) sind für die erste Mikroperiode ($s = 1$) der Makroperiode t sowie für die erste Mikroperiode ($s = 1$) der ersten Makroperiode ($t = 1$) anzupassen. Die zugehörigen mathematischen Formulierungen sind im Anhang C in den Formeln (C.13) bis (C.16) dargestellt.

Die binäre Entscheidungsvariable $bCHB_{tsmb_1b_2}$ nimmt entsprechend der Gleichung (7.41) den Wert null an, wenn kein Wechsel des Betriebsmodus an der Maschine m stattfindet.

$$bCHB_{tsmb_1b_2} \equiv 0 \quad \forall t \in T, s \in S, (m, b_1 \wedge m, b_2) \in \{MB \mid b_1 = b_2\} \quad (7.41)$$

Zur Ermittlung von eindeutigen Abfolgen darf innerhalb einer Mikroperiode s der Makroperiode t an einer Maschine m maximal ein Wechsel zwischen Betriebsmodi stattfinden (vgl. Ungleichung (7.42))

$$\sum_{(m, b_1, b_2) \in MBB} bCHB_{tsmb_1b_2} \leq 1 \quad \forall t \in T, s \in S, m \in M \quad (7.42)$$

NIP.10 Abbildung der Zustandsänderungen von Ressourcen durch

Leistungen: Der Zustand eines Equipments e zu Beginn der Mikroperiode s der Makroperiode t wird durch die reelle Entscheidungsvariable $fCOE_{tsp_e}^{STA}$ und zum Ende durch die reelle Entscheidungsvariable $fCOE_{tsp_e}^{END}$ repräsentiert. Der Betrag der Zustandsänderung des Equipments e durch die Produktionsleistung in der Mikroperiode s der Makroperiode t berechnet sich nach Gleichung (7.43) als Multiplikation

der Verschleißrate $weo_{p_1lmeb}^E$ mit dem Leistungsvolumen $iPEPV_{tsp_1lmeb}$ der aktiven Leistung-Ressourcen-Befähigung. Der Betrag der Zustandsänderung des Equipments e durch eine zustandsorientierte Instandhaltungsleistung ergibt sich aus dem Volumen $iPEPV_{tsp_1lmeb}$ multipliziert mit dem Zustandsparameter COE_{pe}^{LIM} .

$$\begin{aligned}
 fCOE_{tsp_e}^{END} &\equiv fCOE_{tsp_e}^{STA} + \sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB^P} (iPEPV_{tsp_1lmeb} \cdot weo_{p_1lmeb}^E) \\
 &\quad - \sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB^{COE}} (iPEPV_{tsp_1lmeb} \cdot COE_{pe}^{LIM}) \\
 &\quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s > 1\}, (p,e) \in PE^{COE} \quad (7.43)
 \end{aligned}$$

Der Parameter COE_{pe}^{LIM} repräsentiert den Zustand des Equipments e , ab dem eine zustandsorientierte Instandhaltungsleistung durchgeführt werden soll. Erreicht oder überschreitet der Zustand $fCOE_{t(s-1)pe}^{END}$ des Equipments e am Ende der vorherigen Mikroperiode $(s-1)$ den Zustandsparameter COE_{pe}^{LIM} , so ist in der Mikroperiode s der Makroperiode t eine zustandsorientierte Instandhaltungsleistung durchzuführen (vgl. Ungleichung (7.44)). Das Prozessfenster bis zur Verschleißgrenze COE_{pe}^{MAX} ermöglicht die Fertigstellung einer Produktionsleistung.

$$\begin{aligned}
 fCOE_{t(s-1)pe}^{END} &\leq COE_{pe}^{LIM} + COE_{pe}^{MAX} \cdot \sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB^{COE}} iPEPV_{tsp_1lmeb} \\
 &\quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s > 1\}, (p,e) \in PE^{COE} \quad (7.44)
 \end{aligned}$$

Die Ungleichung (7.44) muss für die erste Mikroperiode $(s = 1)$ der Makroperiode $(t > 1)$ sowie $(t = 1)$ angepasst werden. Die entsprechenden mathematischen Formulierungen sind im Anhang C in den Formeln (C.17) bis (C.19) dargestellt.

Die Modellierung der Zustandserhaltung erfolgt in den Gleichungen (7.45) und (7.46). Der Startzustand $fCOE_{tsp_e}^{STA}$ eines Equipments e zu Beginn der Mikroperiode s ist gleich dem Endzustand $fCOE_{t(s-1)pe}^{END}$ der vorherigen Mikroperiode $(s-1)$ derselben Makroperiode t (vgl. Gleichung (7.45)) bzw. ist gleich dem Endzustand $fCOE_{t(s-1)pe}^{END}$ der letzten Mikroperiode $(s = s^{max})$ der vorherigen Makroperiode $(t-1)$ (vgl. Gleichung (7.46)).

7 Multikriterielles Optimierungsmodell

$$fCOE_{tspe}^{STA} = fCOE_{t(s-1)pe}^{END} \quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s > 1\}, (p, e) \in PE^{COE} \quad (7.45)$$

$$fCOE_{tspe}^{STA} = fCOE_{(t-1)s^{max}pe}^{END} \quad \forall t \in \{T \mid t > 1\}, s \in \{S \mid s = 1\}, (p, e) \in PE^{COE} \quad (7.46)$$

Die mehrfache Durchführung einer zustandsorientierten Instandhaltungsleistung für ein Equipment e in einer Mikroperiode s der Makroperiode t ist auszuschließen (vgl. Ungleichung (7.47)).

$$iPEPV_{tsplmeb} \leq 1, \quad \forall t \in T, s \in S, (p, l, m, e, b) \in PLMEB^{COE} \quad (7.47)$$

Die definierte Freigabe und Synchronisation des Einsatzes der Equipments e wird mit den Formeln (7.14) bis (7.18) sichergestellt. Es ist für zeit- und zustandsorientierte Instandhaltungsleistungen an Equipments zusätzlich abzusichern, dass der Startzeitpunkt $fSTAS_{ts_1m_1}$ einer Instandhaltungsleistung auf der Maschine m_1 größer als der Freigabezeitpunkt $fRELE_{ts_2m_2}$ des Equipments e auf der Maschine m_2 ist. Dies erfolgt durch Ungleichung (7.48).

$$\begin{aligned} fSTAS_{ts_1m_1} &\geq fRELE_{ts_2m_2} \\ &- (3 - iPEPV_{ts_1p_1l_1m_1eb_1} - bUSE_{ts_1p_1l_1m_1eb_1} - bUSE_{ts_2p_2l_2m_2eb_2}) \quad \forall t \in T, \\ &(s_1, s_2) \in \{S \mid s_1 > 1 \wedge s_2 < s_1\}, (p_1, l_1, m_1, e, b_1) \in \{PLMEB^{TCOE} \mid p_1 > 1\}, \\ &(p_2, l_2, m_2, e, b_2) \in \{PLMEB^P \mid p_2 > 1\}, m_1 \neq m_2 \quad (7.48) \end{aligned}$$

Des Weiteren kann ein Equipment e erst dann zur Durchführung einer Produktionsleistung an der Maschine m_2 eingesetzt werden, wenn die zeit- oder zustandsorientierte Instandhaltungsleistung am Equipment e abgeschlossen wurde. Nach Ungleichung (7.49) muss der Freigabezeitpunkt $fRELE_{ts_1m_1}$ des Equipments e an der Maschine m_1 kleiner sein als der Startzeitpunkt $fSTAS_{ts_2m_2}$ der Produktionsleistung auf der Maschine m_2 unter Einsatz des Equipments e .

$$\begin{aligned}
 fSTAS_{ts_2m_2} &\geq fRELE_{ts_1m_1} \\
 &- (3 - iPEPV_{ts_1p_1l_1m_1eb_1} - bUSE_{ts_1p_1l_1m_1eb_1} - bUSE_{ts_2p_2l_2m_2eb_2}) \quad \forall t \in T, \\
 (s_1, s_2) &\in \{S \mid s_1 > 1 \wedge s_2 > s_1\}, (p_1l_1m_1eb_1) \in \{PLMEB^{COE} \mid p_1 > 1\}, \\
 (p_2l_2m_2eb_2) &\in \{PLMEB^P \mid p_2 > 1\}, m_1 \neq m_2 \quad (7.49)
 \end{aligned}$$

Die mathematischen Formulierungen der Zustandsänderungen von Maschinen durch Leistungen sind in den Formeln (C.21) bis (C.26) im Anhang C dargestellt.

NIP.11 Berücksichtigung der initialen Zustände der Ressourcen: Die initialen Zustände COE_{pe}^{INI} der Equipments e sind zu Beginn des Planungshorizontes zu berücksichtigen. Nach Gleichung (7.50) nimmt die reelle Entscheidungsvariable $fCOE_{tspe}^{STA}$ zu Beginn der ersten Mikroperiode ($s = 1$) der ersten Makroperiode ($t = 1$) den Wert des initialen Zustands COE_{pe}^{INI} des Equipments e an.

$$fCOE_{tspe}^{STA} \equiv COE_{pe}^{INI} \quad \forall t \in \{T \mid t = 1\}, s \in \{S \mid s = 1\}, (p, e) \in PE^{COE} \quad (7.50)$$

Die Formel (C.28) zur Berücksichtigung der initialen Zustände der Maschinen befindet sich im Anhang C.

NIP.12 Berücksichtigung der technischen Restriktionen der Ressourcen:

Die Ungleichung (7.51) stellt sicher, dass der Zustand $fCOE_{tspe}^{END}$ eines Equipments e in allen Mikroperioden s der Makroperioden t kleiner oder gleich der Verschleißgrenze ist, welcher der Summe der Parameter COE_{pe}^{LIM} und COE_{pe}^{MAX} entspricht.

$$fCOE_{tspe}^{END} \leq COE_{pe}^{LIM} + COE_{pe}^{MAX} \quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s > 1\}, (p, e) \in PE^{COE} \quad (7.51)$$

Die mathematische Formulierung zur Berücksichtigung der technischen Restriktion für Maschinen ist im Anhang C in Formel (C.29) dargestellt.

7.2.2 Zielsystem für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung

Das Zielsystem setzt sich gemäß Abschnitt 7.1.4 aus den vier Zielgrößen Kosten, Zeit, Qualität und Flexibilität zusammen. Die vier Zielgrößen werden zunächst in mathematische Formulierungen überführt. Anschließend werden die Nutzenfunktionen formuliert. Abschließend erfolgt die Formulierung der Zielfunktion unter Anwendung der Goal-Programming-Methode (vgl. Abschnitt 5.2.2.2).

7.2.2.1 Formulierung der Zielgrößen

Nachfolgend werden die Terme der einzelnen Zielfunktionen des Zielsystems vorgestellt. Zur besseren Lesbarkeit der Erklärungen wird auf die explizite Beschreibung der Summationen über die Mikroperioden s und Makroperioden t verzichtet.

Kosten: Die Kosten CO der Durchführung der Produktions- und Instandhaltungsleistungen sowie der Vorgänge im Produktionssystem ergeben sich gemäß der Formel (7.52).

$$CO = COIN + COBA + COPE + COCB + COTR + COMA \\ + COTE + COCE + COTM + COCM \quad (7.52)$$

Die Vorlaufkosten $COIN$ berechnen sich entsprechend der Formel (7.53) als Summation der Multiplikation der ganzzahligen Entscheidungsvariable $iINV_{pt}$ der Volumina der Lagerbestände der Zwischen- und Endprodukte sowie der vorzeitig durchgeführten Instandhaltungsleistungen mit dem jeweiligen Kostensatz $cINV_{pt}$.

$$COIN = \sum_{t \in T} \sum_{p \in P^{TPME}} cINV_{pt} \cdot iINV_{pt} \quad (7.53)$$

Die Strafkosten $COBA$ ergeben sich als Summe der Lieferverzugskosten der Produktionsleistungen und der Kosten der zeitlichen Verspätung der zeitorientierten Instandhaltungsleistungen. Sie berechnen sich nach Formel (7.54) als Summation der Produkte der

ganzzahligen Entscheidungsvariablen des Rückstandsvolumens $iBAC_{pt}$ der Leistung p in der Makroperiode t und dem Strafkostensatz $cBAC_{pt}$.

$$COBA = \sum_{t \in T} \sum_{p \in P^{TPME}} cBAC_{pt} \cdot iBAC_{pt} \quad (7.54)$$

Die Wechselkosten $COPE$ der Leistungen p und der Equipments e berechnen sich entsprechend der Formel (7.55) als Summation der Produkte des Wechselkostensatzes $cSET_{mp_1p_2e_1e_2}$ und der binären Entscheidungsvariable $bCHPE_{tsmp_1p_2e_1e_2}$.

$$COPE = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{(m,p_1,p_2,e_1,e_2) \in MPPEE} cSET_{mp_1p_2e_1e_2} \cdot bCHPE_{tsmp_1p_2e_1e_2} \quad (7.55)$$

Die Wechselkosten $COCB$ der Betriebsmodi b ergeben sich als Summation der Multiplikationen des Kostensatzes für Betriebsmodiwechsel $cCHB_{mb_1b_2}$ und der binären Entscheidungsvariable $bCHB_{tsmb_1b_2}$ (vgl. Formel (7.56)).

$$COCB = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{(m,b_1,b_2) \in MBB} cCHB_{mb_1b_2} \cdot bCHB_{tsmb_1b_2} \quad (7.56)$$

Die Transportkosten $COTR$ für Equipments berechnen sich gemäß Formel (7.57) als Summation der Produkte der binären Entscheidungsvariable $bCHPE_{tsmp_1p_2e_1e_2}$ sowie dem Transportkostensatz $cTRA_{tsmp_1p_2e_1e_2}$. Sie entstehen beim Wechsel der Leistungen p und der Equipments e .

$$COTR = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{(m,p_1,p_2,e_1,e_2) \in MPPEE} cTRA_{tsmp_1p_2e_1e_2} \cdot bCHPE_{tsmp_1p_2e_1e_2} \quad (7.57)$$

Die Fertigungskosten $COMA$ der im Produktionssystem hergestellten Zwischen- und Endprodukte ergeben sich aus der Summation der Multiplikationen des Leistungsvolumens $iPEPV_{tsplmeb}$ mit dem Kostensatz $cPEP_{plmeb}$ (vgl. Formel (7.58)).

$$COMA = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB^P} cPEP_{plmeb} \cdot iPEPV_{tsplmeb} \quad (7.58)$$

7 Multikriterielles Optimierungsmodell

In die Berechnung der Kosten für die Instandhaltungsleistungen fließen entsprechend den Formeln (7.59) bis (7.62) der jeweilige Kostensatz zur Durchführung der Leistung $cPEP_{plmeb}$ sowie das jeweilige Leistungsvolumen $iPEPV_{tsplmeb}$ im Planungshorizont ein. Es werden die Kosten der zeitorientierten, ortsflexiblen Instandhaltungsleistungen $COTE$ (vgl. Formel (7.59)), der zustandsorientierten, ortsflexiblen Instandhaltungsleistungen $COCE$ (vgl. Formel (7.60)) sowie der zeitorientierten, ortsgelunden Instandhaltungsleistungen $COTM$ (vgl. Formel (7.61)) und der zustandsorientierten, ortsgelunden Instandhaltungsleistungen $COCM$ an Maschinen unterschieden.

$$COTE = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{(p,l,m,e,b) \in P\text{MEBL}^{TIE}} cPEP_{plmeb} \cdot iPEPV_{tsplmeb} \quad (7.59)$$

$$COCE = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{(p,l,m,e,b) \in P\text{MEBL}^{COE}} cPEP_{plmeb} \cdot iPEPV_{tsplmeb} \quad (7.60)$$

$$COTM = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{(p,l,m,e,b) \in P\text{MEBL}^{TIM}} cPEP_{plmeb} \cdot iPEPV_{tsplmeb} \quad (7.61)$$

$$COCM = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{(p,l,m,e,b) \in P\text{MEBL}^{COM}} cPEP_{plmeb} \cdot iPEPV_{tsplmeb} \quad (7.62)$$

Zeit: Die Zeit TI berechnet sich gemäß der Formel (7.63) als Summe der Wechselzeiten von Leistungen, Equipments und Betriebsmodi sowie der Zeiten der Produktionsleistungen zur Herstellung der Zwischen- und Endprodukte, der Zeiten der Instandhaltungsleistungen sowie der Zeiten der Handhabung und Koordination.

$$TI = TIPE + TICB + TIMA + TITE + TICE + TITM + TICM + TIHA + TIDE \quad (7.63)$$

Die Zeit $TIPE$ zum Wechsel der Leistungen p und der Equipments e ergibt sich nach Formel (7.64) als Summation der Multiplikationen der Vorgangszeit $tSET_{mp_1p_2e_1e_2}$ und der binären Entscheidungsvariable $bCHPE_{tsmp_1p_2e_1e_2}$.

$$TIPE = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{(m,p_1,p_2,e_1,e_2) \in MPPEE} tSET_{mp_1p_2e_1e_2} \cdot bCHPE_{tsmp_1p_2e_1e_2} \quad (7.64)$$

Die Zeit $TICB$ zum Wechsel der Betriebsmodi b ergibt sich als Summation der Produkte der Vorgangszeit $tCHB_{mb_1b_2}$ und der binären Entscheidungsvariable $bCHPE_{t_s m p_1 p_2 e_1 e_2}$ (vgl. Formel (7.65)).

$$TICB = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{(m, b_1, b_2) \in MBB} tCHB_{mb_1b_2} \cdot bCHPE_{t_s m p_1 p_2 e_1 e_2} \quad (7.65)$$

Die Zeit $TIMA$ zur Herstellung der Zwischen- und Endprodukte im Produktionssystem ergibt sich aus der Summation der Multiplikationen des Leistungsvolumens $iPEPV_{tsplmeb}$ mit der Vorgangszeit der Leistung $tPEP_{plmeb}$ (vgl. Formel (7.66)).

$$TIMA = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{(p, l, m, e, b) \in PLMEB^P} tPEP_{plmeb} \cdot iPEPV_{tsplmeb} \quad (7.66)$$

Die Zeit für zeitorientierte, ortsflexible Instandhaltungsleistungen $TITE$ sowie zustandsorientierte, ortsflexible Instandhaltungsleistungen $TICE$ an Equipments werden nach Formeln (7.67) und (7.68) als Summation der Produkte der Vorgangszeit $tPEP_{plmeb}$ und dem Leistungsvolumen $iPEPV_{tsplmeb}$ berechnet. Die Zeit für zeitorientierte, ortsgebundene Instandhaltungsleistungen $TITM$ sowie die Zeit für zustandsorientierte, ortsgebundene Instandhaltungsleistungen $TICM$ an Maschinen werden gemäß Formel (7.69) sowie Formel (7.70) ermittelt.

$$TITE = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{(p, l, m, e, b) \in PMEBL^{TIE}} tPEP_{plmeb} \cdot iPEPV_{tsplmeb} \quad (7.67)$$

$$TICE = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{(p, l, m, e, b) \in PMEBL^{COE}} tPEP_{plmeb} \cdot iPEPV_{tsplmeb} \quad (7.68)$$

$$TITM = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{(p, l, m, e, b) \in PMEBL^{TIM}} tPEP_{plmeb} \cdot iPEPV_{tsplmeb} \quad (7.69)$$

$$TICM = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{(p, l, m, e, b) \in PMEBL^{COM}} tPEP_{plmeb} \cdot iPEPV_{tsplmeb} \quad (7.70)$$

Die Zeiten der Handhabung der Zwischen- und Endprodukte fallen im Lager im Rahmen der logistischen Prozesse an. Im Fall von vorzeitig durchgeführten zeitorientierten Instandhaltungsleistungen treten nach Formel (7.71) zusätzliche Zeiten auf, z. B. zur Vorbereitung der Leistung oder Wartezeiten für Ersatzteile. Die Zeiten der Koordination

7 Multikriterielles Optimierungsmodell

entstehen nach Formel (7.72) durch zusätzliche Aufwände bei Lieferverzug von Produktionsleistungen und verspäteten zeitorientierten Instandhaltungsleistungen.

$$TIHA = \sum_{t \in T} \sum_{p \in P^{TPME}} tHAP_p \cdot iINV_{pt} \quad (7.71)$$

$$TIDE = \sum_{t \in T} \sum_{p \in P^{TPME}} tDEC_p \cdot iBAC_{pt} \quad (7.72)$$

Qualität: Die Qualität QU ergibt sich gemäß der Formel (7.73) aus der Lieferzuverlässigkeit $QUDR$. Die Lieferzuverlässigkeit berechnet sich als Summe der Lieferzuverlässigkeiten der Endprodukte.

$$QU = QUDR = \sum_{t \in T} \sum_{p \in P^{FP}} fDR_{tp} \quad (7.73)$$

Zur Berechnung der jeweiligen Lieferzuverlässigkeit sind sowohl die verfügbaren Lagerbestände der Endprodukte als auch der Zwischenprodukte sowie die Zustände der Ressourcen, welche zur Durchführung der Leistung eingesetzt werden, zu betrachten. Die Lieferzuverlässigkeit eines Endproduktes mit einem Bedarf größer null ergibt sich aus dem Quotienten des Lagerbestandes $iINV_{p(t-1)}$ der vorherigen Makroperiode $(t-1)$ und dem Bedarf dem_{pt} in der Makroperiode t (vgl. Formel (7.74)). In der ersten Makroperiode $(t=1)$ berechnet sich die Lieferzuverlässigkeit nach Formel (7.75) als Quotient des initialen Lagerbestandes INV_p^{INI} und dem Bedarf dem_{pt} .

$$fDR_{tp}^{FP} \leq \left(\frac{iINV_{p(t-1)}}{dem_{pt}} \right) \quad \forall t \in \{T \mid t > 1\}, p \in \{P^{FP} \mid dem_{pt} > 0\} \quad (7.74)$$

$$fDR_{tp}^{FP} \leq \left(\frac{INV_p^{INI}}{dem_{pt}} \right) \quad \forall t \in \{T \mid t = 1\}, p \in \{P^{FP} \mid dem_{pt} > 0\} \quad (7.75)$$

Die Lieferzuverlässigkeit eines Endproduktes kann darüber hinaus von der Verfügbarkeit von Zwischenprodukten abhängig sein. Die Lieferzuverlässigkeit eines Zwischenproduktes p_1 berechnet sich nach Formel (7.76) als Quotient des Lagerbestandes INV_{p_1t} und dem Bedarf, welcher sich aus dem Bedarf dem_{p_2t} des Endproduktes p_2 und Materialbedarfskoeffizienten $mrc_{p_1p_2}$ der Produktstruktur ergibt. In der ersten Makroperiode

($t = 1$) ergibt sich die Lieferzuverlässigkeit aus dem Quotienten des initialen Lagerbestandes $INV_{p_1}^{INI}$, dem Materialbedarfskoeffizienten $mrc_{p_1 p_2}$ und dem Bedarf $dem_{p_2 t}$ des Endproduktes p_2 (vgl. Formel (7.77))

$$fDR_{t p_1}^{IP} \leq \left(\frac{INV_{p_1(t-1)}}{mrc_{p_1 p_2} \cdot dem_{p_2 t}} \right) \quad \forall t \in \{T \mid t > 1\}, p_1 \in P^{IP}, p_2 \in \{P^{FP} \mid dem_{p_2 t} > 0\}, mrc_{p_1 p_2} \neq 0 \quad (7.76)$$

$$fDR_{t p_1}^{IP} \leq \left(\frac{INV_{p_1}^{INI}}{mrc_{p_1 p_2} \cdot dem_{p_2 t}} \right) \quad \forall t \in \{T \mid t = 1\}, p_1 \in P^{IP}, p_2 \in \{P^{FP} \mid dem_{p_2 t} > 0\}, mrc_{p_1 p_2} \neq 0 \quad (7.77)$$

Darüber hinaus wird die Lieferzuverlässigkeit durch die Zustände der Ressourcen beeinflusst. Der Beitrag eines Equipments e zur Lieferzuverlässigkeit wird mit dem Wert eins bewertet, wenn dessen Zustand $fCOE_{tsp_2 e}^{END}$ den Wert null annimmt, d. h. keinen Verschleiß aufweist. Der Beitrag sinkt linear mit dem Verschleiß eines Equipments e und nimmt den Wert null an, wenn der Zustand $fCOE_{tsp_2 e}^{END}$ den Zustandsparameter COE_{pe}^{LIM} erreicht. Die Formel (7.78) stellt die Zusammenhänge für Endprodukte und die Formel (7.79) für Zwischenprodukte dar.

$$fDR_{t p_1}^{FP} \leq \frac{1}{s^{max}} \cdot \sum_{s \in S} \sum_{(p_2, e) \in PE^{COE}} \left(1 - \frac{fCOE_{tsp_2 e}^{END}}{COE_{p_2 e}^{LIM}} \right) \quad \forall t \in T, (p_1, l_1, m, e_1, b_1) \in PLMEB^{FP} \quad (7.78)$$

$$fDR_{t p_1}^{IP} \leq \frac{1}{s^{max}} \cdot \sum_{s \in S} \sum_{(p_2, e) \in PE^{COE}} \left(1 - \frac{fCOE_{tsp_2 e}^{END}}{COE_{p_2 e}^{LIM}} \right) \quad \forall t \in T, (p_1, l_1, m_1, e, b_1) \in PLMEB^{IP} \quad (7.79)$$

Die Beiträge der Maschinen zur Lieferzuverlässigkeit sind analog zu modellieren. Die Lieferzuverlässigkeit für die Endprodukte und die Zwischenprodukte werden unter Berücksichtigung der Zustände der Maschinen m nach den Formeln (7.80) und (7.81) berechnet.

$$fDR_{tp_1}^{FP} \leq \frac{1}{s^{max}} \cdot \sum_{s \in S} \sum_{(p_2, m) \in PM^{COM}} \left(1 - \frac{fCOM_{tsp_2m}^{END}}{COM_{p_2m}^{LIM}} \right) \quad \forall t \in T, (p_1, l_1, m_1, e, b_1) \in PLMEB^{FP} \quad (7.80)$$

$$fDR_{tp_1}^{IP} \leq \frac{1}{s^{max}} \cdot \sum_{s \in S} \sum_{(p_2, m) \in PM^{COM}} \left(1 - \frac{fCOM_{tsp_2m}^{END}}{COM_{p_2m}^{LIM}} \right) \quad \forall t \in T, (p_1, l_1, m_1, e, b_1) \in PLMEB^{IP} \quad (7.81)$$

Die Lieferzuverlässigkeit des Endproduktes p_2 nimmt, nach den Formeln (7.82) und (7.83), den niedrigeren Wert der Lieferzuverlässigkeit von Zwischen- oder Endprodukt an.

$$fDR_{tp_2} \leq fDR_{tp_1}^{IP} \quad \forall t \in T, p_1 \in P^{IP}, p_2 \in P^{FP}, mrc_{p_1 p_2} \neq 0 \quad (7.82)$$

$$fDR_{tp} \leq fDR_{tp}^{FP} \quad \forall t \in T, p \in P^{FP} \quad (7.83)$$

Lieferzuverlässigkeit existiert nur, wenn kein Lieferrückstand $bBAC_{pt}$ vorhanden ist (vgl. Ungleichung (7.84)). Des Weiteren sind in den Makroperioden t ohne Lieferrückstand die Vorgaben des Managements bzgl. minimaler Lieferzuverlässigkeit einzuhalten (vgl. Ungleichung (7.85)).

$$fDR_{tp} \leq BigM \cdot (1 - bBAC_{pt}) \quad \forall t \in T, p \in P^{FP} \quad (7.84)$$

$$fDR_{tp} \geq DR_{tp}^{MIN} \cdot (1 - bBAC_{pt}) \quad \forall t \in T, p \in P^{FP} \quad (7.85)$$

Flexibilität: Die Flexibilität FL entspricht der im Planungshorizont zusätzlich herstellbaren Anzahl an Endprodukten $FLFP$. Sie berechnet sich gemäß der Formel (7.86) als Summe der in den Mikroperioden t in den Leistung-Ressourcen-Befähigungen zusätzlich herstellbaren Anzahl an Endprodukten fFL_{tplmbe}^{FP} .

$$FL = FLFP = \sum_{t \in T} \sum_{(p, l, m, e, b) \in PLMEB^{FP}} fFL_{tplmbe}^{FP} \quad (7.86)$$

Zur Ermittlung der zusätzlich herstellbaren Anzahl an Produkten ist die Berechnung der freien Kapazität einer Maschine m erforderlich. Sie ergibt sich nach Formel (7.87) aus der Summe der Leerzeiten $fFCAP_{ism}$.

$$fFL_{tplmeb}^M = \sum_{s \in S} fFCAP_{ism} \quad \forall t \in T, (p, l, m, e, b) \in PLMEB^P \quad (7.87)$$

Das in einer Makroperiode t zusätzlich herstellbare Anzahl eines Endproduktes fFL_{tplmeb}^{FPM} berechnet sich in Abhängigkeit der existierenden Leistung-Ressourcen-Befähigungen aus dem Quotienten der freien Kapazität und der Leistungszeit $tPEP_{plmeb}$ (vgl. Formel (7.88)). Diejenigen Endprodukte, welche in einer Makroperiode t keinen Bedarf aufweisen, tragen nicht zur Flexibilität bei (vgl. Formel (7.89)).

$$fFL_{tplmeb}^{FPM} = \left(\frac{fFL_{tplmeb}^M}{tPEP_{plmeb}} \right) \quad \forall t \in T, (p, l, m, e, b) \in \left\{ PLMEB^{FP} \mid dem_{pt} \neq 0 \wedge e > 1 \right\} \quad (7.88)$$

$$fFL_{tplmeb}^{FPM} \equiv 0 \quad \forall t \in T, (p, l, m, e, b) \in \left\{ PLMEB^{FP} \mid dem_{pt} = 0 \vee e = 1 \right\} \quad (7.89)$$

Die Flexibilität eines Zwischenproduktes $fFL_{tp_1lmeb}^{IPM}$ berechnet sich nach Formel (7.90). Des Weiteren ist sicherzustellen, dass Zwischenprodukte eines Endproduktes nur dann zu dessen Flexibilität beitragen, wenn sie entsprechend der Produktstruktur für die Herstellung des Endproduktes benötigt werden (vgl. Formel (7.91)). Zwischenprodukte von Endprodukten, welche in der nachfolgenden Makroperiode ($t+1$) keine Bedarfe aufweisen, tragen nicht zur Flexibilität bei (vgl. Formel (7.92)). Dies gilt analog für alle Leistung-Ressourcen-Befähigungen mit einer virtuellen Leistung oder einem virtuellem Equipment (vgl. Formel (7.93))

$$fFL_{tp_1lmeb}^{IPM} = \left(\frac{fFL_{tp_1lmeb}^M}{tPEP_{p_1lmeb}} \right) \quad \forall t \in \{T \mid t < t^{max}\}, (p_1, l, m, e, b) \in \left\{ PLMEB^{IP} \mid e > 1 \right\}, \quad p_2 \in \left\{ P^{FP} \mid dem_{p_2(t+1)} \neq 0 \right\}, mrc_{p_1p_2} \neq 0 \quad (7.90)$$

7 Multikriterielles Optimierungsmodell

$$fFL_{tp_1lmeb}^{IPM} \equiv 0 \quad \forall t \in \{T \mid t < t^{max}\}, (p_1, l, m, e, b) \in PLMEB^{IP},$$

$$p_2 \in P^{FP}, mrc_{p_1 p_2} = 0 \quad (7.91)$$

$$fFL_{tp_1lmeb}^{IPM} \equiv 0 \quad \forall t \in \{T \mid t < t^{max}\}, (p_1, l, m, e, b) \in PLMEB^{IP},$$

$$p_2 \in \left\{ P^{FP} \mid dem_{p_2(t+1)} = 0 \right\} \quad (7.92)$$

$$fFL_{tp_1lmeb}^{IPM} \equiv 0 \quad \forall t \in \{T \mid t = t^{max}\},$$

$$(p_1, l, m, e, b) \in \left\{ PLMEB^{IP} \mid e = 1 \right\}, p_2 \in P^{FP} \quad (7.93)$$

Die Flexibilität der Endprodukte entspricht der geringeren Anzahl an zusätzlich herstellbaren Zwischenprodukten der vorherigen Makroperiode ($t-1$) oder an zusätzlich herstellbaren Endprodukten der Makroperiode t im schnellsten Betriebsmodus (vgl. Formeln (7.94) und (7.95)). Zur richtigen Ermittlung der Flexibilität wird nur der schnellste Betriebsmodus b^{max} berücksichtigt (vgl. Formel (7.96)).

$$fFL_{tp_2l_2m_2e_2b}^{FP} \leq \sum_{(p_1, l_1, m_1, e_1, b) \in PLMEB^{IP}} fFL_{(t-1)p_1l_1m_1e_1b p_2}^{IPM} \quad \forall t \in \{T \mid t > 1\},$$

$$p_1 \in P^{IP}, (p_2, l_2, m_2, e_2, b) \in \left\{ PLMEB^{FP} \mid b = b^{max} \right\}, mrc_{p_1 p_2} \neq 0 \quad (7.94)$$

$$fFL_{tp_1lmeb}^{FP} \leq fFL_{tp_1lmeb}^{FPM} \quad \forall t \in T, (p, l, m, e, b) \in \left\{ PLMEB^{FP} \mid b = b^{max} \right\} \quad (7.95)$$

$$fFL_{tp_1lmeb}^{FP} \equiv 0 \quad \forall t \in T, (p, l, m, e, b) \in \left\{ PLMEB^{FP} \mid b \neq b^{max} \right\} \quad (7.96)$$

Darüber hinaus ist sicherzustellen, dass Flexibilität nur vorliegen kann, wenn kein Lieferrückstand existiert. Die zugehörigen mathematischen Formulierungen sind im Anhang C in den Formeln (C.30) bis (C.40) dargestellt.

Die Berechnung der prozentualen Flexibilität der Endprodukte erfolgt anhand der Formeln (7.97) und (7.98).

$$fFL_{tp_1lmeb}^{FPP} = \left(\frac{100 * fFL_{tp_1lmeb}^{FP}}{dem_{pt}} \right)$$

$$\forall t \in T, (p, l, m, e, b) \in \left\{ PLMEB^{FP} \mid dem_{pt} \neq 0 \right\} \quad (7.97)$$

$$fFL_{tp_1lmeb}^{FPP} \equiv 0 \quad \forall t \in T, (p, l, m, e, b) \in \left\{ PLMEB^{FP} \mid dem_{pt} = 0 \right\} \quad (7.98)$$

7.2.2.2 Formulierung der Nutzenfunktionen

Zur Umsetzung des Zielsystems unter Anwendung der Goal-Programming-Methode als Lösungsverfahren (vgl. Abschnitt 5.2.2.2) sind die Zielgrößen zu normieren. Die Normierung mittels der Formeln (7.99) bis (7.102) ermöglicht die gleichwertige Berücksichtigung der Ziele im integrierten Zielsystem und überführt die einzelnen Zielgrößen in einen Wertebereich mit dem Intervall $[0, 1]$.

$$NU^{CO} = \frac{CO^{max} - CO}{CO^{max} - CO^{min}} \quad (7.99)$$

$$NU^{TI} = \frac{TI^{max} - TI}{TI^{max} - TI^{min}} \quad (7.100)$$

$$NU^{QU} = \frac{QU - QU^{min}}{QU^{max} - QU^{min}} \quad (7.101)$$

$$NU^{FL} = \frac{FL - FL^{min}}{FL^{max} - FL^{min}} \quad (7.102)$$

7.2.2.3 Formulierung der Zielfunktion

Die Goal-Programming-Methode basiert auf der Berechnung von Abweichungen des Nutzwertes von den durch die Entscheidungsträger vorgegebenen Zielwerten. Die Berechnung für die jeweilige Zielgröße ist in den Formeln (7.103) bis (7.106) dargestellt.

$$NU^{CO} + \delta^{CO+} - \delta^{CO-} \equiv ZW^{CO} \quad (7.103)$$

$$NU^{TI} + \delta^{TI+} - \delta^{TI-} \equiv ZW^{TI} \quad (7.104)$$

$$NU^{QU} + \delta^{QU+} - \delta^{QU-} \equiv ZW^{QU} \quad (7.105)$$

$$NU^{FL} + \delta^{FL+} - \delta^{FL-} \equiv ZW^{FL} \quad (7.106)$$

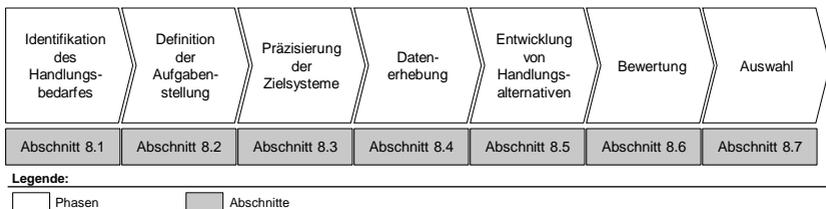
7 Multikriterielles Optimierungsmodell

Die Zielfunktion des mathematischen Modells zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung ist die Minimierung der Summe der gewichteten Abweichungen der Zielgrößen von den vorgegebenen Zielwerten. Folglich ist die Summe der gewichteten Abweichungen von den Zielwerten der Kosten, der Zeit, der Qualität und der Flexibilität zu minimieren (vgl. Formel 7.107).

$$\begin{aligned} \min \quad & \delta^{CO+} \cdot GW^{CO+} + \delta^{CO-} \cdot GW^{CO-} \\ & + \delta^{TI+} \cdot GW^{TI+} + \delta^{TI-} \cdot GW^{TI-} \\ & + \delta^{QU+} \cdot GW^{QU+} + \delta^{QU-} \cdot GW^{QU-} \\ & + \delta^{FL+} \cdot GW^{FL+} + \delta^{FL-} \cdot GW^{FL-} \end{aligned} \quad (7.107)$$

8 Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Die Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung ist Systemelement des sozialen Teilsystems und basiert auf der Synthese des Ablaufes von Entscheidungsprozessen der präskriptiven Entscheidungstheorie (vgl. Abschnitt 5.2.3). Sie hat zum Ziel, die Entscheidungsträger der Produktions- und Instandhaltungsplanung durch die einzelnen Phasen der integrierten Planung zu führen. Des Weiteren soll sie die Ermittlung und Auswahl von Handlungsalternativen anhand rationaler Kriterien sowie die Konsensfindung im Entscheidungsprozess unterstützen. Die Phasen der Methode sind in Abbildung 8.1 dargestellt und werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.



*Abbildung 8.1: Phasen der Methode zur integrierten
Produktions- und Instandhaltungsplanung
mit den zugehörigen Abschnitten des Kapitels*

Im Kontext multikriterieller Entscheidungsprobleme ist es häufig hilfreich und teilweise notwendig, Schleifen und Iterationen im Entscheidungsprozess durchzuführen (UDE 2010, S. 12). Folglich sind die Phasen der Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung nicht als definierte Abfolge anzusehen, sondern können bei Bedarf in Schleifen und mehrfachen Iterationen durchlaufen werden. Des Weiteren ist die Methode unternehmensneutral gestaltet und kann bei Bedarf an die spezifischen Anforderungen eines produzierenden Unternehmens angepasst werden. Dies stellt die Übertragbarkeit auf verschiedene Anwendungsfälle sicher.

8.1 Identifikation des Handlungsbedarfes

Die erste Phase der Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung stellt die *Identifikation des Handlungsbedarfes* dar. Das Ziel ist die Identifikation der Anregungsinformation. Aus dieser Anregungsinformation wird das Vorliegen eines Entscheidungsproblems und die Notwendigkeit der Durchführung der integrierten Planung durch die Entscheidungsträger abgeleitet. Abhängig von der Herkunft der Anregungsinformation können aus Sicht des Produktionssystems zwei Klassen unterschieden werden: intern induzierter und extern induzierter Handlungsbedarf.

8.1.1 Intern induzierter Handlungsbedarf

Der intern induzierte Handlungsbedarf resultiert aus dem Vorliegen von Ressourcenzuständen im Produktionssystem, welche seitens der Entscheidungsträger der Produktions- und Instandhaltungsplanung als unzureichend oder verbesserungsfähig empfunden werden. Er kann in *planungsbasierten* und *produktionssystembasierten Handlungsbedarf* unterschieden werden.

Resultiert die Anregungsinformation aus dem (nahenden) operativen Abschluss eines integrierten Plans, ist dies dem *planungsbasierten Handlungsbedarf* zuzuordnen. Der Handlungsbedarf wird durch das Erreichen eines bestimmten Zeitpunktes im Planungshorizont mit definierter Länge durch die Entscheidungsträger identifiziert. Dies ist insbesondere für die zyklisch durchzuführende Regelplanung der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung von Bedeutung. Die Regelplanung kann auch als rollierende Planung bezeichnet werden, da sie i. d. R. in regelmäßigen Abständen erfolgt.

Der *produktionssystembasierte Handlungsbedarf* ergibt sich aus Veränderungen der Leistung-Ressourcen-Befähigungen des Produktionssystems oder aus Veränderungen der Leistungsfähigkeiten der Ressourcen des Produktionssystems.

Veränderungen der Leistung-Ressourcen-Befähigungen sind u. a. eine Folge technischer und organisatorischer Anpassungen der Ressourcen des Produktionssystems. Ein Beispiel für eine technische Anpassung ist die Neubefähigung einer Maschine zur Herstellung eines Produktes. Die Veränderung der an einer Ressource angewendeten Instandhaltungsstrategie repräsentiert ein Beispiel für eine organisatorische Anpassung. Die technischen und organisatorischen Anpassungen induzieren neue

Ausführungsalternativen, woraus sich ein neuer Allokationsbereich ergibt. Dieser ist in der Planung zu berücksichtigen. Die Veränderungen der Leistung-Ressourcen-Befähigungen können in regelmäßig durchzuführenden Abstimmungstreffen mit Mitarbeitenden der Produktions- und Instandhaltungsarbeitsplanung identifiziert werden.

Die Veränderungen der Leistungsfähigkeiten der Ressourcen des Produktionssystems ergeben sich aus Abnutzung und Verschleiß durch den Leistungserstellungsprozess. Sie können zum Auftreten von Engpässen im Produktionssystem führen. Die Engpässe können das Erreichen strategischer Ziele und somit den langfristigen wirtschaftlichen Erfolg eines produzierenden Unternehmens gefährden. Folglich besteht in der betrieblichen Realität besonderer Informationsbedarf zur Überwachung der Veränderungen der Leistungsfähigkeiten der Ressourcen sowie zur Identifikation von potenziellen Engpassbereichen im Produktionssystem. In der Planung, Steuerung und Überwachung von Produktionssystemen werden dazu Kennzahlen eingesetzt (J. WEBER ET AL. 1994, S. 2). Kennzahlen sind quantitative Informationen, welche in konzentrierter Form über einen zahlenmäßig erfassbaren Sachverhalt berichten (GLADEN 2003, S. 13). Sie helfen Ziele zu operationalisieren sowie setz- und vorgebbar zu machen (J. WEBER & GROSSKLAUS 1995, S. 14). Zur Identifikation der Veränderungen und potenziellen Engpassbereiche sind durch die Entscheidungsträger der Planungsbereiche zyklisch die jeweils aktuellen Werte der Kennzahlen, die Über- oder Unterschreitung von Grenzwerten, Abweichungen von Zielwerten sowie Trendentwicklungen zu analysieren.

In produzierenden Unternehmen ist i. d. R. der Einsatz mehrerer Kennzahlen zur Überwachung der Veränderungen der Leistungsfähigkeiten der Ressourcen notwendig. Mehrere Kennzahlen können in einem sog. Performance Measurement System (PMS) zusammengeführt werden. Ein PMS beurteilt die Effektivität und Effizienz der Leistung und Leistungspotenziale von Objekten eines Unternehmens (LELKE 2005, S. 29). Ein für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung geeignetes PMS wird in SCHREIBER ET AL. (2020) vorgestellt. Es dient der Identifikation der Veränderungen der Leistungsfähigkeiten der Ressourcen des Produktionssystems. Des Weiteren ermöglicht es die Ermittlung sowohl des von der Produktion als auch von der Instandhaltung geleisteten Beitrages zu den strategischen Erfolgspotenzialen produzierender Unternehmen. Es beinhaltet finanzielle und nicht-finanzielle Kennzahlen aus beiden Planungsbereichen. Das PMS für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung basiert auf dem von J. WEBER & GROSSKLAUS (1995) entwickelten Konzept der selektiven Kennzahlen. Das Konzept der selektiven Kennzahlen wurde zur Erfassung der Logistikleistung entwickelt, welche analog zur Instandhaltung Charakteristika einer

Dienstleistungsfunktion aufweist. Es stellt eine Konstruktionsmethodik für PMS dar (SAGER 2019, S. 119; J. WEBER 2012, S. 324; J. WEBER ET AL. 1997, S. 438). Dies ermöglicht die Übertragbarkeit auf die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung. Des Weiteren zeichnet es sich nach LELKE (2005, S. 55) u. a. durch Konsistenz, Flexibilität, Operationalisierbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Ausgewogenheit aus.

Nachfolgend wird die Entwicklung des PMS für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung vorgestellt. Die Vorstellung erfolgte in ähnlicher Form in SCHREIBER ET AL. (2020). Im ersten Schritt des Konzeptes der selektiven Kennzahlen werden die strategischen Kennzahlen abgeleitet (J. WEBER ET AL. 1994, S. 5). Die Ableitung der strategischen Kennzahlen dient der Identifikation von Kennzahlen, welche zur Absicherung und zum Ausbau der strategischen Erfolgspotenziale beitragen. Im PMS für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung werden die strategischen Kennzahlen nicht, wie in J. WEBER ET AL. (1994) beschrieben, unternehmensindividuell abgeleitet. Es kommt die in J. WEBER & SCHÄFFER (2000, S. 40–41) vorgestellte Ableitung aus den zentralen strategischen Erfolgsfaktoren¹ produzierender Unternehmen zur Anwendung. Dies ermöglicht die Erfüllung der Anforderung der Allgemeingültigkeit (vgl. Abschnitt 3.1). Im zweiten Schritt erfolgt „[...] die Ableitung von Kennzahlen aus koordinationsrelevanten Merkmalen des Leistungssystems“ (J. WEBER ET AL. 1994, S. 6) auf operativer Ebene. Sie ermöglichen die Überprüfung der Realisierbarkeit der strategischen Ziele und dienen der operativen Überwachung der effektiven Abwicklung der Leistungserstellung (J. WEBER 2012, S. 325–326). Im dritten Schritt erfolgt die logische Verbindung der strategischen und operativen Ebene unter Anwendung des Gegenstromverfahrens.

8.1.1.1 Ableitung strategischer Kennzahlen der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Die strategischen Kennzahlen der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung sind in Abschnitt 7.1.4 dargestellt. Den Ansatzpunkt der Ableitung der strategischen Kennzahlen des PMS für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung stellt

¹ J. WEBER & SCHÄFFER (2000, S. 40–41) bezeichnen strategische Erfolgsfaktoren als zentrale Wachstumsfaktoren. Im der vorliegenden Arbeit werden, analog zu ALCALDE RASCH (2000) und GÖTTGENS (1996), Begriffe wie z. B. Wettbewerbs-, Schlüssel-, Wachstumsfaktor unter strategischen Erfolgsfaktoren zusammengefasst, da sie als synonym anzusehen sind. Die Identifikation strategischer Erfolgsfaktoren ist Forschungsgegenstand der Erfolgsforschung.

das Axiom dar, dass das Ziel unternehmerischen Handelns und somit produzierender Unternehmen die Maximierung des Unternehmenserfolges ist (MOSER 2014, S. 17). Der Unternehmenserfolg ergibt sich aus dem Verkauf von Produkten an Kunden, wobei die Produkte in der geforderten Qualität und zum gewünschten Zeitpunkt produziert werden. Daraus lassen sich die Anforderungen der Ausrichtung an einem nachhaltigen und langfristigen Unternehmenserfolg sowie der Kunden-/Marktorientierung als strategische Prämissen und Leistungsanforderungen an das Produktionssystem ableiten. Die aus den strategischen Prämissen und Leistungsanforderungen abgeleiteten strategischen Erfolgsfaktoren werden als Ziele im Zielsystem des multikriteriellen Optimierungsmodells berücksichtigt. Der Anforderung der Übertragbarkeit im Anwendungskontext wird durch die Anwendung des Lösungsverfahrens der Goal-Programming-Methode entsprochen, welches die Festlegung unternehmensspezifischer Zielsysteme ermöglicht.

8.1.1.2 Ableitung operativer Kennzahlen der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Die Ableitung von Kennzahlen auf operativer Ebene aus den koordinationsrelevanten Merkmalen des Leistungssystems dient der operativen Überwachung der effektiven Abwicklung der Leistungserstellung (J. WEBER 2012, S. 325–326). Im Vergleich zu den strategischen Kennzahlen besitzen die operativen Kennzahlen eine kürzere Gültigkeit (J. WEBER 2012, S. 325). In der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung resultiert die kürzere Gültigkeit aus den auftretenden Veränderungen der Leistungsfähigkeiten der Ressourcen des Produktionssystems. Des Weiteren können Maßnahmen des Managements zur Behebung von Engpässen zum Auftreten von Engpässen an anderer Stelle des Produktionssystems führen. Die operativen Kennzahlen des PMS müssen folglich in regelmäßigen Abständen überprüft und bei Bedarf angepasst werden.

Nach J. WEBER (2012, S. 326) sind als potenzielle Engpassbereiche des Produktionssystems die kritischen Leistungsentpässe und die kritischen Effizienztreiber abzubilden sowie die potenziell kritischen Entwicklungen aufzuzeigen. Aufgrund der spezifischen Charakteristika der Produktionssysteme von produzierenden Unternehmen ist die Auswahl der Kennzahlen zur Überwachung der effektiven Abwicklung der Leistungserstellung unternehmensspezifisch vorzunehmen. In SCHREIBER ET AL. (2020) werden potenzielle Kennzahlen für die Produktion und Instandhaltung vorgestellt. Beispiele für häufig in Produktionssystemen erhobene Kennzahlen sind nach HENKE ET AL. (2019, S. 25) die Overall Equipment Effectiveness (OEE), die Anlagenverfügbarkeit und die

Instandhaltungsquote. Die Auswahl der jeweiligen Kennzahlen für die kritischen Leistungsengpässe, Effizienztreiber und potenziell kritischen Entwicklungen erfolgt durch das Management und ist mittels des Analytic Hierarchy Process (AHP) nach SAATY (2008) durchzuführen (SCHREIBER ET AL. 2020).

8.1.1.3 Verbindung von strategischen und operativen Kennzahlen der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Die Verbindung der strategischen und operativen Kennzahlen erfolgt unter Anwendung des Gegenstromverfahrens. Ziel des Vorgehens ist die Sicherstellung der Konsistenz des Kennzahlensystems sowie die Identifikation von Wirkzusammenhängen (J. WEBER ET AL. 1994, S. 10). Es werden nach J. WEBER ET AL. (1997, S. 449) vier Fälle der Kennzahlenverbindung unterschieden: (1) empirisch-sachlogischer Zusammenhang, (2) mathematisch-funktionaler Zusammenhang, (3) Identität und (4) kein Zusammenhang. Ein empirisch-sachlogischer Zusammenhang ergibt sich aus der Betrachtung desselben Sachverhaltes durch verschiedene Größen. Ein mathematisch-analytischer Zusammenhang erfolgt aus einer mathematischen Verbindung. Im Fall der Identität entsprechen sich strategische und operative Kennzahlen. Kein Zusammenhang besteht, wenn strategische Kennzahlen nicht in den operativen Kennzahlen der Leistungserstellung berücksichtigt werden. Neben den Wirkzusammenhängen sind des Weiteren die Beziehungsarten der Kennzahlen zu analysieren. Die in Konkurrenz zueinander stehenden Kennzahlen sind von besonderer Bedeutung, da eine Abwägung zwischen strategischen Zielen und operativer Umsetzung erforderlich ist (SAGER 2019, S. 120). Nachfolgend werden die Wirkzusammenhänge und Beziehungsarten im PMS für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung identifiziert und analysiert.

Die Realisierung eines kostenoptimalen integrierten Plans für eine Planungsperiode führt zur Minimierung der Lagerbestände von Zwischen- und Endprodukten. Des Weiteren werden Instandhaltungsleistungen fokussiert, welche zur Durchführung der Leistungserstellungsprozesse der Produktion benötigt werden, z. B. Instandsetzung eines Fertigungsmittels ohne Ausführungsalternative. Zur Reduktion der Kosten im aktuellen Planungshorizont werden keine nicht unmittelbar benötigten Instandhaltungsleistungen eingeplant. Dies kann jedoch langfristig zu einer Zunahme der kritischen Leistungsengpässe im Produktionssystem führen. Eine starke Gewichtung des Ziels Zeit in der Planung führt zur Reduzierung der Wechsel von Leistungen, Equipments und Betriebsmodi. Darüber hinaus werden Leistungen im schnellsten Betriebsmodus

8.1 Identifikation des Handlungsbedarfes

der jeweiligen Ressourcenkombination durchgeführt. Das Resultat ist die Realisierung der maximalen Ausbringung des Produktionssystems. Dies ermöglicht einerseits die Durchführung zusätzlicher Leistungen in Planungsperioden mit hohen Bedarfsmengen, andererseits kann dies erhöhten Verschleiß der Ressourcen verursachen. Der erhöhte Verschleiß der Ressourcen kann zu verschlechterten Qualitätsraten, verminderten Verfügbarkeiten und zum Auftreten von Leistungsengpässen führen. Die Maximierung der Qualität als Planungsziel führt vor Planungsperioden mit hohen Bedarfen zu erhöhten Lagerbeständen von Zwischen- und Endprodukten. Dies kann in erhöhten Kapitalbindungskosten und Verschleiß an den Ressourcen des Produktionssystems resultieren sowie im Planungshorizont zu zusätzlichem Bedarf an Instandhaltungsleistungen führen. Die Maximierung der Flexibilität ermöglicht die kurzfristige Realisierung zusätzlicher Leistungen. Es werden große Losgrößen und wenige Wechsel zur Maximierung der freien Kapazität des Produktionssystems präferiert. Dadurch kann es zu erhöhten Lagerbeständen kommen.

Das Performance Measurement System für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung ist in Abbildung 8.2 dargestellt.

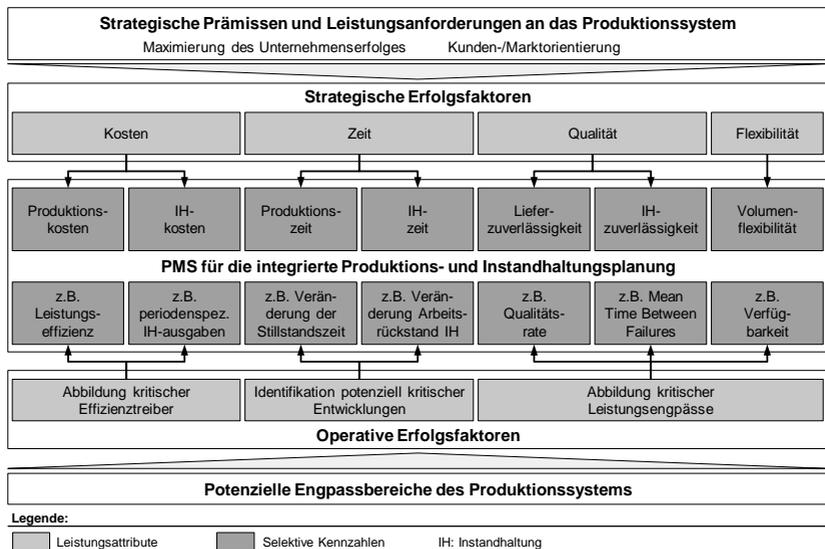


Abbildung 8.2: Performance Measurement System für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung

8.1.2 Extern induzierter Handlungsbedarf

Der extern induzierte Handlungsbedarf resultiert aus Veränderungen der kunden- bzw. marktseitigen Nachfrage. Die Änderung der Nachfrage erfordert aus Sicht der Produktions- und Instandhaltungsplanung die Anpassung der zeitlich vorgelagerten, unternehmensinternen Produktionsprogrammplanung und führt zu veränderten Bedarfen an Endprodukten des Leistungsportfolio der Produktion. Die Information ist aufgrund der Herkunft aus Sicht des Produktionssystems als extern zu klassifizieren. Die Veränderungen der Bedarfe können mittels regelmäßiger Abrufe der im ERP-System des Unternehmens hinterlegten Informationen oder mittels Überprüfung der Produktionsprogramme identifiziert werden.

8.2 Definition der Aufgabenstellung

Als Ergebnis der ersten Phase liegt eine Anregungsinformation vor, welche die Existenz eines Entscheidungsproblems und die Notwendigkeit der Durchführung der integrierten Planung anzeigt. Das Ziel der zweiten Phase *Definition der Aufgabenstellung* ist es das anwendungsfallsspezifische Entscheidungsproblem der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung zu beschreiben. Es sind zunächst die Systemgrenze und das Aggregationsniveau durch die Entscheidungsträger festzulegen. Anschließend erfolgen die Bestimmung des Leistungsportfolios, der Entscheidungsdimensionen sowie des Planungshorizontes und der Planungsperioden. Die Ermittlung der Planungsrestriktionen bildet den Abschluss der Phase.

8.2.1 Definition der Systemgrenze und des Aggregationsniveaus

Die Definition der Systemgrenze und des Aggregationsniveaus dient der Abgrenzung und Strukturierung des Produktionssystems im System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung. Zur Definition der Systemgrenze müssen der Betrachtungsumfang und zur Definition des Aggregationsniveaus die Betrachtungstiefe festgelegt werden. Die Definition erfolgt auf Basis der Struktur des in Kapitel 7 vorgestellten Optimierungsmodells und unter Abwägung der Modellgenauigkeit und des Modellierungsaufwandes. Sie ist unternehmensspezifisch vorzunehmen, in jeder Planung durch die Entscheidungsträger auf Aktualität zu überprüfen und bei Bedarf anzupassen.

Die Definition der Systemgrenze bezieht sich auf die im Entscheidungsprozess zu betrachtenden Segmente des Produktionssystems. Im Rahmen des Leistungserstellungsprozesses wird durch den zielgerichteten Einsatz von Produktionsressourcen Input zu Output transformiert (vgl. Abschnitt 1.4.1.1). Folglich ist zu definieren, welche Ausgangsprodukte den Input und welche Endprodukte den Output des Produktionssystems repräsentieren. Entscheidungskriterien für die Zugehörigkeit zum Produktionssystem oder zur Umgebung sind die bestehenden Interdependenzen und Abhängigkeiten zwischen den Ressourcen der Segmente. Das Optimierungsmodell synchronisiert den Einsatz der in den Segmenten vorhandenen Ressourcen zur Durchführung der Leistungen. Folglich sind die Segmente von besonderer Bedeutung, in denen sich die Ressourcen befinden, unter deren Einsatz die Leistungen durchgeführt werden. Zur Festlegung des Betrachtungsumfangs besteht somit die Notwendigkeit, im jeweiligen Anwendungsfall die bestehenden Interdependenzen und Abhängigkeiten der Ressourcen der Segmente mittels Materialfluss- und Prozessanalysen zu identifizieren.

Das Aggregationsniveau bezieht sich auf die in den Ebenen des Produktionssystems zu betrachtenden Ressourcen (vgl. Abschnitt 1.4.1.2). Obwohl die Betrachtungstiefe mit Linien, Maschinen und Equipments durch das Optimierungsmodell vorgegeben ist (vgl. Kapitel 7), muss eine anwendungsfallspezifische Definition durch die Entscheidungsträger auf Basis der Ergebnisse der Materialfluss- und Prozessanalysen erfolgen. Entscheidungsgrundlage für die Definition der Betrachtungstiefe sind die existierenden Engpassbereiche und -ressourcen, da diese maßgeblich den Output bestimmen. Ein weiteres Entscheidungskriterium sind die im Entscheidungsprozess zu berücksichtigenden Produktions- und Instandhaltungsleistungen. Gemäß den Informationsmodellen und dem Optimierungsmodell können in der Planung nur Leistungen berücksichtigt werden, die an bzw. unter Einsatz von modellierten Ressourcen erfolgen (vgl. Kapitel 6).

8.2.2 Auswahl des Leistungsportfolios und der Entscheidungsdimensionen

Die Auswahl des Leistungsportfolios ist unter Berücksichtigung des Anwendungsfalles durchzuführen. Es werden Produktions- und Instandhaltungsleistungen unterschieden (vgl. Abschnitt 7.1.2). Als Produktionsleistungen können Zwischen- und Endprodukte abgebildet werden. Entscheidungskriterien für die Differenzierung innerhalb der definierten Systemgrenze sind die Produktstruktur, die zur Herstellung eingesetzten Ressourcenkombinationen sowie die Existenz von Puffern und Lagern im Materialfluss.

Als Instandhaltungsleistungen können ortsabhängige und ortsflexible Leistungen der zeit- und zustandsorientierten Instandhaltungsstrategien abgebildet werden. Die durch das Optimierungsmodell vorgegebene Modellierung von Maschinen und Equipments als nicht weiter unterteilbare Ressourcen führt dazu, dass keine Instandhaltungsleistungen an einzelnen Funktionseinheiten oder Komponenten einer Ressource abgebildet werden können. Diese Vereinfachung steht im Einklang mit der betrieblichen Realität und dient der Reduzierung der Planungskomplexität. In realen Produktionssystemen kann aufgrund der Vielzahl an Ressourcen seitens der Instandhaltungsplanung i. d. R. nicht für jede Funktionseinheit bzw. Komponente eine Planung von präventiven Instandhaltungsleistungen erfolgen. Die Abbildung von Instandhaltungsleistungen an Funktionseinheiten oder Komponenten kann mittels der Gruppierung in einer Leistung unter Anpassung des Zeitintervalls bzw. Zustandsparameters erfolgen, ab wann eine zustandsorientierte Instandhaltungsleistung durchgeführt werden soll (BASRI ET AL. 2017, S. 136). Ein Vorgehen zur Erstellung einer Ressourcenstruktur für die Gruppierung von Instandhaltungsleistungen ist in VDI 2888 dargestellt. Bei der Auswahl des Leistungsportfolios bestehen Interdependenzen mit der Definition des Aggregationsniveaus, da nur Leistungen berücksichtigt werden können, die an bzw. unter Einsatz von modellierten Ressourcen erfolgen.

Die Entscheidungsdimensionen der Produktionsplanung sind in Abschnitt 1.4.2.3 und die Entscheidungsdimensionen der Instandhaltungsplanung in Abschnitt 1.4.3.3 dargestellt. Die Entscheidungsdimensionen sind anwendungsfallsspezifisch auszuwählen.

8.2.3 Definition des Planungshorizontes und der Planungsperioden

Die Definition des Planungshorizontes und der Planungsperioden hat zum Ziel, die Länge des Planungszeitraumes sowie dessen Unterteilung festzulegen. Die Struktur der Zeit ist entsprechend der Modellierung im Optimierungsmodell in Mikro- und Makroperioden vorzunehmen (vgl. Abschnitt 7.1.1). Die Anzahl der Mikro- und Makroperioden geht als Vorgabe der Entscheidungsträger in die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung ein. Die Entscheidung ist unter Berücksichtigung von betrieblichen, planerischen und mathematischen Kriterien zu treffen. Betriebliche Kriterien sind bspw. seitens der Unternehmensführung vorgegebene Betriebs- und Schichtmodelle. Die im Unternehmen verwendeten Planungszeiträume sowie die Durchführungszeiten der Leistungen stellen die planerischen Kriterien dar. Die mathematischen Kriterien beinhalten die Anzahl möglicher Zustandswechsel im Produktionssystem sowie die

resultierende Problemgröße. Die Anzahl der Mikroperioden begrenzt die Anzahl der möglichen Zustandswechsel der Ressourcen des Produktionssystems innerhalb einer Makroperiode, z. B. die Anzahl der Leistungswechsel. Die Vorgabe einer geringen Anzahl an Mikroperioden führt somit zu Einschränkungen des Lösungsraumes sowie zu Einschränkungen der Lösbarkeit des Entscheidungsproblems. Gleichzeitig steigt die Problemgröße mit der Anzahl der Mikroperioden an, was sich auf die benötigte Lösungszeit auswirkt. In der betrieblichen Realität oftmals zur Anwendung kommende Planungshorizontlängen sind Wochen oder Monate mit Planungsperioden von Schichten oder Tagen.

8.2.4 Ermittlung der Planungsrestriktionen

In der betrieblichen Realität existieren Planungsrestriktionen, welche bei der Ermittlung der Handlungsalternativen zu berücksichtigen sind. Diese Restriktionen beschränken den Lösungsraum des Entscheidungsproblems und unterbinden, dass Handlungsalternativen gegeneinander abgewogen werden, die nicht realisiert werden können oder sollen. Dies kann die Entscheidungsfindung vereinfachen und beschleunigen (SAGER 2019, S. 124–125; LAUX ET AL. 2018, S. 14).

In der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung bestehen planerische und technische Restriktionen. Die planerischen Restriktionen leiten sich aus den Vorgaben des Managements sowie den betrieblichen Abläufen ab. Sie umfassen beispielsweise Vorgaben zu Mindestbeständen von Zwischen- und Endprodukten oder Vorgaben zur Lieferzuverlässigkeit. Des Weiteren sind die kapazitiven Einschränkungen im Betrieb des Produktionssystems zu erfassen, z. B. die reduzierte Planbelegungszeit einer Maschine. Die technischen Restriktionen leiten sich aus Restriktionen des Produktionssystems ab, z. B. die maximale Kapazität des Lagers für Produkte. Aufgrund der unternehmensspezifischen Vorgaben ist kein allgemeingültiges Vorgehen zur Ermittlung der Planungsrestriktionen abbildbar.

8.3 Präzisierung der Zielsysteme

Zur Ermittlung der Handlungsalternativen sind mehrere Zielsysteme erforderlich. Die vier Zielgrößen Kosten, Zeit, Qualität und Flexibilität des Zielsystems für die integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung sind aus den strategischen Erfolgsfaktoren

produzierender Unternehmen abgeleitet und somit unternehmensneutral (vgl. Abschnitt 7.1.4). Die Präzisierung der Zielsysteme erfolgt durch die Entscheidungsträger mittels unternehmensspezifischer Adaption der Zielwerte und der Gewichtungsfaktoren für die Zielgrößen des Zielsystems. Aufgrund von unternehmensspezifischen Vorgaben kann kein allgemeingültiges Vorgehen formuliert werden. Die Anzahl der mit unterschiedlichen Zielwerten und der Gewichtungsfaktoren spezifizierten Zielsysteme bestimmt die Menge der Handlungsalternativen. Folglich beeinflusst die Anzahl der Zielsysteme die für die Entscheidungsträger zur Bewertung und Auswahl zur Verfügung stehende Menge an integrierten Produktions- und Instandhaltungsplänen.

8.4 Datenerhebung

In der Phase *Datenerhebung* sind die erforderlichen Planungsinformationen des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung zu erfassen. Dieser Phase kommt eine besondere Bedeutung zu, da die Nutzung von Modellen zur Entscheidungsfindung Daten in hoher Güte erfordert. Die Güte der Planung wird von der Qualität der Eingangsdaten determiniert (W. KÜHN 2006, S. 105). Des Weiteren kann die Datenerhebung einen beträchtlichen Zeitanteil des Planungsprozesses einnehmen. Der prozentuale Anteil der Informationsbeschaffung an den Tätigkeiten eines Planers wird in der Fachliteratur mit 23 % bis 60 % angegeben (BRACHT ET AL. 2018, S. 65; MARCZINSKI 2005; BRACHT 2002). Trotz der Abhängigkeit der Datenerhebung vom konkreten Anwendungsfall lässt sich durch die Informationsmodelle (vgl. Kapitel 6) ein allgemeines Vorgehen zur Datenerhebung ableiten. Es basiert auf dem elaborierten Vorgehen der Datenanalyse Cross-Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM) nach CHAPMAN ET AL. (2000) sowie dem Vorgehen zur Analyse des Ausfallverhaltens von Ressourcen nach KRÖNING (2014, S. 82). Das Vorgehen umfasst insgesamt fünf Vorgehensschritte. Aufgrund von bestehenden Interdependenzen zwischen den Vorgehensschritten kann es in Abhängigkeit des spezifischen Anwendungsfalls sinnvoll sein, die Abfolge der Vorgehensschritte anzupassen bzw. aufgrund von gewonnenen Erkenntnissen einen vorherigen Vorgehensschritt erneut auszuführen.

Im ersten Vorgehensschritt *Informationsbedarfsbestimmung* erfolgen die Identifikation des Informationsbedarfes sowie die Bestimmung und Auswahl der Datenquellen. Die Ausgangsbasis der Informationsbedarfsbestimmung stellen die im Rahmen der Definition der Aufgabenstellung (vgl. Abschnitt 8.2) festgelegten Systemgrenzen, das

gewählte Aggregationsniveau sowie das Leistungsportfolio dar. Für alle an den Leistungserstellungsprozessen beteiligten Ressourcen des Produktionssystems sowie für die Leistungen sind aus vorherigen Planungen bereits vorhandene Informationen zu ermitteln sowie deren Aktualität zu prüfen. Es sind die Ressourcen und Leistungen auszuwählen, für die Informationsbedarf besteht. Anschließend sind die Informationen zu identifizieren, die eine Analyse zur Ermittlung statistisch abgesicherter Werte erfordern. Entscheidungsgrundlage sind u. a. die Verfügbarkeit von historischen Daten der Ressourcen des Produktionssystems sowie die Häufigkeit des Auftretens von Ereignissen. Für diese Informationen ist ein Analysezeitraum der Daten des Produktionssystems festzulegen, der die statistische Absicherung ermöglicht. Anschließend sind verfügbare Datenquellen zu identifizieren und auf Nutzbarkeit zu überprüfen. Potenzielle Datenquellen stellen die Informationssysteme, z. B. ERP, MES, IPS (vgl. Abschnitt 2.3), Dokumentationssysteme, wie z. B. Schichtbücher & -pläne, sowie Erfahrungswissen von Bereichsexperten, Gesetze und Richtlinien, Angaben des Herstellers der Ressource (vgl. VDI 2885) und Vorgaben der übergeordneten Planungsbereiche dar (SALONEN & GOPALAKRISHNAN 2020). Darüber hinaus können zur Erhebung der Informationen für Instandhaltungsleistungen die Maschinenüberwachungssysteme (engl. *Condition Monitoring Systems, CMS*) der Ressourcen des Produktionssystems dienen. CMS befinden sich teilweise noch im Forschungsstadium², jedoch zeigt sich, dass die Fähigkeiten der CMS von Überwachung und Anzeige von Veränderungen des Zustandes von Komponenten bis hin zur frühzeitigen Identifikation von Bedarfen für Instandhaltungsleistungen kontinuierlich zunehmen (KRÖNING 2014, S. 42). Existieren keine geeigneten Datenquellen, so ist eine Datenerhebung durchzuführen. Sie umfasst die Auswahl der Erhebungsmethoden, die Vorbereitung und Durchführung der Erhebung sowie die Erhebungsvalidierung. Mit der Auswahl der Datenquellen erfolgt die Festlegung der zu analysierenden Daten der Ressourcen des Produktionssystems und der Leistungen für die Erhebung der Planungsinformationen des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung.

Im zweiten Vorgehensschritt *Datenerfassung* sind die Daten der ausgewählten Datenquellen ggf. unter Berücksichtigung des definierten Analysezeitraums zu extrahieren. Anschließend ist eine Sichtung, Überprüfung auf Vollständigkeit und Konsistenz sowie Plausibilisierung durchzuführen. Die erfassten Daten sind als Rohdaten zu speichern.

² Verfahren und Methoden von CMS werden u. a. in LEI ET AL. (2018), GOYAL & PABLA (2015), KRÖNING (2014), SI ET AL. (2011) sowie JARDINE ET AL. (2006) vorgestellt.

8 Methode

Die Zusammenführung von Daten aus unterschiedlichen Datenquellen, welche zu einer Ressource bzw. Leistung zugehörig sind, ist Bestandteil des dritten Vorgehensschritts *Vorverarbeitung*. Es erfolgen eine Datenstrukturierung sowie die Definition von Relationen und Klassen. Für relevante Relationen und Klassen sind eine Bereinigung der Daten um unvollständige oder fehlerhafte Daten sowie eine Filterung der Dateninstanzen vorzunehmen. Abschließend sind die spezifischen Vorverarbeitungsverfahren der anschließenden Datenanalyse auszuführen.

Im vierten Vorgehensschritt *Datenanalyse* erfolgt zur Generierung eines besseren Verständnisses zunächst eine explorative Analyse der Daten. Anschließend sind geeignete Verfahren der Datenanalyse zu identifizieren und auszuwählen. Sie sind anzuwenden und die Ergebnisse zu sichten. Im Fall des Einsatzes von Verfahren des Maschinellen Lernens sind Trainings und Tests von Modellen sowie eine Modelloptimierung durchzuführen. Des Weiteren sind in der Datenanalyse für jede existierende Leistungs-Ressourcen-Befähigung die planerischen und technischen Informationen zu ermitteln. Für die Endprodukte der Produktionsleistungen des Leistungsportfolios sind u. a. die Bedarfsmengen und Bedarfszeitpunkte innerhalb des Planungshorizontes auf Basis der Makroperioden zu bestimmen. Darüber hinaus ist durch Angabe des Materialbedarfskoeffizienten der Bedarf an Zwischenprodukten für ein Endprodukt zu ermitteln. Die Informationen können aus der Stücklistenstruktur der Endprodukte erhoben werden. Die zu bestimmenden Informationen der zeit- und zustandsorientierten Instandhaltungsleistungen sind u. a. Bedarfszeitpunkte der zeitorientierten Instandhaltungsleistungen, Verschleißraten, Zustandsparameter sowie die Verschleißgrenzen der Ressourcen für zustandsorientierte Instandhaltungsleistungen. Eine Einordnung der durch die Planungsbereiche zu erfassenden Informationen, Indexmengen und Parameter des Optimierungsmodells in die Informationsmodelle ist im Anhang dargestellt (vgl. Anhang B).

Die *Validierung und Überführung in Informationsmodelle* als fünfter Vorgehensschritt umfasst die Überprüfung der Ergebnisse der Datenanalyse in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Prozessexperten. Die Datenerhebung zur Ermittlung von Informationen endet mit der Validierung und Nutzbarkeitsbewertung. Zur Bereitstellung der Informationen im System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung sind diese abschließend in die Informationsmodelle zu überführen (vgl. Kapitel 6). Als Resultat liegen alle Informationen zur Entwicklung der Handlungsalternativen vor.

8.5 Entwicklung von Handlungsalternativen

Die Ermittlung der integrierten Produktions- und Instandhaltungspläne erfolgt in der Phase *Entwicklung der Handlungsalternativen*. Die integrierten Produktions- und Instandhaltungspläne stellen die Handlungsalternativen der Entscheidungsträger der Planungsbereiche dar. Die Ermittlung der integrierten Pläne erfolgt unter Einsatz der in der Phase *Präzisierung der Zielsysteme* (vgl. Abschnitt 8.3) entwickelten Zielsysteme sowie des Optimierungsmodells (vgl. Kapitel 7). Der Lösungsraum des Entscheidungsproblems ist durch die Restriktionen implizit definiert. Die Goal-Programming-Methode als implementiertes Lösungsverfahren für das multikriterielle Optimierungsmodell erfordert, dass zunächst für jede Zielgröße des Zielsystems der jeweilige Optimalwert zu ermitteln ist. Folglich ist zunächst ein monokriterieller Optimierungslauf für die jeweilige Zielfunktion Kosten, Zeit, Qualität und Flexibilität durchzuführen. Die ermittelten Ergebnisse der Optimierungsläufe sind für jede Zielfunktion zu dokumentieren sowie die Maximal- und Minimalausprägungen zu bestimmen. Die anschließende Normierung der Zielgrößen ist derart durchzuführen, dass der Nutzwert der Zielgröße den Wert eins annimmt, wenn der ermittelte Optimalwert der jeweiligen Zielgröße erreicht wird. Der Nutzwert soll hingegen den Wert null annehmen, wenn er die aus Sicht des jeweiligen Optimierungszieles bestimmte negativste Ausprägung annimmt. Anschließend sind die Handlungsalternativen unter Anwendung der präzisierten Zielsysteme zu ermitteln. Die Ausprägungen der Entscheidungsvariablen der im Optimierungslauf durch den Lösungsalgorithmus ermittelten Lösung beschreiben die Handlungsalternative vollständig (SAGER 2019, S. 131). Mit Abschluss der Entwicklung der Handlungsalternativen wird das MODM-Problem in ein MADM-Problem überführt, da nur noch eine explizite Anzahl an Handlungsalternativen vorliegt (SAGER 2019, S. 131).

8.6 Bewertung

Die ermittelten Handlungsalternativen werden in der Phase *Bewertung* durch die Entscheidungsträger der Produktions- und Instandhaltungsplanung detailliert analysiert und bewertet. Die Analyse und Bewertung ist unternehmensindividuell durchzuführen. Der Einsatz des PMS für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung (vgl. Abschnitt 8.1.1) stellt dafür eine zeiteffiziente Methode dar. Mittels einer Gegenüberstellung der berechneten Ausprägungen der Zielgrößen je Handlungsalternative kann die Analyse und Bewertung durchgeführt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit

8 Methode

des Einsatzes weiterer elaborierter Methoden, wie bspw. der Simulation der Handlungsalternativen. Die zu analysierenden und zu bewertenden integrierten Produktions- und Instandhaltungspläne werden in einzelnen Simulationsläufen unter Anwendung eines Simulationsmodells des Produktionssystems ausgeführt. Der Stand der Erkenntnisse hält für die Analyse und Bewertung elaborierte Methoden, wie sie bspw. in KRÖNING (2014) vorgestellt werden, bereit.

8.7 Auswahl

Die *Auswahl einer Handlungsalternative* aus der Menge der Handlungsalternativen stellt die letzte Phase der Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung dar. Die Entscheidungsträger der Produktions- und Instandhaltungsplanung treffen auf Basis der in den vorherigen Prozessphasen gewonnenen Erkenntnisse die Entscheidung. Mit der Auswahl einer Handlungsalternative ist der Entscheidungsprozess abgeschlossen. Das Ergebnis stellt für den Planungshorizont den im Produktionssystem zu realisierenden integrierten Produktions- und Instandhaltungsplan dar.

9 Anwendung und Bewertung des Systems

In diesem Kapitel wird die Anwendung und Bewertung des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung vorgestellt. In Abschnitt 9.1 wird die Pilotanwendung des Systems vorgestellt. Der Abschnitt 9.2 beinhaltet die Erkenntnisse aus der Pilotanwendung. Des Weiteren erfolgt die Bewertung der Zielerreichung und der Wirtschaftlichkeit des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung (Abschnitt 9.4). Abschließend werden in Abschnitt 9.5 die bestehenden Limitationen und Anwendungsfälle des Systems analysiert.

9.1 Pilotanwendung des Systems

Das Ziel der Pilotanwendung ist die Demonstration der Funktionsweise des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung. Die Darstellung erfolgt anhand der in Kapitel 8 vorgestellten Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung.

Im Rahmen der Pilotanwendung wird ein realer Anwendungsfall eines produzierenden Unternehmens der Haushaltsgeräteindustrie betrachtet. Das produzierende Unternehmen verfügt über ein Produktionsnetzwerk mit mehreren Standorten. In der vorliegenden Arbeit wird ein Standort fokussiert, an dem hochwertige Geschirrspüler in über 1.700 Varianten mit einem Gesamtvolumen von ca. 2,7 Millionen Stück im Jahr hergestellt werden. Die in den nachfolgenden Abschnitten dargestellten Informationen sind diesem realen Anwendungsfall entnommen. Aus Gründen der Geheimhaltung wurden sie jedoch teilweise verfremdet oder entfernt.

Im Produktionssystem am Standort bestehen vielfältige Interdependenzen zwischen der Produktions- und Instandhaltungsplanung. Die Produktionsplanung bestimmt die Abläufe der Produktionsleistungen für eine hohe Anzahl an Produkten. Die Produktionsleistungen führen zu Verschleiß an den eingesetzten Maschinen und Fertigungsmitteln. Die Leistungsfähigkeit der Ressourcen wird durch geplante Instandhaltungsleistungen

9 Anwendung und Bewertung des Systems

sichergestellt, welche einen Anteil von 85 % an allen Instandhaltungsleistungen des Produktionssystems haben. Das Ergebnis der Instandhaltungsleistungen sind Ressourcen im neuwertigen Zustand. Darüber hinaus stehen die Ressourcen aufgrund ihrer hohen Investitions- und Betriebskosten nur in begrenzter Anzahl und Kapazität zur Verfügung. Daraus leitet sich die Notwendigkeit ab, die Einsätze der Ressourcen zu synchronisieren. Aufgrund der sich zeigenden Charakteristika ist das Fallbeispiel als repräsentativ und geeignet für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung anzusehen.

9.1.1 Identifikation des Handlungsbedarfes

Die Anregungsinformation für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung folgt im Fallbeispiel aus der zyklisch durchzuführenden Regelplanung. Sie ist somit dem planungsbierten Handlungsbedarf zuzuordnen. Die Regelplanung dient der Bestimmung der Leistungsreihenfolgen im Planungshorizont, der Integration der veränderten Zustände der Ressourcen des Produktionssystems sowie der Berücksichtigung der veränderten Bedarfe. Diese Informationen können sich seit der letzten Regelplanung aufgrund von Anpassungen sowie Abweichungen in der operativen Ausführung verändert haben. In der Planung sind folglich die aktualisierten Bedarfe der Produktions- und zeitorientierten Instandhaltungsleistungen, die Lagerbestände sowie Lieferrückstände der Produktionsleistungen, die vorzeitig und verspätet durchgeführten zeitorientierten Instandhaltungsleistungen sowie die aktuellen Zustände der Ressourcen des Produktionssystems zu berücksichtigen.

9.1.2 Definition der Aufgabenstellung

Gemäß der Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung ist nach der Identifikation des Handlungsbedarfes die Aufgabenstellung zu definieren.

Definition der Systemgrenze und des Aggregationsniveaus: Am Standort des produzierenden Unternehmens befinden sich die Segmente der Vorfertigung, der Montage, der Logistik sowie der Entwicklung. Die Vorfertigung gliedert sich in sechs Untersegmente zur Herstellung von Komponenten der Geschirrspüler, ein Untersegment der Instandhaltung sowie ein Teilelager, welches die Vorfertigung von der Montage materialflusstechnisch entkoppelt. Die Montage besteht aus insgesamt sieben parallelen Montagelinien, in denen die Varianten der Geschirrspüler montiert werden. Die Logistik

übernimmt die Aufgabe des Versandes der Produkte an Kunden, Absatzmärkte sowie andere Standorte des Produktionsnetzwerkes. In der Entwicklung erfolgt die Neu- und Weiterentwicklung der Geschirrspüler.

Im Fokus der vorliegenden Arbeit liegt das Segment der Vorfertigung zur Herstellung von Blechbauteilen, welche Komponenten der Geschirrspüler sind. In Abstimmung mit den Entscheidungsträgern der Produktions- und Instandhaltungsplanung wurden die bestehenden Relationen der Ressourcen zwischen den Untersegmenten analysiert. Es wurden intensive Interdependenzen der Ressourcen zwischen den Untersegmenten der Pressenlinien zur Herstellung der Blechbauteile und der Instandhaltung identifiziert. Sie folgen aus dem hohen Verschleiß der Ressourcen in der Blechumformung und dem daraus folgenden Bedarf an Instandhaltungsleistungen. Nur geringe Interdependenzen wurden zwischen den einzelnen Untersegmenten der Herstellung der Komponenten für die Geschirrspüler identifiziert, da nur wenige Betriebsmittel existieren, die in verschiedenen Untersegmenten eingesetzt werden. Des Weiteren ist eine Betrachtung der Montage sowie der Entwicklung aufgrund von geringen Interdependenzen nicht erforderlich. Folglich werden die Segmente der Pressenlinien und Instandhaltung als Produktionssystem des Fallbeispiels definiert. Der Input der Pressenlinien sind Coils und der Output Blechbauteile.

Das Segment der Pressenlinien beinhaltet insgesamt zwei Pressenlinien, welche als Linien L1 und L2 modelliert werden. Die Pressenlinien bestehen jeweils aus acht Maschinen, in denen die Arbeitsvorgänge zur Herstellung der Blechbauteile durchgeführt werden. In jeder Pressenlinie befindet sich eine Breitbandpresse, welche die Engpassressource der jeweiligen Produktionslinie darstellt. Die Breitbandpressen werden als Maschinen M1 und M2 bezeichnet. An den Breitbandpressen werden insgesamt 18 verschiedene Umformwerkzeuge zur Herstellung der Blechbauteile eingesetzt. Sie stellen die Equipments der Produktion dar.

Die Instandhaltung setzt sich aus den Bereichen des Werkzeugbaus und des Maschinenpools zusammen. Im Werkzeugbau werden die Instandhaltungsleistungen an den Umformwerkzeugen von Instandhaltern unter Einsatz von Werkzeugen durchgeführt. Die Ressourcen der Instandhaltung des Werkzeugbaus und des Maschinenpools werden vereinfachend als Werkstatt W1 modelliert. Die Durchführung der Instandhaltungsleistungen erfolgt sequenziell. Die Umformwerkzeuge repräsentieren die Instandhaltungsobjekte. Des Weiteren ist die Instandhaltung für die Durchführung von Instandhaltungsleistungen an den Pressenlinien verantwortlich. Sie werden von Instandhaltern unter

9 Anwendung und Bewertung des Systems

Einsatz von Werkzeugen durchgeführt. Die erforderlichen Ressourcenkombinationen werden als Equipments der Instandhaltung zusammengefasst. Das Produktionssystem sowie ein beispielhafte Blechbauteile sind in Abbildung 9.1 dargestellt.

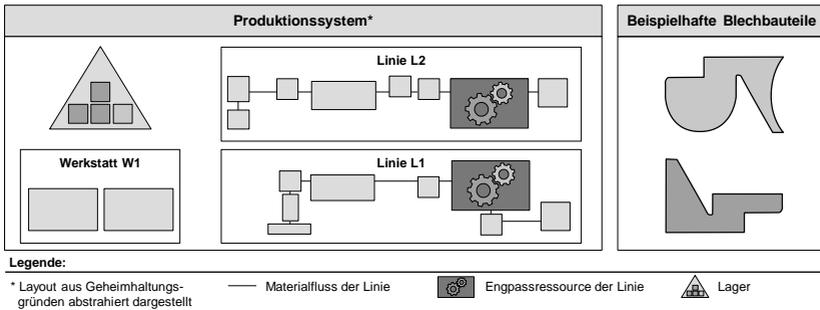


Abbildung 9.1: Produktionssystem und beispielhafte Blechbauteile als Endprodukte des Fallbeispiels

Auswahl des Leistungsportfolios und der Entscheidungsdimensionen: Im Produktionssystem werden insgesamt 19 verschiedene Blechbauteile hergestellt. Sie sind als Produktionsleistungen abzubilden. Die Durchführung einer Produktionsleistung erfolgt unter Einsatz der Ressourcen Maschine und Equipment. Alle Ressourcen müssen sich im Leistungszeitraum am selben Ort befinden. Innerhalb der definierten Systemgrenze werden gemäß den Produktstrukturen keine Baugruppen oder Einzelteile zur Herstellung der Blechbauteile benötigt. Folglich ist keine Modellierung von Zwischenprodukten sowie Materialflussbeziehungen zwischen Linien erforderlich. Die 19 Blechbauteile stellen die Endprodukte des Leistungsportfolios der Produktion dar. Die Blechbauteile P12 und P13 sind auf beiden Pressenlinien M1 und M2 befähigt. Des Weiteren ist die Herstellung von zwei Blechbauteilen an der Maschine M1 mit zwei baugleichen Umformwerkzeugen möglich. Das Blechbauteil P10 kann mit den Equipments E8 und E9 und das Blechbauteil P11 mit E10 und E11 hergestellt werden.

Die Bedarfe an Endprodukten ergeben sich aus den Bedarfen der Montage am selben Standort sowie aus den Bedarfen der anderen Standorte im Produktionsnetzwerk. Sie werden in der Produktionsprogrammplanung zusammengeführt und der Produktionsplanung zur Verfügung gestellt. Folglich können die Bedarfe an Endprodukten im Planungshorizont als bekannt angenommen und makroperiodenspezifisch angegeben

werden. Die Bedarfe an Endprodukten werden direkt aus den Produktionsvolumina der Makroperiode, den Lagerbeständen oder deren Kombination gedeckt. Lieferrückstände sind zugelassen, da die Fehlvolumen zur Ermittlung des Bedarfes an Zusatzschichten zu identifizieren sind.

Das Leistungsportfolio der Instandhaltung unterteilt sich in ortsflexible, zeitorientierte Instandhaltungsleistungen an den Maschinen der Pressenlinien und in ortsgebundene, zustandsorientierte Instandhaltungsleistungen an den Umformwerkzeugen in der Werkstatt. Die Instandhaltungsleistungen an den Maschinen der jeweiligen Pressenlinien können als Leistungen an einer Breitbandpresse gruppiert werden, da während der Instandhaltungsleistung in der gesamten Linie keine Endprodukte hergestellt werden. Die Instandhaltungsleistungen an den Pressenlinien repräsentieren die ortsflexiblen Instandhaltungsleistungen, da sie durch die Instandhaltungsressourcen (Instandhalter und Werkzeuge) vor Ort am Instandhaltungsobjekt erbracht werden. Es wird für die Maschinen der Pressenlinien die zeitorientierte Instandhaltungsstrategie angewendet. Das Leistungsportfolio umfasst je Linie eine ortsflexible, zeitorientierte Instandhaltungsleistung. Die Bedarfe sind makroperiodenspezifisch. Die verfrühte und verspätete Durchführung von Leistungen wird zugelassen. Die Instandhaltungsleistungen an den Umformwerkzeugen repräsentieren die ortsgebundenen Instandhaltungsleistungen. Es wird die zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie für die Equipments der Produktion angewendet. Alle ortsgebundenen, zustandsorientierten Instandhaltungsleistungen werden in der Werkstatt W1 durchgeführt. In Analysen durch die Instandhaltungsexperten wurden für jedes Umformwerkzeug eine Verschleißgrenze, ein Zustandswert des Instandhaltungsbedarfes sowie eine Verschleißrate je hergestelltem Endprodukt ermittelt. Im Produktionssystem entsprechen die Verschleißgrenzen und Zustandswerte des Instandhaltungsbedarfes jeweils einer definierten Anzahl an Endprodukten, welche unter Einsatz des Equipments hergestellt werden können.

Darüber hinaus sind wartende und ungerüstete Zustände der Breitbandpressen und der Werkstatt möglich. Folglich sind für die Maschinen M1 und M2 und die Werkstatt W1 jeweils eine virtuelle Leistung P1 und ein virtuelles Equipment E1 zu modellieren. Zusammenfassend besteht das Leistungsportfolio aus drei virtuellen Leistungen, aus 19 Produktionsleistungen, aus zwei ortsflexiblen, zeitorientierten Instandhaltungsleistungen sowie aus 18 ortsgebundenen, zustandsorientierten Instandhaltungsleistungen. Das Leistungsportfolio der Breitbandpressen des Fallbeispiels ist in Tabelle 9.1 dargestellt.

9 Anwendung und Bewertung des Systems

Tabelle 9.1: Leistungsportfolio der Breitbandpressen

		Maschine M1					Maschine M2		
		Leistungen P	Equipments E				Leistungen P	Equipments E	
Produktion		1	1	-			1	1	-
		7	6	-			3	3	-
		8	6	-			4	4	-
		10	8	9			5	5	-
		11	10	11			6	5	-
		12	12	-			9	7	-
		13	13	-			12	12	-
		18	18	-			13	13	-
		19	19	-			14	14	-
							15	15	-
						16	16	-	
						17	17	-	
						20	19	-	
						21	20	-	
IH		23	21	-	IH		22	21	-

IH: Instandhaltung

Aus der dargestellten Modellierung der Ressourcen und Leistungen folgt, dass im vorliegenden Fallbeispiel keine Entscheidungen zu den Transportvolumina des Materialflusses zwischen Linien, zustandsorientierten Instandhaltungsleistungen für Maschinen, zeitorientierten Instandhaltungsleistungen für Equipments sowie der Auswahl von Betriebsmodi der Leistung-Ressourcen-Befähigungen zu berücksichtigen sind. Sie werden daher in der Pilotanwendung des Systems nicht weiter betrachtet.

Definition des Planungshorizontes und der Planungsperioden: Zur Definition der Zeit sind die Anzahl der Makro- und Mikroperioden zu bestimmen. Im produzierenden Unternehmen erfolgt die Regelplanung für einen Planungshorizont von fünf Arbeitstagen und wird zwei Tage vor Abschluss des Planungshorizontes erneut ausgeführt. Folglich beträgt der Planungszyklus drei Tage. Des Weiteren ist das planerische Kriterium zu berücksichtigen, wonach die Instandhaltungsleistungen eine Leistungszeit von bis zu einem Arbeitstag aufweisen können. Es werden folglich fünf Makroperioden modelliert. Die Anzahl der Mikroperioden einer Makroperiode wird unter Berücksichtigung der mathematischen Kriterien der Begrenzung der Zustandswechsel an den Breitbandpressen sowie der Problemgröße des Planungsproblems auf fünf festgelegt.

Ermittlung der Planungsrestriktionen: Die Endprodukte werden in Transportbehältern im Teilelager gelagert. Aufgrund von begrenzt verfügbaren Flächen bestehen Restriktionen bezüglich der maximalen Lagerbestände. Folglich existiert spezifisch für jedes Produkt ein maximaler Lagerbestand. Darüber hinaus existieren Vorgaben zu produktspezifischen Mindestbeständen der Blechbauteile. Diese Vorgaben seitens des Managements dienen der Absicherung der Materialversorgung der Montage sowie der weiteren Standorte. Sie sind in jeder Planungsperiode des Planungshorizontes einzuhalten. Zur Wahrung der Geheimhaltung wird auf eine detailliertere Darstellung der Planungsrestriktionen verzichtet.

9.1.3 Präzisierung der Zielsysteme

Zur Abbildung der Ziele der Entscheidungsträger der Produktions- und Instandhaltungsplanung werden drei Zielsysteme abgeleitet. Die Kosten sind für das produzierende Unternehmen die zentrale Zielgröße. Sie werden in den Zielsystemen des Fallbeispiels stets mit der höchsten Gewichtung berücksichtigt. Darüber hinaus ist die Qualität der Leistungserstellungsprozesse von Bedeutung. Die Sicherung der Liefertreue folgt aus dem Bestreben, die Materialversorgung der Montage und der weiteren Standorte sicherzustellen. Eine Unterbrechung der Materialversorgung kann zu Stillständen und zu erheblichen Folgekosten führen. Die materialflusstechnische Entkopplung der Linien durch das Lager führt zu einer geringen Bedeutung der Zielgröße Zeit. Jedoch sind Zusatzschichten aufgrund von Lieferrückständen der Produktionsleistungen oder verspätet durchgeführten Instandhaltungsleistungen zu vermeiden. Ebenso hat die Zielgröße der Flexibilität für das produzierende Unternehmen nur eine nachgelagerte Bedeutung. Dies folgt daraus, dass der Bedarf an Leistungen bekannt sowie die Zykluszeit der Regelplanung kurz ist. Die Zielsysteme der Pilotanwendung des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung mit den Gewichtungen der Zielgrößen sind in Tabelle 9.2 zusammenfassend dargestellt.

Gemäß der Goal-Programming-Methode sind in monokriteriellen Optimierungsläufen zunächst für jede Zielgröße des jeweiligen Zielsystems die optimalen Zielwerte und die Nutzenfunktion unter Berücksichtigung der ermittelten Planungsergebnisse zu bestimmen. In der vorliegenden Arbeit kommen im multikriteriellen Optimierungslauf vom jeweiligen Optimalwert um 5 % abweichende Zielwerte zur Anwendung. Die Gewichtungen der einzelnen Zielgrößen entsprechen den dargestellten Zielsystemen, wobei nur die negativen Abweichungen Eingang in die Abstandsfunktion finden.

Tabelle 9.2: Zielsysteme des Fallbeispiels

Zielgrößen	Zielsystem 1	Zielsystem 2	Zielsystem 3
Kosten	0,8	0,7	1,0
Zeit	0,0	0,1	0,0
Qualität	0,2	0,1	0,0
Flexibilität	0,0	0,1	0,0

9.1.4 Datenerhebung

Die Ermittlung der erforderlichen Informationen erfolgte nach dem im Abschnitt 8.4 dargestellten Vorgehen. Es wurden Workshops sowie Experteninterviews mit den Entscheidungsträgern der Planungsbereiche durchgeführt und historische Ereignisdaten aus Informationssystemen des Produktionssystems strukturiert analysiert. Nachfolgend werden die wesentlichen Planungsinformationen zusammenfassend dargestellt.

Der Bedarf an Produktionsleistungen wurde tagesspezifisch ermittelt. Die Lagerbestände der Endprodukte zu Beginn des Planungshorizontes wurden aus Daten des ERP-Systems der Vorfertigung bestimmt. Die Zeit und Kosten für die Durchführung einer Produktionsleistung sind spezifisch für jede Leistung-Ressourcen-Befähigung. Die Verschleißrate der Equipments wurde als Anzahl der hergestellten Endprodukte definiert. Folglich führt die Herstellung eines Endproduktes zur Erhöhung des Zustandswertes um den Betrag eins.

Der Bedarfszyklus für die zeitorientierten Instandhaltungsleistungen an den Maschinen der Pressenlinien wurde durch die Instandhaltungsexperten mit fünf Arbeitstagen bestimmt, wobei der letzte Arbeitstag einer Betriebswoche als Bedarfszeitpunkt ermittelt wurde. Die Dauer einer zeitorientierten Instandhaltungsleistung beträgt vier Stunden. Eine vorzeitige oder verspätete Durchführung der Instandhaltungsleistung ist möglich. Die gleichzeitige Durchführung ist jedoch auszuschließen, da die Leistungen durch dieselben Instandhaltungsressourcen durchgeführt werden. Die Umformwerkzeuge haben einen equipmentspezifischen Zustandswert, ab dem die Durchführung einer zustandsorientierten Instandhaltungsleistung notwendig wird. Auf Basis der Einschätzung von Experten wurde ein Wert von 10 % als Prozessfenster bis zum maximalen Betrag des Verschleißes festgelegt. Als Dauer der zustandsorientierten Instandhaltungsleistungen an den Equipments wurden ca. 19 Stunden ermittelt.

Die Aufwände für die Wechsel von Leistungen und Equipments sind abhängig von den Reihenfolgen der Leistung-Ressourcen-Kombinationen. Die Zeit für den Wechsel von Leistungen ohne Equipmentwechsel beträgt durchschnittlich 15 Minuten, wobei der Wechsel auf eine virtuelle Leistung halb so lange dauert. Die Wechselzeit für Equipments ohne Wechsel von Leistungen wurde mit 45 Minuten bestimmt, wobei die Zeit zum Wechsel auf ein virtuelles Equipment halb so lange dauert. Die Dauer eines kombinierten Wechsels von Leistungen und Equipment beträgt 60 Minuten. Die Maschinen werden ausschließlich in einem Betriebsmodus betrieben, wodurch keine Betriebsmodi zu berücksichtigen sind. Mit Abschluss der Datenerhebung liegen alle notwendigen Planungsinformationen vor.

9.1.5 Entwicklung von Handlungsalternativen

Die softwaretechnische Umsetzung des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung erfolgte in den Softwareumgebungen *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio* in der Version 12.10 sowie *Microsoft Excel*. Die erforderlichen Planungsinformationen werden durch die Entscheidungsträger aufbereitet, im Lösungsprozess zur Instanziierung des Optimierungsmodells über eine Informationsschnittstelle geladen und durch den integrierten Solver gelöst. Nach Abschluss des Lösungsprozesses werden die Zielgrößen und die Entscheidungsvariablen als Planungsergebnisse ausgegeben. Sie werden aufbereitet und zum integrierten Plan zusammengeführt. Das Prinzip der softwaretechnischen Umsetzung ist in Abbildung 9.2 dargestellt.

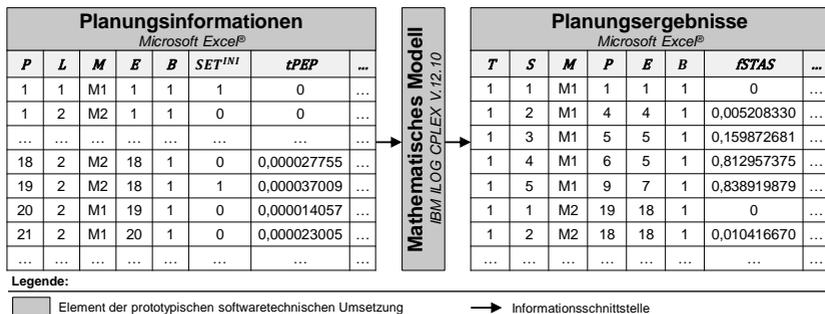


Abbildung 9.2: Prinzipdarstellung der prototypischen softwaretechnischen Umsetzung des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

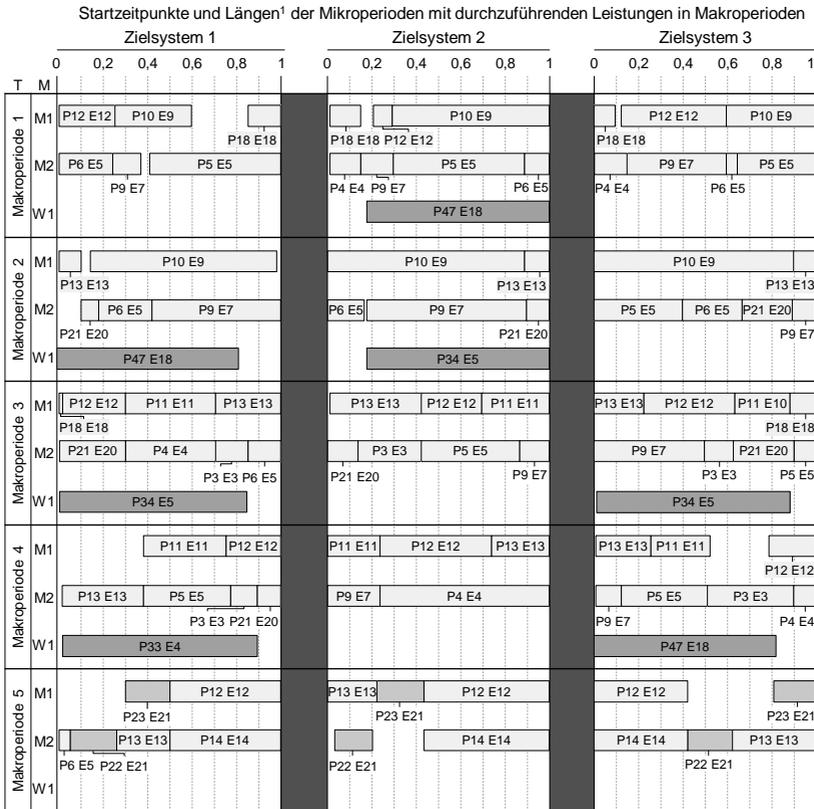
9 Anwendung und Bewertung des Systems

Nachfolgend werden die anhand der Zielsysteme ermittelten Handlungsalternativen dargestellt. Die Startzeitpunkte und Längen der Mikroperioden können als Gantt-Chart zur Darstellung des Ablaufes an jeder Maschine in einer Makroperiode genutzt werden. Die Zeit in einer Makroperiode ist gemäß dem mathematischen Modell auf den Wertebereich $[0, 1]$ normiert. Der Wert 0 repräsentiert im Fallbeispiel den Beginn und der Wert 1 das Ende eines Arbeitstages. In Abbildung 9.3 sind die ermittelten integrierten Produktions- und Instandhaltungspläne dargestellt. Es sind die Startzeitpunkte und Längen der Mikroperioden, in denen Leistungen durchgeführt werden, abgebildet. Mikroperioden, in denen keine Leistungen durchgeführt werden, sind nicht dargestellt.

In einer übergeordneten Analyse der ermittelten Handlungsalternativen zeigt sich, dass sowohl die zur Herstellung der Endprodukte erforderlichen Produktionsleistungen als auch die ortsflexiblen, zeitorientierten und die ortsgebundenen, zustandsorientierten Instandhaltungsleistungen eingeplant werden. Die Produktionsleistungen werden gemäß den Bedarfen an Endprodukten in den Mikroperioden der Makroperioden unter Einsatz der Leistung-Ressourcen-Befähigungen des Produktionssystems eingeplant. Die ortsflexiblen, zeitorientierten Instandhaltungsleistungen werden in allen Handlungsalternativen entsprechend dem durch die Instandhaltungsplanung angegebenen Bedarfszeitpunkt am Tag 5 durchgeführt. Darüber hinaus sind die zeitorientierten Instandhaltungsleistungen an den Pressenlinien nicht gleichzeitig eingeplant, wodurch die Durchführung durch dieselben Ressourcen der Instandhaltung ermöglicht wird.

Des Weiteren zeigt sich für jede Handlungsalternative in Abhängigkeit der durchgeführten Leistungsvolumina der Produktion der spezifische Bedarf für zustandsorientierte Instandhaltungsleistungen. Erfolgt in den Mikroperioden s kein Einsatz des Equipments in Produktionsleistungen und wird keine Instandhaltungsleistung am Equipment durchgeführt, bleibt der Zustand des Equipments konstant. Die Durchführung von Produktionsleistungen in einer Mikroperiode s führt zu Verschleiß des jeweiligen Equipments und folglich zum Anstieg des Zustandsparameters. Die Planungsergebnisse zeigen, dass für alle Equipments die spezifischen Verschleißgrenzen eingehalten sowie die Instandhaltungsleistungen durchgeführt werden, wenn der jeweilige Zustand des Equipments den spezifischen Zustandsparameter, ab dem eine Instandhaltungsleistung durchzuführen ist, erreicht bzw. überschreitet. Die Durchführung einer Instandhaltungsleistung führt mit der Verringerung des Verschleißes zur Verbesserung des Zustandes des Equipments. Die Planungsergebnisse für die Zielsysteme 2 und 3 zeigen für das Equipment E18, dass das Prozessfenster bis zur Verschleißgrenze zur Fertigstellung der Produktionsleistungen teilweise genutzt wird. Die Verwendung des Equipments

9.1 Pilotanwendung des Systems



Legende:

- Produktionsleistungen
- ortsflexible, zeitorientierte Instandhaltungsleistungen
- ortsggebundene, zustandsorientierte Instandhaltungsleistungen

¹Darstellungen der Längen der Mikroperioden können Leerzeiten beinhalten

Abbildung 9.3: Gantt-Chart Darstellung der mittels der Zielsysteme ermittelten integrierten Produktions- und Instandhaltungspläne des Fallbeispiels

9 Anwendung und Bewertung des Systems

über den spezifischen Zustandsparameter hinaus führt dazu, dass das Equipment nach Durchführung der jeweiligen Instandhaltungsleistung einen nicht vollständig neuwertigen Zustand erreicht. In Abbildung 9.4 sind die Zustandsverläufe der Equipments (a) E4, (b) E5 und (c) E18 zum Ende der Mikroperioden s dargestellt.

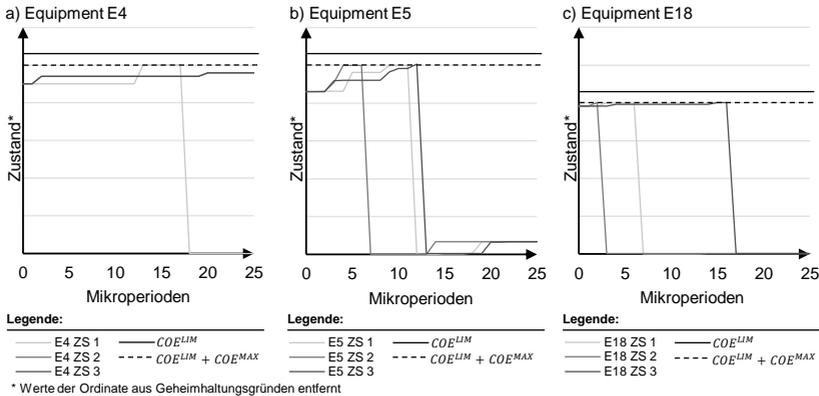


Abbildung 9.4: Vergleich der Zustandsverläufe der Equipments (a) E4, (b) E5 und (c) E18 in den Handlungsalternativen

Des Weiteren zeigen sich die Allokation der Ressourcenkombinationen sowie die Synchronisation des Einsatzes der Ressourcen zur Durchführung von Produktions- und Instandhaltungsleistungen. Dies soll nachfolgend beispielhaft anhand des am Zielsystem 1 ermittelten integrierten Plans und des Einsatzes des Equipments E5 in Makroperiode 3 an der Maschine M2 und der Werkstatt W1 beschrieben werden. Im Fallbeispiel ist das Equipment E5 Bestandteil der Leistung-Ressourcen-Befähigungen der Produktionsleistungen P5L2M2E5B1 und P6L2M2E5B1 sowie der Instandhaltungsleistung P34L3W1E5B1. Die Planungsergebnisse sind in Abbildung 9.5 dargestellt.

Zu Beginn der Makroperiode 3 ist die Leistung-Ressourcen-Befähigung P9L2M2E7B1 allokiert, welche zur Durchführung einer Produktionsleistung in der letzten Mikroperiode der vorherigen Makroperiode eingeplant wurde. In der Mikroperiode 2 erfolgt an der Maschine M2 ein Leistungswechsel von P9 auf P21. Darüber hinaus findet ein Equipmentwechsel von E7 auf E20 statt. Folglich nimmt die Wechselzeit der Leistungen und der Equipments den Wert 0,041667 an, welcher der kombinierten Wechselzeit von 60 Minuten entspricht. Das Equipment E7 verbleibt bis zum vollständigen Wechsel auf E20 an M2 und wird erst nach Abschluss des Wechselvorganges freigegeben.

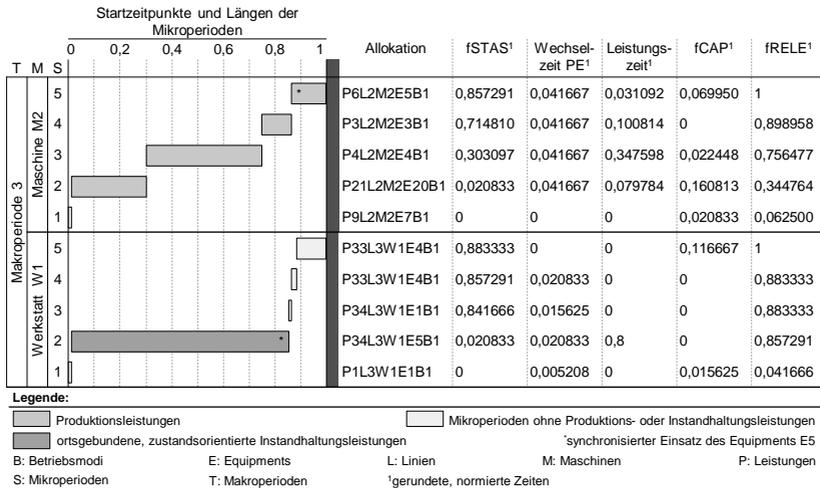


Abbildung 9.5: Synchronisation des Einsatzes des Equipments E5 in der Makroperiode 3 zwischen der Maschine M2 und der Werkstatt W1 in dem anhand des Zielsystems 1 ermittelten integrierten Plans

Darüber hinaus ist die Durchführung der Produktionsleistung sowie Leerzeit in Mikroperiode 2 geplant. In der Mikroperiode 3 erfolgen der Wechsel von P21 auf P4, der Wechsel von E20 auf E4 und die Durchführung der Produktionsleistung der allokierten Leistung-Ressourcen-Befähigung P4L2M2E4B1. Zudem ist eine Leerzeit geplant. In der anschließenden Mikroperiode 4 erfolgen der Wechsel von Leistung P4 auf P3 und der Wechsel des Equipments von E4 auf E3.

Die Werkstatt W1 befindet sich in der Mikroperiode 1 der Makroperiode 3 mit der allokierten Leistung-Ressourcen-Befähigung P1L3W1E1B1 in einem wartenden und ungerüsteten Zustand. In der Mikroperiode 2 erfolgen der Wechsel von P1 auf P34 und der Wechsel von E1 auf E5 sowie die Durchführung der zustandsorientierten Instandhaltungsleistung P34. In der Mikroperiode 3 erfolgt ein Wechsel von E5 auf E1, was dem ungerüsteten Zustand entspricht. Die Planungsergebnisse zeigen, dass das Equipment E5 unmittelbar nach Durchführung der zustandsorientierten Instandhaltungsleistung in der Werkstatt W1 zur Durchführung der Produktionsleistung an der Maschine M2 eingeplant wird. Der Freigabezeitpunkt des Equipments E5 in der Werkstatt W1 entspricht dem Startzeitpunkt der Mikroperiode 5 der Maschine 2, d. h. der Einsatz der Ressource im Produktionssystem erfolgt synchronisiert. In der Mikroperiode 5 erfolgen an M2

9 Anwendung und Bewertung des Systems

der Wechsel von P3 auf P6, der Wechsel von E3 auf E5 sowie die Durchführung der Produktionsleistung der allokierten Leistung-Ressourcen-Befähigung P6L2M2E5B1. In der Werkstatt erfolgen in Mikroperiode 4 der Wechsel von P34 auf P33 und von E1 auf E4. Die Durchführung der zustandsorientierten Instandhaltungsleistung erfolgt in der nachfolgenden Makroperiode.

Zusammenfassend zeigt sich, dass alle durch das System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung ermittelten Handlungsalternativen in der betrieblichen Realität durchführbare integrierte Pläne darstellen.

9.1.6 Bewertung

Die Bewertung der Planungsergebnisse soll zunächst mittels einer Gegenüberstellung der Handlungsalternativen der Zielsysteme erfolgen. Anschließend werden die übergeordneten Effekte von erhöhten Gewichtungen einzelner Zielgrößen abgeleitet.

Das Zielsystem 1 führt im Vergleich zu den beiden anderen Zielsystemen zur höchsten Anzahl an Wechseln von Leistungen und Equipments sowie zum höchsten Leistungsvolumen der Produktion der Handlungsalternativen. Das erhöhte Leistungsvolumen bewirkt den Bedarf für eine weitere zustandsorientierte Instandhaltungsleistung, wodurch das relative Leistungsvolumen der Instandhaltung der Zielsysteme 2 und 3 geringer ausfällt. Das Zielsystem 2 führt im Vergleich der Handlungsalternativen zur höchsten Leerzeit des Produktionssystems durch die geringste Anzahl an Wechseln von Leistungen und Equipments. Dies liegt in der höheren Gewichtung der Ziele Zeit und Flexibilität begründet. Die Tabelle 9.3 stellt die anhand der Zielsysteme des Fallbeispiels ermittelten Planungsergebnisse zusammenfassend dar.

Tabelle 9.3: Bewertung der Planungsergebnisse

Kennzahlen	Zielsystem 1	Zielsystem 2	Zielsystem 3
Anzahl an Wechseln von Leistungen und Equipments	45	31	35
Relatives Leistungsvolumen* der Produktion	100,00 %	96,31 %	96,31 %
Relatives Leistungsvolumen* der Instandhaltung	100,00 %	80,00 %	80,00 %
Leerzeit Produktionssystem in Zeiteinheiten	5,11	6,49	6,29

* Höchstes Leistungsvolumen der Handlungsalternativen entspricht 100 %.

Ausgehend vom ermittelten initialen Lagerbestand führen alle Handlungsalternativen zur Absenkung des Lagerbestandes, welcher die Summe aller im Lager befindlichen Endprodukte repräsentiert. Die Planungsergebnisse der anhand des Zielsystems 3 ermittelten Handlungsalternative führen im Planungshorizont am schnellsten zu einer Reduzierung des Bestandes und der Wert nähert sich dem minimalen Lagerbestand aller Endprodukte an. Das Zielsystem 1 führt im Vergleich zum Zielsystem 3 durch das erhöhte Produktionsvolumen zu erhöhtem Lagerbestand in den Makroperioden. Der Verlauf des Lagerbestandes des Zielsystems 2 zeigt für die Makroperioden einen erhöhten Bestand, die vor einer Makroperiode mit erhöhten Bedarfen an Endprodukten liegen. Die Reduktion der Wechselvorgänge von Leistungen und Equipments führt dazu, dass vorab ein erhöhtes Volumen an Endprodukten hergestellt wird, wodurch sich der Bestand zeitweise erhöht. Die Bestandsverläufe sind in Abbildung 9.6 dargestellt.

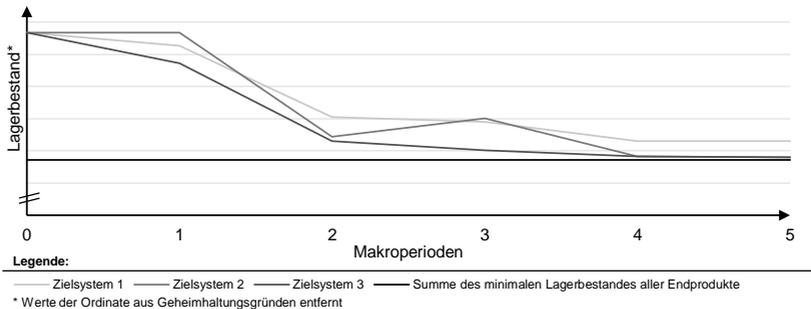


Abbildung 9.6: Vergleich der Bestandsverläufe in den Handlungsalternativen

In einer übergeordneten Bewertung führt eine erhöhte Gewichtung der *Kosten* zur Reduzierung der Anzahl der Wechsel von Leistungen und Equipments sowie zur Verminderung des Lagerbestandes bis zum minimalen Lagerbestand. Die Produktionsleistungen werden derart eingeplant, dass zustandsorientierte Instandhaltungsleistungen nicht im aktuellen, sondern im nächsten Planungshorizont auszuführen sind. Dies führt zur Reduzierung der periodenspezifischen Instandhaltungsausgaben.

Eine Priorisierung der Zielgröße *Zeit* führt zur Reduzierung der Anzahl der Wechsel von Leistungen und Equipments. Es zeigt sich die Präferenz von großen Losgrößen zur Vermeidung von Wechselvorgängen, was erhöhte Lagerbestände in einzelnen Planungsperioden zur Folge haben kann. Des Weiteren ergibt sich eine Erhöhung der Leerzeiten.

9 Anwendung und Bewertung des Systems

Die Erhöhung der Anzahl der Wechsel von Leistungen und Equipments sowie der Wechsel der Betriebsmodi im Planungshorizont sind die Folge einer stärkeren Gewichtung des Zieles *Qualität*. Zur Sicherstellung der Liefertreue ergibt sich für Endprodukte mit hohen Bedarfen ein erhöhtes Produktionsvolumen im Planungshorizont. Daraus folgt unmittelbar die Erhöhung des Lagerbestandes sowie die Reduzierung der Leerzeit im Produktionssystem. Des Weiteren kann das erhöhte Produktionsvolumen zu einem erhöhten Volumen an zustandsorientierten Instandhaltungsleistungen führen.

Eine erhöhte Gewichtung der *Flexibilität* führt ebenfalls zu einer Reduzierung der Anzahl der Wechsel von Leistungen, Equipments sowie Betriebsmodi und einer Präferenz von großen Losgrößen. Die daraus resultierende Erhöhung der Leerzeit im Produktionssystem kann zur Herstellung zusätzlicher Endprodukte eingesetzt werden.

9.1.7 Auswahl

Mit Abschluss der Analyse und Bewertung der Ergebnisse verfügen die Entscheidungsträger über alle notwendigen Informationen. Die ausgewählte Alternative stellt den zu realisierenden integrierten Produktions- und Instandhaltungsplan dar. Ein Auszug eines beispielhaften integrierten Plans ist in Abbildung 9.7 abgebildet.

T	M	S	Allokation	fSTAS ¹	Wechselzeit PE ¹	Leistungszeit ¹	fCAP ¹	fRELE ¹
Makroperiode 1	Maschine M1	5	P10L1M1E9B1	0,295713	0,041667	0,322788	0,339832	1
		4	P12L1M1E12B1	0,214158	0,020833	0,060722	0	0,337380
		3	P1L1M1E1B1	0,159872	0,020833	0	0,033453	0,234991
		2	P18L1M1E18B1	0,020833	0	0,138779	0,000260	0,180705
		1	P18L1M1E18B1	0	0,020833	0	0	0,020833
	Maschine M2	5	P6L2M2E5B1	0,885160	0,010416	0,104424	0	1
		4	P5L2M2E5B1	0,295714	0,041667	0,532110	0,015669	0,895576
		3	P9L2M2E7B1	0,159872	0,041667	0,094175	0	0,337381
		2	P4L2M2E4B1	0,020833	0	0,139039	0	0,201539
		1	P4L2M2E4B1	0	0,020833	0	0	0,020833
	Werkstatt W1	5	P47L3W1E18B1	1	0	0	0	1
		4	P47L3W1E18B1	1	0	0	0	1
		3	P47L3W1E18B1	0,184375	0,015625	0,8	0	1
		2	P47L3W1E1B1	0,005208	0	0	0,179167	0,200000
		1	P47L3W1E1B1	0	0,005208	0	0	0,005208
...	

Legende:

B: Betriebsmodi
S: Mikroperioden

E: Equipments
T: Makroperioden

L: Linien
¹gerundete, normierte Zeiten

M: Maschinen

P: Leistungen

Abbildung 9.7: Auszug eines beispielhaften integrierten Produktions- und Instandhaltungsplans

9.2 Erkenntnisse aus der Pilotanwendung

Im Rahmen der Pilotanwendung des Systems konnte durch die Anwendung der Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung das Entscheidungsproblem identifiziert und definiert werden. Die Daten des Produktionssystems und der Leistungen wurden in die Informationsmodelle überführt und der Entscheidungsprozess der Produktions- und Instandhaltungsplanung unterstützt. Unter Nutzung des multikriteriellen Optimierungsmodells wurden anhand des jeweiligen Zielsystems effiziente Leistungsreihenfolgen von Produktions- und Instandhaltungsleistungen ermittelt. Die Synchronisation der Einsätze der Ressourcen stellt die Realisierbarkeit der integrierten Pläne in der betrieblichen Realität sicher. Das entwickelte System trägt somit zur Verbesserung des Planungsprozesses sowie der Planungsqualität bei.

In der Anwendung des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung zeigen sich die nachfolgend aufgeführten zentralen Herausforderungen:

1. *Ermittlung der Planungsinformationen:* Der Aufwand zur Ermittlung der Planungsinformationen ist hoch. Die Analyse von Daten aus Informationssystemen realer Produktionssysteme erfordert umfangreiches Prozesswissen sowie eine ausreichende Anzahl an historischen Ereignissen. Die Hinzunahme von Prozessexperten kann die Ermittlung der Planungsinformationen beschleunigen und den Aufwand reduzieren.
2. *Bereitstellung der Planungsinformationen:* Die Informationsmodelle stellen dem Optimierungsmodell die benötigten Planungsinformationen in der geforderten Struktur bereit. Fehler bei der Übertragung der Informationen in die Informationsmodelle können zu nicht plausiblen Ergebnissen oder zur Unlösbarkeit führen. Eine Überprüfung der Werte sowie eine regelmäßige Aktualisierung durch die Entscheidungsträger kann die Informationsbereitstellung unterstützen.
3. *Analytische Komplexität der Interpretation:* Die Analyse der auf Basis der gewählten Zielsysteme ermittelten Handlungsalternativen stellt eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Die teilweise konkurrierenden Ziele des Zielsystems führen dazu, dass die Abwägung der Zielerreichung sowie die Interpretation der Ergebnisse vorab schwerfällt. Die Erzeugung multipler Handlungsalternativen mittels Variation von Gewichtungsfaktoren des Zielsystems oder die Variation von Planungsparametern können, ceteris paribus, die Analyse und die Interpretation unterstützen. Dieses Vorgehen ermöglicht einen detaillierten Alternativenvergleich.

9.3 Bewertung der Zielerreichung

Zur Erreichung der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit (vgl. Abschnitt 1.3) wurde ein System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung entwickelt, welches sich aus einem technischen und einem sozialen Teilsystem zusammensetzt. Das technische Teilsystem besteht aus den Systemelementen *Informationsmodelle* und *multikriterielles Optimierungsmodell*. Das soziale Teilsystem beinhaltet die *Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung*. Die in Abschnitt 9.1 dargestellten Ergebnisse zeigen die Anwendbarkeit des Systems. Es wurden die nachfolgend aufgeführten Verbesserungen erreicht.

Verbesserung der Planungsqualität: Die Informationsmodelle dienen der Beschreibung der Eigenschaften und Fähigkeiten der Ressourcen des Produktionssystems sowie der Charakteristika und Anforderungen der Leistungen. Des Weiteren ermöglichen sie die effiziente Bereitstellung der benötigten planerischen und technischen Informationen für die integrierte Planung. Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte multikriterielle Optimierungsmodell erweitert die existierenden Ansätze zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung des Standes der Erkenntnisse. Im Modell sind die Entscheidungsdimensionen der Planungsbereiche sowie die Ressourcen von Produktionssystemen abgebildet. Des Weiteren umfasst das Modell die Abbildung von Produktstrukturen, Betriebsmodi von Ressourcenkombinationen sowie Wechselvorgänge von Leistungen, Equipments und Betriebsmodi. Außerdem ermöglicht es die Abbildung der zeit- und zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie sowie die Modellierung eigener Ressourcen der Instandhaltung. Die Synchronisation der Einsätze der Ressourcen im Produktionssystem sichert die Durchführbarkeit der integrierten Pläne ab. Das Planungsproblem der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung wird durch die Elemente des technischen Teilsystems verbessert abgebildet. Dadurch wird die erreichbare Lösungsqualität gesteigert und die Ermittlung von effizienten Leistungsreihenfolgen von Produktion und Instandhaltung unter Berücksichtigung der Restriktionen des Produktionssystems ermöglicht.

Verbesserung des Planungsprozesses: Bestehende Ansätze zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung vernachlässigen größtenteils den Ablauf von Entscheidungsprozessen. Zur Verbesserung des Planungsprozesses wurde als Element des sozialen Teilsystems die Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung auf der wissenschaftlichen Basis der präskriptiven

Entscheidungstheorie entwickelt. Die Methode führt die Entscheidungsträger der Planungsbereiche durch die einzelnen Prozessphasen der integrierten Planung. Zunächst ist das Entscheidungsproblem zu identifizieren. Anschließend erfolgen die Definition der Aufgabenstellung sowie die Entwicklung der Zielsysteme zur Erzeugung von Handlungsalternativen. Die ermittelten Handlungsalternativen sind zu analysieren und zu bewerten. Diese Transparenz ermöglicht den Vergleich der Handlungsalternativen sowie die Auswahl anhand von rationalen Kriterien durch die Entscheidungsträger. Die Methode trägt damit dem Status quo der organisatorischen Trennung der Planungsbereiche Rechnung und unterstützt die Konsensfindung sowie die Auflösung der Konfliktsituation.

Erfüllung der Anforderungen: Den Erfüllungsgrad in Bezug auf die in Abschnitt 3.2 abgeleiteten Anforderungen durch das System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung zeigt die Tabelle 9.4. Die Anforderungen an einen Ansatz zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung werden im hohen Umfang erfüllt.

Tabelle 9.4: Erfüllungsgrad der Anforderungen an einen Ansatz zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Anforderungen	Erfüllungsgrad
A.1 Ausreichende Detailtiefe der Produktionssystemmodellierung	●
A.2 Berücksichtigung der Restriktionen der Ressourcen des Produktionssystems	●
A.3 Abbildung der Entscheidungsdimensionen der Produktionsplanung	●
A.4 Abbildung der Entscheidungsdimensionen der Instandhaltungsplanung	●
A.5 Berücksichtigung verschiedener Instandhaltungsstrategien	●
A.6 Berücksichtigung der Interdependenzen der Planungsbereiche	●
A.7 Vollständige Durchsuchung des Lösungsraumes	●
A.8 Berücksichtigung mehrerer Zielgrößen in der Planung	●
A.9 Erzeugung multipler Handlungsalternativen	●
A.10 Abbildung der Phasen der Entscheidungsfindung	●

Die Anforderung an einen Ansatz zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung wird ...
 nicht erfüllt. ● ansatzweise erfüllt. ● teilweise erfüllt. ● annähernd erfüllt. ● vollständig erfüllt.

Fazit: Zusammenfassend zeigt sich, dass das System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung zur Ermittlung von effizienten Leistungsreihenfolgen und zur Verbesserung der Entscheidungsfindung im Planungsprozess beiträgt und die Anforderungen im hohen Umfang erfüllt. Das System trägt somit zur Verminderung der Defizite der analytischen und prozessualen Komplexität der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung bei.

9.4 Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit ist der Aufwand zur Anwendung des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung dem Nutzen gegenüberzustellen.

9.4.1 Aufwand

Die Aufwände des Systems gliedern sich in die einmaligen finanziellen Aufwände der Kategorien *Systemimplementierung* und *Datenerhebung* sowie in die laufenden finanziellen Aufwände der *Systemanwendung*.

Die finanziellen Aufwände der Kategorie Systemimplementierung resultieren aus der Beschaffung der IT-Infrastruktur, dem Projektmanagement und den Schulungen. Das Projektmanagement und die Schulungen umfassen die Planung, Beschaffung und Inbetriebnahme der IT-Infrastruktur sowie die Organisation und Durchführung der Schulungen für die Systemanwender.

Die erstmalige Erfassung der benötigten Informationen der Informationsmodelle als Datenbasis des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung wird durch die Systemanwender durchgeführt. Die finanziellen Aufwände der Datenerhebung beinhalten die Erfassung der Informationen zur Struktur und zu den Ressourcen des Produktionssystems sowie zum Leistungsportfolio. Dies ermöglicht die Ermittlung der Leistung-Ressourcen-Befähigungen. Des Weiteren sind die planerischen und technischen Informationen zu erheben. Die Höhe der Aufwände ist dabei abhängig von der Anzahl der betrachteten Leistungen und Ressourcen.

Die laufenden finanziellen Aufwände ergeben sich aus der Anwendung des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung. Bei der Abschätzung des finanziellen Aufwandes für die Softwarelizenz wird die Anwendung der Software *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio* der Firma *IBM* unterstellt, welche eine Softwareumgebung zur Implementierung des Optimierungsmodells sowie Lösungsalgorithmen beinhaltet. Der entstehende Aufwand ist von der Art der verwendeten Lizenz sowie der Anzahl der Lizenzen abhängig. Es wird für jeden Planungsbereich eine Lizenz angenommen, welche im jeweiligen Planungsbereich als Serverlizenz zur Verfügung steht. Des Weiteren ergeben sich für jede Planung Aufwände für die Aktualisierung der Informationen.

9.4 Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Die abgeschätzten finanziellen Aufwände für das im Fallbeispiel betrachtete Produktionssystem sind in der Tabelle 9.5 aufgeführt. Im Fallbeispiel ergeben sich ein einmaliger finanzieller Aufwand in Höhe von 72.400 €. Die laufenden finanziellen Aufwendungen des Systems summieren sich auf 11.800 € pro Jahr.

Tabelle 9.5: *Finanzielle Aufwände des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung*

Kategorie	Beschreibung	Kostensatz	Anzahl	Aufwand
<i>Einmalige finanzielle Aufwände</i>				
System- imple- mentierung	IT-Infrastruktur	10.000 €	Einmalinvestion	10.000 €
	Projektmanagement & Schulungen	800 €/PT	20 PT	16.000 €
Daten- erhebung	Struktur & Ressourcen PS	800 €/PT	5 PT je SE, 2 SE	8.000 €
	Leistungsportfolio	800 €/PT	0,5 PT je LE, 38 LE	15.200 €
	Planerische & technische Informationen	800 €/PT	5 PT je SE, 2 SE, 0,5 PT je LE, 38 LE	23.200 €
Summe				72.400 €
<i>Laufende finanzielle Aufwände</i>				
System- anwendung	Softwarelizenz	2.300 €/J	2 Jahreslizenzen	4.600 €/J
	Informationsaktualisierungen	800 €/PT	0,1 PT je Planung, 90 Planungen	7.200 €/J
Summe				11.800 €/J

J: Jahr LE: Leistung PB: Planungsbereich PS: Produktionssystem PT: Personentag SE: Segment

9.4.2 Nutzen

Nachfolgend erfolgt eine differenzierte Analyse des qualitativen und quantitativen Nutzens der Anwendung des Systems.

Der qualitative Nutzen des Systems besteht in einem verbesserten Verständnis des Entscheidungsproblems durch die Entscheidungsträger der Planungsbereiche sowie in der Ausrichtung der Leistungserstellungsprozesse auf die strategischen Erfolgsfaktoren des produzierenden Unternehmens. Weitere Effekte sind die verbesserte Zusammenarbeit der Entscheidungsträger, die Transparenz des Planungsprozesses, die Einhaltung aller Restriktionen, die effektive Nutzung der Ressourcenfähigkeiten, die Dokumentation der Planungsergebnisse sowie die Prognosefähigkeit der erforderlichen Kapazitäten.

9 Anwendung und Bewertung des Systems

Zur Ermittlung des quantitativen Nutzens des Systems wurde ein Simulationsmodell des vorgestellten Fallbeispiels entwickelt. Es basiert auf dem in SCHREIBER ET AL. (2019) vorgestellten Ansatz. Das Simulationsmodell wurde als Prognosemodell innerhalb einer ereignisorientierten Simulationsumgebung implementiert. Die Darstellung und die Validierung des Simulationsmodells befinden sich im Anhang D.

Der quantitative Nutzen des Systems ergibt sich im Fallbeispiel aus dem finanziellen Nutzen der vermiedenen Mehrkosten im Vergleich zur Realplanung. Zur detaillierten Analyse des Nutzens erfolgt die Betrachtung eines Zeitraumes von 5 Arbeitswochen. Die Abbildung 9.8 zeigt die Verläufe der Lagerbestände für die Realplanung und für den anhand von Zielsystem 1 ermittelten integrierten Produktions- und Instandhaltungsplans. Darüber hinaus ist die durchschnittliche prozentuale Abweichung der Lagerbestände für eine Arbeitswoche mit jeweils insgesamt 15 Schichten abgebildet.

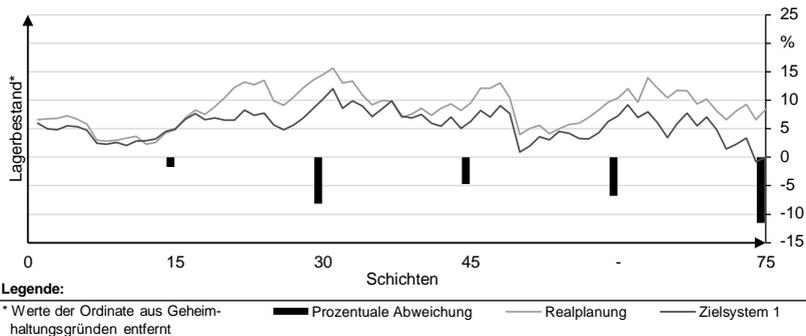


Abbildung 9.8: Verläufe und Vergleich der Lagerbestände von Realplanung und dem Planungsergebnis des Zielsystems 1

Die Ergebnisse zeigen, dass die prozentualen Abweichungen der Lagerbestände von Realplanung und Zielsystem 1 im Betrachtungshorizont im Mittel -6,57 % betragen. Die Abweichungen in den Arbeitswochen schwanken zwischen -11,54 % bis -1,73 %. Folglich zeigen die Planungsergebnisse, dass der mit dem System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung ermittelte Plan im Betrachtungshorizont stets zu einem geringeren durchschnittlichen Lagerbestand führt. Der geringere Lagerbestand führt zu niedrigeren Lagerbestands- und Kapitalbindungskosten für das produzierende Unternehmen.

9.4 Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Ein weiterer Aspekt des quantitativen Nutzens leitet sich aus der Planung der ortsgebundenen zustandsorientierten Instandhaltungsleistungen im System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung ab. In der Realplanung erfolgt keine Planung für die Zeitpunkte und Reihenfolgen der Instandhaltungsleistungen der Umformwerkzeuge. Somit wird diese Entscheidungsdimension bei der Abstimmung der Leistungsreihenfolgen und Ressourceneinsatzes vernachlässigt. Der Bedarf an zusätzlich notwendigen Schichten wurde in den Experteninterviews mit einer Schicht alle fünf Arbeitswochen abgeschätzt. Zur Durchführung der Leistungen sowie zur Sicherstellung der betrieblichen Sicherheit müssen in der Instandhaltung mindestens drei Mitarbeitende anwesend sein. Folglich ergibt sich der finanzielle Nutzen des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung aus der Vermeidung von zusätzlichen Personalkosten, welche sich im Jahr auf 21.600 € summieren. Der Nutzen des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung für das produzierende Unternehmen des Fallbeispiels ist zusammenfassend in der Tabelle 9.6 angegeben.

Tabelle 9.6: Nutzen der Anwendung des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung im Fallbeispiel

Planungsbereiche	Beschreibung	Kostensatz	Anzahl	finanzieller Nutzen
Produktion	Lagerbestandskosten	15 % der PK	4 €/je Produkt, 6,57 % Reduktion	17.345 €
Instandhaltung	Zusatzschichten	800 €/PT	3 PT je 5 Wochen, 45 Arbeitswochen pro Jahr	21.600 €
Summe				38.945 €

PK: Produktkosten PT: Personentag

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit sind abschließend Aufwand und Nutzen gegenüberzustellen. Zur Berechnung der Amortisationszeit wird die Amortisationsrechnung nach VOEGELE & SOMMER (2012, S. 371) angewandt. Die Amortisationszeit ergibt sich aus dem Quotienten des Kapitaleinsatzes und dem durchschnittlichen jährlichen Kapitalrückfluss. Im Fallbeispiel entspricht der notwendige Kapitaleinsatz den einmaligen finanziellen Aufwänden in Höhe von 72.400 €. Der durchschnittliche jährliche Kapitalrückfluss in Höhe von 27.145 € ergibt sich im Fallbeispiel aus der Differenz von Nutzen und der laufenden finanziellen Aufwände. Folglich amortisiert sich das System in einem Zeitraum von ca. 2,7 Jahren. Des Weiteren ist zur Bewertung der

Wirtschaftlichkeit sicherzustellen, dass die Amortisationszeit die Nutzungsdauer nicht übersteigt. Nach BMF (2005) beträgt die Nutzungsdauer von Softwaresystemen zur Planung und Steuerung von Unternehmensprozessen, z. B. ERP-Systemen, fünf Jahre. Die ermittelte Amortisationszeit des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung unterschreitet diese Nutzungsdauer. Folglich ist ein wirtschaftlicher Einsatz möglich.

9.4.3 Verallgemeinerte Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Aus den Erkenntnissen der Entwicklung des Systems und des Fallbeispiels kann eine verallgemeinerte Bewertung der Wirtschaftlichkeit für produzierende Unternehmen durchgeführt werden.

In einer manuellen Planung kann aufgrund der analytischen Komplexität des Planungsproblems die Ermittlung anhand der Ziele der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung effizienten Leistungsreihenfolgen unter Einhaltung aller Restriktionen nicht gewährleistet werden. Die Planungsqualität wird von der Erfahrung, den analytischen Fähigkeiten der Entscheidungsträger, der Größe des Planungsproblems und vom Zufall beeinflusst. Darüber hinaus kann die Vernachlässigung von Restriktionen im Planungsprozess der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung zu zusätzlichen Aufwänden, z. B. erhöhte Kosten durch Zusatzschichten sowie Ausfälle von Ressourcen, führen. Folglich kann die manuelle Planung zu verminderter Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit des produzierenden Unternehmens führen.

Der wirtschaftliche Nutzen des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung ergibt sich aus den reduzierten Lagerbeständen, den effizienten Leistungsreihenfolgen, dem effektiven Einsatz der Ressourcen sowie der Vermeidung von Zusatzschichten, z. B. von hochqualifizierten Mitarbeitenden der Instandhaltung. Weitere Potenziale für die Wirtschaftlichkeit des Systems resultieren aus der Reduktion von minimalen Lagerbeständen von Produkten und folglich der Reduzierung der Lagerhaltungs- sowie Kapitalbindungskosten. Darüber hinaus ermöglicht das System die Kosten für die Wechsel der Leistungen, Equipments und Betriebsmodi zu reduzieren. Zusätzliche wirtschaftliche Potenziale ergeben sich aus der Ausnutzung des Verschleißvorrates der Ressourcen bei gleichzeitiger Vermeidung von Ausfällen sowie der Vermeidung von Ausfallfolgekosten durch eine Unterbrechung der Materialversorgung von anderen Segmenten und Standorten.

9.5 Bestehende Limitationen und Anwendungsfälle

Die Limitationen des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung in der Anwendung umfassen die Abbildung der Lagerhaltung von Ersatzteilen in der Instandhaltung, die Vergabe von Instandhaltungsleistungen an externe Dienstleister und die Berücksichtigung der Materialverfügbarkeit von Ausgangs- bzw. Rohmaterialien. Des Weiteren können nicht-lineare Verschleißverläufe sowie Wahrscheinlichkeiten von Spontanausfällen von Ressourcen nicht im System abgebildet werden.

Als Anwendungsfälle des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung sind die nachfolgend aufgeführten Fälle anzusehen.

1. *Komplexe Produktionssysteme und mehrere Ziele:* In komplexen Produktionssystemen existieren vielfältige Ausführungsalternativen und Interdependenzen zwischen den Planungsbereichen, deren vollständige Berücksichtigung in einer manuellen Planung oder in analytisch nicht elaborierten Modellen nur schwer möglich ist. Des Weiteren führt die Berücksichtigung von mehreren teilweise konkurrierenden Zielen der Produktions- und Instandhaltungsplanung zu hoher analytischer Komplexität. Diese Charakteristika erfordern die Ermittlung eines anhand der Ziele optimalen integrierten Produktions- und Instandhaltungsplans sowie die implizite Definition und vollständige Durchsuchung des Lösungsraumes.
2. *Hochausgelastete Produktionssysteme:* In hochausgelasteten Produktionssystemen existieren aufgrund des hohen Bedarfes an Endprodukten kaum oder keine fertigungsfreie Zeiten. Alternativ besteht ein hoher Bedarf an Instandhaltungsleistungen für die Ressourcen. Folglich kann keine strikte zeitliche Trennung von Produktion und Instandhaltung vorgenommen werden. Diese Systeme sind häufig durch den Drei-Schicht- oder Vier-Schicht-Betrieb charakterisiert.
3. *Synchronisation des Einsatzes von Ressourcen:* Die Durchführung bestimmter Produktions- und Instandhaltungsleistungen ist nur unter Einsatz definierter Ressourcen möglich. Diese Ressourcen stehen jedoch nur in begrenzter Anzahl und in begrenzter Kapazität zur Verfügung. Dieser Fall ist insbesondere bedeutsam, wenn Leistungen nur unter Einsatz von hochspezialisiertem Produktions- und Instandhaltungspersonal oder mit hohen Investitionskosten verbundenen Betriebsmitteln durchgeführt werden können.

4. *Betriebliche Anforderungen an die Einhaltung der Zustandsparameter von Ressourcen:* Die Einhaltung eines definierten Zustandsparameters einer Ressource kann aufgrund von Sicherheitsbestimmungen oder der betriebswirtschaftlichen Bedeutung einer Ressource erforderlich sein. Diese Charakteristika können sich u. a. in Produktionssystemen mit Sicherheitsbestimmungen oder mit Engpassressourcen zeigen, deren Ausfälle zu erheblichen Ausfallfolgekosten führen.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Nachfolgend werden in Abschnitt 10.1 die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst. Darüber hinaus wird in Abschnitt 10.2 ein Ausblick zu weiteren potenziellen wissenschaftlichen Forschungstätigkeiten im Themenfeld der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung gegeben.

10.1 Zusammenfassung

Die Basis für den Erfolg eines produzierenden Unternehmens im internationalen Wettbewerb bilden die Effizienz und die Effektivität der Leistungsprozesse in Produktionssystemen. Sie ergeben sich aus der möglichst zielgerichteten Transformation der Produktionsfaktoren, wodurch der Produktions- und Instandhaltungsplanung außerordentliche Bedeutung zukommt. Zwischen Produktion und Instandhaltung bestehen dabei Wechselwirkungen, welche aus der Abhängigkeitsbeziehung von Leistungsfähigkeit und Zustand folgen. Des Weiteren stehen in Produktionssystemen nur begrenzte Kapazitäten bzw. Ressourcen und finanzielle Mittel zur Verfügung (KRÖNING 2014, S. 17). Folglich besteht zur Optimierung der Abläufe sowie zur kapazitiven Abstimmung der Leistungen die Notwendigkeit der gemeinsamen Betrachtung und Abstimmung von Produktion und Instandhaltung (GÜNTNER ET AL. 2014, S. 9; BERRICHI ET AL. 2009, S. 9; GRÜNEWALD 1992, S. 4).

Ausgehend von dieser Motivation bestand das Ziel der vorliegenden Arbeit in der Entwicklung eines Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung. Zur Erreichung der Zielstellung wurden zunächst der Betrachtungsbereich spezifiziert, die theoretischen Grundlagen gelegt sowie die Anforderungen an einen Ansatz zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung identifiziert. Im Weiteren wurden Ansätze zur Modellierung von Produktionssystemen und planungsrelevanten Informationen sowie Ansätze zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung im Stand der Erkenntnisse vorgestellt. Es zeigte sich, dass in der Literatur bisher kein Ansatz existiert, welcher der prozessualen und analytischen Komplexität des Entscheidungs-

problems der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung vollständig gerecht wird sowie alle Anforderungen erfüllt. Auf Basis dieses Forschungsdefizits wurde der Handlungsbedarf abgeleitet.

Aufbauend auf den Erkenntnissen wurde ein System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung entwickelt. Es besteht aus dem technischen Teilsystem mit den Systemelementen *Informationsmodelle* und *multikriterielles Optimierungsmodell* sowie dem sozialen Teilsystem, welches die *Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung* beinhaltet.

Die Informationsmodelle haben die Funktion, die Vielzahl der im Planungsprozess erforderlichen Informationen bzgl. der Ressourcen des Produktionssystems sowie der Leistungen der Planungsbereiche zu strukturieren. Es werden das Informationsmodell der Ressourcen des Produktionssystems und das Informationsmodell der Leistungen unterschieden. Das Informationsmodell der Ressourcen des Produktionssystems dient der Beschreibung des grundlegenden Fähigkeitsangebotes sowie der Modellierung der organisatorischen, wirtschaftlichen und technischen Daten der an den Leistungserstellungsprozessen beteiligten Ressourcen. Das Informationsmodell der Leistungen modelliert die Fähigkeitsanforderungen der Leistungen an die Ressourcen des Produktionssystems. Zur Modellierung der Fähigkeiten und Anforderungen wurde eine Klassifikation basierend auf den Normen DIN 8580, DIN 31051 und DIN 13306 entwickelt. Die Abbildung der jeweiligen Informationsmodelle in Klassendiagrammen erfolgte in der Unified Modelling Language (UML).

Das multikriterielle Optimierungsmodell dient der Ermittlung von Reihenfolgen von Produktions- und Instandhaltungsleistungen auf Basis der in den Informationsmodellen zur Verfügung gestellten Planungsinformationen. In der vorliegenden Arbeit wurde ein multikriterielles, lineares, gemischt-ganzzahliges, dynamisches, deterministisches Optimierungsmodell vorgestellt. Im Rahmen der Modellbildung wurde zur Strukturierung der Zeit die Umsetzung mittels Makroperioden t und Mikroperioden s ausgewählt und das Leistungsportfolio von Produktion und Instandhaltung spezifiziert. Zur Abbildung des Entscheidungsproblems wurden zahlreiche funktionale Nebenbedingungen der integrierten Planung implementiert. Als Zielgrößen des Zielsystems wurden Kosten, Zeit, Qualität sowie Flexibilität identifiziert und modelliert. Als Lösungsverfahren für das multikriterielle Optimierungsmodell wurde die Goal-Programming-Methode implementiert.

Die Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung hat die Funktion, die Entscheidungsträger durch die einzelnen Phasen der integrierten Planung zu führen und den Entscheidungsfindungsprozess zu unterstützen. Sie basiert auf der Synthese des Ablaufes von Entscheidungsprozessen der präskriptiven Entscheidungstheorie und umfasst insgesamt sieben Phasen: (1) Identifikation des Handlungsbedarfes, (2) Definition der Aufgabenstellung, (3) Präzisierung der Zielsysteme, (4) Datenerhebung, (5) Entwicklung von Handlungsalternativen, (6) Bewertung und (7) Auswahl.

Die Pilotanwendung des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung belegt die Leistungsfähigkeit des Ansatzes. Als Fallbeispiel wurde ein produzierendes Unternehmen der Haushaltsgeräteindustrie betrachtet. Das betrachtete Produktionssystem umfasst das Segment der Pressenlinien, in dem sich zwei Breitbandpressen als jeweilige Engpassressourcen der Linien befinden. Es werden insgesamt 18 Umformwerkzeuge zur Herstellung von Blechbauteilen eingesetzt. Das Leistungsportfolio setzt sich aus drei virtuellen Leistungen, 19 Produktionsleistungen, zwei ortsflexible zeitorientierten Instandhaltungsleistungen sowie 18 ortsgebundene, zustandsorientierten Instandhaltungsleistungen zusammen. Das System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung konnte die Abläufe im Produktionssystem in seiner Gesamtheit optimieren und ermöglichte die effiziente und effektive Ausführung des Leistungserstellungsprozesses. In der abschließenden Bewertung wurde dargestellt, dass das System die identifizierten Anforderungen erfüllt und sich im Fallbeispiel in einem Zeitraum von ca. 2,7 Jahren amortisiert. Darüber hinaus wurden eine verallgemeinerte Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Systems und eine Analyse der bestehenden Limitationen und der Anwendungsfälle für das System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung vorgestellt.

Das vorgestellte System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung zeichnet sich durch wissenschaftliche Innovationen aus. Diese sind u. a. (1) ein gesamtheitlicher Systemansatz mit technischem und sozialem Teilsystem, (2) das Informationsmodell der Ressourcen des Produktionssystem zur strukturierten Abbildung des Fähigkeitsangebotes, (3) das Informationsmodell der Leistungen zur Modellierung der Fähigkeitsanforderungen, (4) ein multikriterielles Optimierungsmodell, welches das Entscheidungsproblem der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung umfangreich abbildet und die Zielgrößen Kosten, Zeit, Qualität sowie Flexibilität beinhaltet und (5) eine Methode zur Führung und Unterstützung der Entscheidungsträger durch die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung.

10.2 Ausblick

An die dargestellten Erkenntnisse aus der Entwicklung und Anwendung des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung anknüpfend bieten sich Ansätze für weitere wissenschaftliche Forschungstätigkeiten. Sie umfassen (1) die Produktionssystem-übergreifende Planung, (2) die Rekonfiguration von Produktionssystemen sowie (3) Data Analytics und Künstliche Intelligenz.

Der erste Ansatz der Produktionssystem-übergreifenden Planung beinhaltet die Untersuchung von Fragestellungen zu standort- und unternehmensübergreifenden Entscheidungen, Ersatzteillagerung sowie der Einbindung von externen Dienstleistern. Des Weiteren kann die Anwendung des Optimierungsmodells zur Auslegung und Dimensionierung von Elementen des Produktionssystems, z. B. der Lagergröße, untersucht werden.

Der zweite Ansatz der Rekonfiguration von Produktionssystemen bietet zum gegenwärtigen Zeitpunkt kaum erschlossene Anwendungspotenziale für eine integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung (vgl. HOELLTHALER ET AL. (2019)). Es sind Fragestellungen der Allokation von Ressourcen und der Ermittlung von Leistungsreihenfolgen bei Anpassung des Produktionssystems mittels Rekonfiguration von Maschinen, Linien und Segmenten zu beantworten.

Data Analytics und Künstliche Intelligenz als dritter Ansatz bieten Potenziale für die Datenerhebung zu Leistungen und Ressourcen des Produktionssystems. Es gilt zu untersuchen, wie Informationen aus Condition-Monitoring- bzw. Predictive-Maintenance-Systemen sowie den Informationssystemen des Produktionssystems automatisiert bereitgestellt und aktualisiert werden können. Außerdem können die Methoden und Algorithmen der Künstlichen Intelligenz zur Identifikation von Korrelationen in den Prozessen von Produktion und Instandhaltung sowie zur Verbesserung der Datenqualität, z. B. zur Modellierung von nicht-linearen Abnutzungs- und Verschleißverläufen, eingesetzt werden. Darüber hinaus bietet sich die Untersuchung des Einsatzes von Algorithmen des Maschinellen Lernens zur Beschleunigung des Lösungsprozesses des Optimierungsmodells an.

Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

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

ACATECH 2015

Acatech, Hrsg. (2015): *Smart Maintenance für Smart Factories: Mit intelligenter Instandhaltung die Industrie 4.0 vorantreiben*.

ADAM 1993

Adam, D.: *Planung und Entscheidung*. Wiesbaden: Gabler Verlag. 1993.

ALCALDE RASCH 2000

Alcalde Rasch, A.: *Erfolgspotential Instandhaltung: Theoretische Untersuchung und Entwurf eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements: Zugl.: Duisburg, Univ., Diss., 1998*. Erich Schmidt. 2000.

ALMEDER & ALMADA-LOBO 2011

Almeder, C.; Almada-Lobo, B.: Synchronisation of scarce resources for a parallel machine lotsizing problem. *International Journal of Production Research* 49 (2011) 24, S. 7315–7335.

ALMEDER ET AL. 2015

Almeder, C.; Klabjan, D.; Traxler, R.; Almada-Lobo, B.: Lead time considerations for the multi-level capacitated lot-sizing problem. *European Journal of Operational Research* 241 (2015) 3, S. 727–738.

AZADEH ET AL. 2015

Azadeh, A.; Farahani, M. H.; Kalantari, S. S.; Zarrin, M.: Solving a multi-objective open shop problem for multi-processors under preventive maintenance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 78 (2015) 5-8, S. 707–722.

BASRI ET AL. 2017

Basri, E. I.; Abdul Razak, I. H.; Ab-Samat, H.; Kamaruddin, S.: Preventive maintenance (PM) planning: a review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 23 (2017) 2, S. 114–143.

BEHESHTI FAKHER ET AL. 2017

Beheshti Fakher, H.; Nourelfath, M.; Gendreau, M.: A cost minimisation model for joint production and maintenance planning under quality constraints. *International Journal of Production Research* 55 (2017) 8, S. 2163–2176.

BEHRENBECK 1994

Behrenbeck, K. R.: *DV-Einsatz in der Instandhaltung*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag. 1994.

BELTON & STEWART 2002

Belton, V.; Stewart, T. J.: *Multiple Criteria Decision Analysis*. Boston: Springer. 2002.

BEN ALI ET AL. 2011

Ben Ali, M.; Sassi, M.; Gossa, M.; Harrath, Y.: Simultaneous scheduling of production and maintenance tasks in the job shop. *International Journal of Production Research* 49 (2011) 13, S. 3891–3918.

BERLAK 2003

Berlak, J.: *Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen*. Diss. München: Technische Universität München. 2003.

BERRICHI ET AL. 2009

Berrichi, A.; Amodeo, L.; Yalaoui, F.; Châtelet, E.; Mezghiche, M.: Bi-objective optimization algorithms for joint production and maintenance scheduling: application to the parallel machine problem. *Journal of Intelligent Manufacturing* 20 (2009) 4, S. 389–400.

BERRICHI ET AL. 2010

Berrichi, A.; Yalaoui, F.; Amodeo, L.; Mezghiche, M.: Bi-Objective Ant Colony Optimization approach to optimize production and maintenance scheduling. *Computers & Operations Research* 37 (2010) 9, S. 1584–1596.

BERRICHI & YALAOUI 2013a

Berrichi, A.; Yalaoui, F.: Bi objective artificial immune algorithms to the joint production scheduling and maintenance planning. In: 2013 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). IEEE. 2013, S. 810–814.

BERRICHI & YALAOUI 2013b

Berrichi, A.; Yalaoui, F.: Efficient bi-objective ant colony approach to minimize total tardiness and system unavailability for a parallel machine scheduling problem. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 68 (2013) 9-12, S. 2295–2310.

BICHLER 2006

Bichler, M.: Design science in information systems research. Wirtschaftsinformatik 48 (2006) 2, S. 133–135.

BIEDERMANN 1990

Biedermann, H.: *Anlagenmanagement: Managementwerkzeuge zur Rationalisierung*. Schriftenreihe Erfolgspotentiale für Unternehmer und Führungskräfte. Köln: TÜV Rheinland. 1990.

BLOSS 1995

Bloß, C.: *Organisation der Instandhaltung*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag. 1995.

BLUM & NISS 1991

Blum, W.; Niss, M.: Applied mathematical problem solving, modelling, applications, and links to other subjects? State, trends and issues in mathematics instruction. Educational Studies in Mathematics 22 (1991) 1, S. 37–68.

BLÜMEL 2011

Blümel, P.: *Kostenorientierte Instandhaltungsplanung basierend auf Maschinenzustandsdaten: Zugl.: Hannover; Univ., Diss., 2011*. Bd. 4. Berichte aus dem IFW. Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum. 2011.

BMF 2005

BMF: Bilanzsteuerrechtliche Beurteilung von Aufwendungen zur Einführung eines betriebswirtschaftlichen Softwaresystems (ERP-Software). Hrsg. von Bundesminis-

terium der Finanzen. URL: https://elektronische-steuerpruefung.de/bmf/schreiben_erp.pdf?m=1603719201& (besucht am 24. 11. 2020).

BRACHT 2002

Bracht, U.: Die Digitale Fabrik: Von der Vision zum Integrator des Produkt- /Prozess-Engineerings. In: Digitale Fabrik Automotive. 2002.

BRACHT ET AL. 2018

Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: *Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele*. 2. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg. 2018.

BRAUCLIN & HEENE 1995

Brauchlin, E.; Heene, R.: *Problemlösungs- und Entscheidungsmethodik: Eine Einführung*. 4. Aufl. Bd. 1738. Uni-Taschenbücher. Bern: Haupt. 1995.

BRENNER & HESS 2014

Brenner, W.; Hess, T.: *Wirtschaftsinformatik in Wissenschaft und Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2014.

CHAPMAN ET AL. 2000

Chapman, P.; Clinton, J.; Kerber, R.; Khabaza, T.; Reinartz, T.; Shearer, C.; Wirth, R.: CRISP-DM 1.0: Step-by-step data mining guide.

CHARNES & COOPER 1977

Charnes, A.; Cooper, W. W.: Goal programming and multiple objective optimizations: Part I. *European Journal of Operational Research* 1 (1977) 1, S. 39–54.

CHENG ET AL. 2017

Cheng, G. Q.; Zhou, B. H.; Li, L.: Joint optimization of lot sizing and condition-based maintenance for multi-component production systems. *Computers & Industrial Engineering* 110 (2017), S. 538–549.

CHRIST 1979

Christ, G.-P.: Ermittlung der Kosten und des Nutzens betrieblicher Informationen: Ein Versuch zur kosten- und nutzenmäßigen Bewertung von Informationen. Diss. Köln: Universität Köln. 1979.

COLLETTE ET AL. 2004

Collette, Y.; Siarry, P.; Roy, R.: *Multiobjective Optimization*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2004.

CZUCHRA 2010

Czuchra, W.: *UML in logistischen Prozessen: Graphische Sprache zur Modellierung der Systeme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden. 2010.

DANGELMAIER 2009

Dangelmaier, W.: *Theorie der Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2009.

DAS & ABDEL-MALEK 2003

Das, S. K.; Abdel-Malek, L.: Modeling the flexibility of order quantities and lead-times in supply chains. *International Journal of Production Economics* 85 (2003) 2, S. 171–181.

DEMPE & SCHREIER 2006

Dempe, S.; Schreier, H.: *Operations Research: Deterministische Modelle und Methoden*. Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag. 2006.

DIN 31051

DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung (2012). Berlin: Beuth.

DIN 8580

DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung (2003). Berlin: Beuth.

DIN 13306

DIN EN 13306: Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung (2015). Berlin: Beuth.

DIN EN ISO 9000

DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (2015). Berlin: Beuth.

DOMSCHKE ET AL. 2015

Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R.; Scholl, A.: *Einführung in Operations Research*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2015.

DREXL & KIMMS 1997

Drexl, A.; Kimms, A.: Lot sizing and scheduling - Survey and extensions. *European Journal of Operational Research* 99 (1997) 2, S. 221–235.

DREXL & HAASE 2000

Drexl, A.; Haase, K.: Vorbeugende Instandhaltung und Eilaufträge in der Produktionsplanung. In: *Management und Zeit*. Hrsg. von U. Götze; B. Mikus; J. Bloech. Beiträge zur Unternehmensplanung. Heidelberg: Physica-Verlag. 2000, S. 477–492.

DUARTE ET AL. 2013

Duarte, J. C.; Cunha, P. F.; Craveiro, J. T.: Maintenance Database. *Procedia CIRP* 7 (2013), S. 551–556.

DUGUAY ET AL. 1997

Duguay, C. R.; Landry, S.; Pasin, F.: From mass production to flexible/agile production. *International Journal of Operations & Production Management* 17 (1997) 12, S. 1183–1195.

EHRGOTT 2005

Ehrgott, M.: *Multicriteria Optimization*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer. 2005.

EIDENMÜLLER 1991

Eidenmüller, B.: Die Produktion als Wettbewerbsfaktor: Herausforderungen an das Produktionsmanagement. In: *Produktionsforum '91 Produktionsmanagement*. Hrsg. von H.-J. Bullinger. Berichte aus dem Fraunhofer IPA-IAO - Forschung und Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer. 1991, S. 229–251.

EMANS 1988

Emans, H.: Konzepte zur strategischen Planung. In: *Handbuch Strategische Führung*. Hrsg. von H. A. Henzler. Wiesbaden: Gabler Verlag. 1988, S. 109–131.

ENGELHARDT 2015

Engelhardt, P. R.: System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Diss. München: Technische Universität München. 2015.

ENGELS-LINDEMANN 2003

Engels-Lindemann, M.: *Optimierung von Programm- und Budgetentscheidungen*

der betrieblichen Instandhaltung: Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2003. Bd. 379. Berichte aus dem Fraunhofer IPA-IAO - Forschung und Praxis. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag. 2003.

EVERSHEIM 1996

Eversheim, W.: Produktionstechnik und-verfahren. In: Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. Hrsg. von W. Kern; H.-H. Schröder; J. Weber. Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre. Stuttgart: Schäffer-Poeschel. 1996, S. 1534–1544.

FLEISCHMANN & MEYR 1997

Fleischmann, B.; Meyr, H.: The general lotsizing and scheduling problem. Operations-Research-Spektrum 19 (1997) 1, S. 11–21.

F. GEIGER 2015

Geiger, F.: System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten. Diss. München: Technische Universität München. 2015.

M. GEIGER 2005

Geiger, M.: *Multikriterielle Ablaufplanung*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag. 2005.

GHARBI & KENNÉ 2005

Gharbi, A.; Kenné, J.-P.: Maintenance scheduling and production control of multiple-machine manufacturing systems. Computers & Industrial Engineering 48 (2005) 4, S. 693–707.

GLADEN 2003

Gladen, W.: *Kennzahlen- und Berichtssysteme*. Wiesbaden: Gabler Verlag. 2003.

GLASER 2000

Glaser, K.: Wettbewerbsstrategien und Zeit. In: Management und Zeit. Hrsg. von U. Götzte; B. Mikus; J. Bloech. Bd. 1. Beiträge zur Unternehmensplanung. Heidelberg: Physica-Verlag. 2000, S. 169–192.

GÖBEL 2014

Göbel, E.: *Entscheidungen in Unternehmen*. Bd. 8563. Unternehmensführung. Konstanz: UVK. 2014.

GÖSSINGER & KALUZYNY 2010

Gössinger, R.; Kaluzny, M.: *Integrative Koordination von Produktion und Instandhaltung: Konzeption eines dezentralen Ansatzes*. Diskussionsbeiträge zum Produktions- und Logistikmanagement. Dortmund: Lehrstuhl für Produktion und Logistik, Technische Universität Dortmund. 2010.

GÖTTGENS 1996

Göttgens, O.: *Erfolgsfaktoren in stagnierenden und schrumpfenden Märkten*. Wiesbaden: Gabler Verlag. 1996.

GOYAL & PABLA 2015

Goyal, D.; Pabla, B. S.: Condition based maintenance of machine tools: A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 10 (2015), S. 24–35.

GRABNER 2019

Grabner, T.: *Operations Management*. Wiesbaden: Springer. 2019.

GREGOR 2006

Gregor, S.: The Nature of Theory in Information Systems. *MIS Quarterly* 30 (2006) 3, S. 611–642.

GRÜNEWALD 1992

Grünewald, C. W.: *Optimale Koordination von Instandhaltung und Produktion: Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1992*. Bd. 2. Aachener Beiträge zu Humanisierung und Rationalisierung. Aachen: Verlag der Augustinus-Buch. 1992.

GRÜNIG & R. KÜHN 2013

Grünig, R.; Kühn, R.: *Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2013.

GÜNTNER ET AL. 2014

Güntner, G.; Eckhoff, R.; Markus, M.: Bedürfnisse, Anforderungen und Trends in der Instandhaltung 4.0. URL: <http://instandhaltung40.salzburgresearch.at/> (besucht am 29.09.2019).

GUTENBERG 1965

Gutenberg, E.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer. 1965.

HACKSTEIN 1989

Hackstein, R.: *Produktionsplanung und -steuerung (PPS): Ein Handbuch für die Betriebspraxis*. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag. 1989.

HANNE 1998

Hanne, T.: *Multikriterielle Optimierung: Eine Übersicht*.

HEES 2017

Hees, A. F.: *System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme*. Dissertation. München: Technische Universität München. 2017.

HEINEN 1983

Heinen, E.: *Betriebswirtschaftliche Kostenlehre: Kostentheorie und Kostenentscheidungen*. 6. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag. 1983.

HEINRICH 2013

Heinrich, C.: *Situative Entscheidung in Produktionsbetrieben durch integrierte Planung*. Diss. Würzburg: Julius-Maximilians-Universität Würzburg. 2013.

HENKE ET AL. 2019

Henke, M.; Heller, T.; Stich, V.: *acatech STUDIE Smart Maintenance: Der Weg vom Status quo zur Zielvision*.

HERZIG 1975

Herzig, N.: *Die theoretischen Grundlagen betrieblicher Instandhaltung*. Diss. 1975.

HETTICH 1981

Hettich, G.: *Struktur, Funktion und Effizienz betrieblicher Informationssysteme*. Diss. Tübingen: Universität Tübingen. 1981.

HEVNER 2007

Hevner, A. R.: *A Three Cycle View of Design Science Research*. *Scandinavian Journal of Information Systems* 19 (2007) 2, S. 87–92.

HNAIEN & YALAOUI 2013

Hnaien, F.; Yalaoui, F.: *A bi-criteria flow-shop scheduling with preventive maintenance*. *IFAC Proceedings Volumes* 46 (2013) 9, S. 1387–1392.

HOCHDÖRFFER 2018

Hochdörffer, J.: Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken. Diss. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie. 2018.

HOELLTHALER ET AL. 2019

Hoellthaler, G.; Schreiber, M.; Vernickel, K.; Isa, J. b.; Fischer, J.; Weinert, N.; Rosen, R.; Braunreuther, S.: Reconfiguration of production systems using optimization and material flow simulation. *Procedia CIRP* 81 (2019), S. 133–138.

HUBERT 2019

Hubert, B.: *Grundlagen des operativen und strategischen Controllings*. Wiesbaden: Springer. 2019.

HWANG & MASUD 1979

Hwang, C.-L.; Masud, A. S. M.: *Multiple Objective Decision Making: Methods and Applications*. Bd. 164. Berlin, Heidelberg: Springer. 1979.

HWANG & YOON 1981

Hwang, C.-L.; Yoon, K.: *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Bd. 186. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Berlin, Heidelberg: Springer. 1981.

F. JACOB 2006

Jacob, F.: *Quantitative Optimierung dynamischer Produktionsnetzwerke: Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss, 2005*. Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung. Aachen: Shaker. 2006.

O. JACOB 2008

Jacob, O.: *ERP Value*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2008.

JARDINE ET AL. 2006

Jardine, A. K.; Lin, D.; Banjevic, D.: A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (2006) 7, S. 1483–1510.

JING & TOMOHIRO 2010

Jing, T.; Tomohiro, M.: Multi-objective flexible job shop scheduling with uncertain

processing time and machine available constraint based on hybrid optimization approach. In: IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL), 2010. Piscataway, NJ: IEEE. 2010, S. 581–586.

KALLRATH 2013

Kallrath, J.: *Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis*. Wiesbaden: Springer. 2013.

KALUZA ET AL. 1994

Kaluza, B.; Rösner, J.; Mellenthin, B.: *Just-in-Time Instandhaltung: Entwurf eines modernen Instandhaltungsmanagement für Industrieunternehmen*. Bd. 200. Diskussionsbeiträge des Fachbereichs Wirtschaftswissenschaft. Duisburg. 1994.

KALUZA 1996

Kaluza, B.: Controlling der Flexibilität. In: Lexikon des Controlling. Hrsg. von C. Schulte. München: Oldenbourg Verlag. 1996, S. 257–260.

KASPER 2016

Kasper, S.: *Integrierte Optimierung der Losgrößen- und Instandhaltungsplanung bei industrieller Sachgüterproduktion*. Wiesbaden: Springer. 2016.

KHATAMI & ZEGORDI 2017

Khatami, M.; Zegordi, S. H.: Coordinative production and maintenance scheduling problem with flexible maintenance time intervals. *Journal of Intelligent Manufacturing* 28 (2017) 4, S. 857–867.

KIRK 1970

Kirk, D. E.: *Optimal control theory: An introduction*. Prentice-Hall networks series. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall. 1970.

R. KLEIN & SCHOLL 2012

Klein, R.; Scholl, A.: *Planung und Entscheidung: Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse*. 2. Aufl. Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. München: Franz Vahlen. 2012.

W. KLEIN 1988

Klein, W.: *Informationswesen in der Instandhaltung: Zugl.: Aachen, Technische*.

Hochsch., Diss., 1987. Bd. 16. Forschungsinstitut für Rationalisierung und Institut für Arbeitswissenschaft der RWTH Aachen. Berlin: Springer. 1988.

KLEENTER 1995

Klenter, G.: *Zeit - strategischer Erfolgsfaktor von Industrieunternehmen: Zugl.: Duisburg, Univ., Diss., 1995.* Bd. 9. Duisburger betriebswirtschaftliche Schriften. Hamburg: S + W Steuer- und Wirtschaftsverlag. 1995.

KLETTI 2015

Kletti, J.: *MES - Manufacturing Execution System.* Berlin, Heidelberg: Springer. 2015.

KORTE & VYGEN 2018

Korte, B.; Vygen, J.: *Kombinatorische Optimierung.* Berlin, Heidelberg: Springer. 2018.

KRÖNING 2014

Kröning, S.: *Integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung und -steuerung mittels Simulationstechnik.* Dissertation. 2014.

W. KÜHN 2006

Kühn, W.: *Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner.* 1. Aufl. Carl Hanser Fachbuchverlag. 2006.

KURBEL 2016

Kurbel, K.: *Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie: Von MRP bis Industrie 4.0.* 8. Aufl. Berlin, Boston: de Gruyter. 2016.

LAUX ET AL. 2014

Laux, H.; Gillenkirch, R. M.; Schenk-Mathes, H. Y.: *Entscheidungstheorie.* Berlin, Heidelberg: Springer. 2014.

LAUX ET AL. 2018

Laux, H.; Gillenkirch, R. M.; Schenk-Mathes, H. Y.: *Entscheidungstheorie.* Berlin, Heidelberg: Springer. 2018.

LEI ET AL. 2018

Lei, Y.; Li, N.; Guo, L.; Li, N.; Yan, T.; Lin, J.: *Machinery health prognostics: A*

systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing* 104 (2018), S. 799–834.

LELKE 2005

Lelke, F.: Kennzahlensysteme in konzerngebundenen Dienstleistungsunternehmen unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung eines wissensbasierten Kennzahlengenerators. Diss. Essen: Universität Duisburg-Essen. 2005.

LIAO ET AL. 2017

Liao, W.; Chen, M.; Yang, X.: Joint optimization of preventive maintenance and production scheduling for parallel machines system. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 32 (2017) 1, S. 913–923.

LÖDDING 2008

Lödding, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer. 2008.

LOUIS 2009

Louis, P.: *Manufacturing Execution Systems*. Wiesbaden: Gabler Verlag. 2009.

MARCZINSKI 2008

Marczinski, G.: Einsatzgebiete von ERP-, APS- und MES-Lösungen. *ERP Management* (2008) 4, S. 62–64.

MARCZINSKI 2005

Marczinski, G.: Digitale Fabrik: mit dem 4-Stufenmodell zum Erfolg. *PPS Management* 10 (2005) 2, S. 38–41.

MARLER & ARORA 2004

Marler, R. T.; Arora, J. S.: Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 26 (2004) 6, S. 369–395.

MIRABEDINI & IRANMANESH 2014

Mirabedini, S. N.; Iranmanesh, H.: A scheduling model for serial jobs on parallel machines with different preventive maintenance (PM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 70 (2014) 9-12, S. 1579–1589.

MISHRA & SHRIVASTAVA 2020

Mishra, A. K.; Shrivastava, D.: Integration of Production Scheduling and Group Maintenance Planning in Multi-unit System employing TLBO algorithm. *Procedia CIRP* 93 (2020), S. 949–954.

MOGHADDAM 2013

Moghaddam, K. S.: Multi-objective preventive maintenance and replacement scheduling in a manufacturing system using goal programming. *International Journal of Production Economics* 146 (2013) 2, S. 704–716.

MOKHTARI ET AL. 2012

Mokhtari, H.; Mozdgir, A.; Kamal Abadi, I. N.: A reliability/availability approach to joint production and maintenance scheduling with multiple preventive maintenance services. *International Journal of Production Research* 50 (2012) 20, S. 5906–5925.

MORADI ET AL. 2011

Moradi, E.; Fatemi Ghomi, S.; Zandieh, M.: Bi-objective optimization research on integrated fixed time interval preventive maintenance and production for scheduling flexible job-shop problem. *Expert Systems with Applications* 38 (2011) 6, S. 7169–7178.

MORYSON 2004

Moryson, R.-D.: Die systematische, rechnerunterstützte Prozessauswahl und -kettenerstellung in der Grobplanungsphase der Produktionsplanung. Diss. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule. 2004.

MOSER 2014

Moser, R.: *Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke: Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung: Zugl.: Karlsruhe, Karlsruhe Inst. für Technologie, Diss., 2014*. Bd. 185. Forschungsberichte aus dem wbk. Aachen: Shaker. 2014.

NAGARUR & KAEWPLANG 1999

Nagarur, N.; Kaewplang, J.: An object-oriented decision support system for maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 5 (1999) 3, S. 248–257.

NAGARUR ET AL. 1999

Nagarur, N.; Keawplang, J.; Batanov, D.: Methodology for developing maintenance management systems using object orientation. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing* 9 (1999) 1, S. 27–47.

NYHUIS 2008

Nyhuis, P.: *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2008.

OSSADNIK 1998

Ossadnik, W.: *Mehrzielorientiertes strategisches Controlling: Methodische Grundlagen und Fallstudien zum führungsunterstützenden Einsatz des Analytischen Hierarchie-Prozesses*. Heidelberger betriebswirtschaftliche Studien. Heidelberg: Physica-Verlag. 1998.

OSTGATHE 2012

Ostgathe, M.: System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Diss. München: Technische Universität München. 2012.

PAPROCKA 2019

Paprocka, I.: The model of maintenance planning and production scheduling for maximising robustness. *International Journal of Production Research* 57 (2019) 14, S. 4480–4501.

PAPROCKA & SKOŁUD 2017

Paprocka, I.; Skołud, B.: A hybrid multi-objective immune algorithm for predictive and reactive scheduling. *Journal of Scheduling* 20 (2017) 2, S. 165–182.

PAULICK 2003

Paulick, S.: Optimierung. In: Der Brockhaus. Bd. 10. Leipzig. 2003, S. 652.

PAVAN & TODESCHINI 2009

Pavan, M.; Todeschini, R.: Multicriteria Decision-Making Methods. In: *Comprehensive Chemometrics*. Hrsg. von S. D. Brown; R. Tauler; B. Walczak. Elsevier. 2009, S. 591–629.

PFISTER ET AL. 2017

Pfister, H.-R.; Jungermann, H.; Fischer, K.: *Die Psychologie der Entscheidung*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2017.

PFOHL & BRAUN 1981

Pfohl, H.-C.; Braun, G. E.: *Entscheidungstheorie: Normative und deskriptive Grundlagen des Entscheidens*. Bd. 8. Landsberg am Lech: Verlag Moderne Industrie. 1981.

PORTER 1996

Porter, M. E.: What Is Strategy? *Harvard Business Review* (1996), S. 61–78.

PRESSMAR 1980

Pressmar, D. B.: Modellierung und Optimierung dynamischer Produktionssysteme. In: *Führungsprobleme industrieller Unternehmungen*. Hrsg. von D. Hahn. Berlin, New York: de Gruyter. 1980, S. 453–469.

PRINZ 2016

Prinz, A.: Mathematische Modellierung zur Optimierung der Wertschöpfungsverteilung nach quantitativen und qualitativen Kriterien in Produktionsnetzwerken der diskreten Fertigung. Diss. Stuttgart: Universität Stuttgart. 2016.

PROKSCH 2002

Proksch, R.: *Modellbasierte Planung und Bewertung von Instandhaltungsstrategien am Beispiel einer Serienfertigung mit geringer Variantenzahl: Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss.* Bd. 354. Berichte aus dem Fraunhofer IPA-IAO - Forschung und Praxis. Heimsheim: Jost-Jetter. 2002.

RAO 2009

Rao, S. S.: *Engineering Optimization*. Hoboken: John Wiley & Sons. 2009.

REFA 1991

REFA: *Methodenlehre der Betriebsorganisation*. 1. Aufl. München: Hanser. 1991.

ROMMELFANGER & EICKEMEIER 2002

Rommelfanger, H. J.; Eickemeier, S. H.: *Entscheidungstheorie*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2002.

RUMPE 2011

Rumpe, B.: *Modellierung mit UML: Sprache, Konzepte Und Methodik*. Xpert.press. Dordrecht: Springer. 2011.

SAATY 2008

Saaty, T. L.: Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales. Serie A. Matematicas* 102 (2008) 2, S. 251–318.

SAFAEI ET AL. 2010

Safaei, N.; Banjevic, D.; Jardine, A. K.: Impact of the use-based maintenance policy on the performance of cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Research* 48 (2010) 8, S. 2233–2260.

SAGER 2019

Sager, B. M.: *Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke*. Diss. München: Technische Universität München. 2019.

SALONEN & GOPALAKRISHNAN 2020

Salonen, A.; Gopalakrishnan, M.: Practices of preventive maintenance planning in discrete manufacturing industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* (2020).

SCHENK ET AL. 2014

Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2014.

SCHNEIDER 1995

Schneider, D.: *Informations- und Entscheidungstheorie*. München, Oldenbourg: de Gruyter. 1995.

SCHREIBER ET AL. 2018

Schreiber, M.; Klöber-Koch, J.; Richter, C.; Reinhart, G.: Integrated Production and Maintenance Planning for Cyber-physical Production Systems. *Procedia CIRP* 72 (2018), S. 934–939.

SCHREIBER ET AL. 2020

Schreiber, M.; Schutte, C. S. L.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: A performance measurement system for integrated production and maintenance planning. *Procedia CIRP* (2020) 93, S. 1037–1042.

SCHREIBER ET AL. 2019

Schreiber, M.; Vernickel, K.; Richter, C.; Reinhart, G.: Integrated production and maintenance planning in cyber-physical production systems. *Procedia CIRP* 79 (2019), S. 534–539.

SCHREYÖGG & D. GEIGER 2016

Schreyögg, G.; Geiger, D.: *Organisation: Grundlagen moderner Organisationsgestaltung : mit Fallstudien*. 6. Aufl. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Gabler. 2016.

SCHUH ET AL. 2005

Schuh, G.; Kampker, A.; Franzkoch, B.; Wemhöner, N.: Studie Intelligent Maintenance: Potenziale zustandsorientierter Instandhaltung.

SCHUH ET AL. 2012a

Schuh, G.; Brosze, T.; Brandenburg, U.; Cuber, S.; Schenk, M.; Quick, J.; Schmidt, C.; Helmig, J.; Schürmeyer, M.; Hering, N.: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. In: *Produktionsplanung und -steuerung 1*. Hrsg. von G. Schuh; V. Stich. Bd. 2. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. 2012, S. 9–293.

SCHUH ET AL. 2012b

Schuh, G.; Schürmeyer, M.; Hering, N.: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung: Funktionen. In: *Produktionsplanung und -steuerung 1*. Hrsg. von G. Schuh; V. Stich. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. 2012, S. 195–293.

SCHWELLBACH 2004

Schwellbach, U. von: Zeitorientierung als Erfolgsfaktor in Industriebetrieben. In: *Komplexität und Dynamik als Herausforderung für das Management*. Hrsg. von F. Maier. Bd. 9. Edition Wissenschaft. Wiesbaden: Gabler. 2004, S. 93–117.

SEEBACHER 2013

Seebacher, G.: *Ansätze zur Beurteilung der produktionswirtschaftlichen Flexibilität: Zugl.: Klagenfurt, Alpen-Adria Univ., Diss., 2013*. Bd. 4. Anwendungsorientierte Beiträge zum industriellen Management. Berlin: Logos-Verlag. 2013.

SEICHT 1994

Seicht, G.: Industrielle Anlagenwirtschaft. In: Industriebetriebslehre. Hrsg. von M. Schweitzer. Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. München: Vahlen. 1994, S. 327–445.

SI ET AL. 2011

Si, X.-S.; Wang, W.; Hu, C.-H.; Zhou, D.-H.: Remaining useful life estimation - A review on the statistical data driven approaches. *European Journal of Operational Research* 213 (2011) 1, S. 1–14.

SIMON 1988

Simon, H., Hrsg. (1988): *Wettbewerbsvorteile und Wettbewerbsfähigkeit*. Bd. 16. USW-Schriften für Führungskräfte. Stuttgart: Fachverlag für Wirtschaft und Steuern Schäffer. 1988.

SONG ET AL. 2014

Song, W. J.; Zhang, C. Y.; Lin, W. W.; Shao, X. Y.: Flexible Job-Shop Scheduling Problem with Maintenance Activities Considering Energy Consumption. *Applied Mechanics and Materials* 521 (2014), S. 707–713.

STAMMEN-HEGENER 2002

Stammen-Hegener, C.: *Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei ein- und mehrstufiger Fertigung*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag. 2002.

STEIN 1988

Stein, H.-G.: Kostenführerschaft als strategische Erfolgsposition. In: *Handbuch Strategische Führung*. Hrsg. von H. A. Henzler. Wiesbaden: Gabler Verlag. 1988, S. 397–426.

STEINHÄUSSER 2018

Steinhäuser, T.: Methode zur Reifebewertung und Priorisierung von Aufgaben in der Serienreifmachung komplexer Produkte. Diss. München: Technische Universität München. 2018.

STONEBRAKER 1996

Stonebraker, P. W.: Restructuring the bill of material for productivity: A strategic evaluation of product configuration. *International Journal of Production Economics* 45 (1996) 1-3, S. 251–260.

STRUNZ 2012

Strunz, M.: *Instandhaltung*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2012.

SUHL & MELLOULI 2013

Suhl, L.; Mellouli, T.: *Optimierungssysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2013.

TESCHEMACHER 2019

Teschemacher, U. S.: Dynamische Routenzugoptimierung bei kurzfristigen Materialabrufen. Diss. München: Technische Universität München. 2019.

THUN 2002

Thun, J.: *Die zeitbasierte Fertigungsstrategie*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag. 2002.

TRIST & BAMFORTH 1951

Trist, E. L.; Bamforth, K. W.: Some Social and Psychological Consequences of the Longwall Method of Coal-Getting: An Examination of the Psychological Situation and Defences of a Work Group in Relation to the Social Structure and Technological Content of the Work System. *Human Relations* 4 (1951) 1, S. 3–38.

UDE 2010

Ude, J.: *Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke: Ein Bewertungsansatz unter Berücksichtigung multikriterieller Zielsysteme, Dynamik und Unsicherheit: Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2010*. Bd. 157. Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Aachen: Shaker. 2010.

ULICH 1993

Ulich, E.: CIM: - eine integrative Gestaltungsaufgabe im Spannungsfeld von Mensch, Technik und Organisation. In: CIM. Hrsg. von G. Cyranek. Mensch, Technik, Organisation. Zürich: Verlag der Fachvereine. 1993, S. 29–43.

ULICH 2005

Ulich, E.: *Arbeitspsychologie*. Schäffer-Poeschel. 2005.

ULICH 2013

Ulich, E.: Arbeitssysteme als Soziotechnische Systeme: eine Erinnerung. *Psychology of Everyday Activity* 6 (2013) 1, S. 4–12.

H. ULRICH 1982

Ulrich, H.: Anwendungsorientierte Wissenschaft. *Die Unternehmung* 36 (1982) 1, S. 1–10.

P. ULRICH & HILL 1976

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Teil I. *Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt* 5 (1976) 7, S. 304–309.

VDI 1992

VDI, Hrsg. (1992): *Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung: Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen*. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag. 1992.

VDI 2898

VDI Richtlinie 2898: DV-Einsatz in der Instandhaltung (1996). Berlin: Beuth.

VDI 2815

VDI-Richtlinie 2815 (Blatt 5): Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung: Betriebsmittel (1978). Berlin: Beuth.

VDI 2860

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

VDI 2885

VDI-Richtlinie 2885: Einheitliche Daten für die Instandhaltungsplanung und Ermittlung von Instandhaltungskosten (2003). Berlin: Beuth.

VDI 2888

VDI-Richtlinie 2888: Zustandsorientierte Instandhaltung (1999). Berlin: Beuth.

VDI 2890

VDI-Richtlinie 2890: Planmäßige Instandhaltung (2017). Berlin: Beuth.

VDI 2895

VDI-Richtlinie 2895: Organisation der Instandhaltung (2012). Berlin: Beuth.

VDI 5600

VDI-Richtlinie 5600 (Blatt 1): Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems - MES) (2016). Berlin: Beuth.

VOEGELE & SOMMER 2012

Voegele, A. A.; Sommer, L.: *Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. 2012.

VOIGT 2000

Voigt, K.-I.: Zeitwettbewerb. In: Management und Zeit. Hrsg. von U. Götze; B. Mikus; J. Bloech. Bd. 29. Beiträge zur Unternehmensplanung. Heidelberg: Physica-Verlag. 2000, S. 193–220.

WANG & LIU 2015

Wang, S.; Liu, M.: Multi-objective optimization of parallel machine scheduling integrated with multi-resources preventive maintenance planning. *Journal of Manufacturing Systems* 37 (2015), S. 182–192.

J. WEBER 2012

Weber, J.: *Logistikkostenrechnung*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2012.

J. WEBER & GROSSKLAUS 1995

Weber, J.; Großklaus, A., Hrsg. (1995): *Kennzahlen für die Logistik*. Bd. 8. Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Hochschule für Unternehmensführung. Stuttgart: Schäffer-Poeschel. 1995.

J. WEBER & SCHÄFFER 2000

Weber, J.; Schäffer, U.: *Balanced Scorecard & Controlling*. Wiesbaden: Gabler. 2000.

J. WEBER ET AL. 1994

Weber, J.; Kummer, S.; Großklaus, A.; Nippel, H.; Warnke, D.: Methodik zur Generierung von Logistik-Kennzahlen. Forschungspapier. Vallendar: Wissenschaftliche Hochschule für Unternehmensführung. 1994.

J. WEBER ET AL. 1997

Weber, J.; Kummer, S.; Großklaus, A.; Nippel, H.; Warnke, D.: Methodik zur Generierung von Logistik-Kennzahlen. Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis (1997) 4, S. 438–454.

W. WEBER 1991

Weber, W.: *Einführung in die Betriebswirtschaftslehre*. Wiesbaden: Gabler. 1991.

WEINSTEIN & CHUNG 1999

Weinstein, L.; Chung, C.-H.: Integrating maintenance and production decisions in a hierarchical production planning environment. Computers & Operations Research 26 (1999) 10-11, S. 1059–1074.

WERNERS 2013

Werners, B.: *Grundlagen des Operations Research*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2013.

WESTKÄMPER 2007

Westkämper, E.: Digital Manufacturing In The Global Era. In: Digital Enterprise Technology. Hrsg. von P. F. Cunha; P. G. Maropoulos. Boston: Springer. 2007, S. 3–14.

WESTKÄMPER ET AL. 1999

Westkämper, E.; Sihn, W.; Stender, S.: *Instandhaltungsmanagement in neuen Organisationsformen*. Berlin, Heidelberg: Springer. 1999.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 7. Aufl. München: Hanser. 2010.

WIENDAHL ET AL. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. CIRP Annals 56 (2007) 2, S. 783–809.

WOLTER 2016

Wolter, A.: Operative Produktions- und Instandhaltungsplanung: Ein integrativer

Planungsansatz. Diss. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. 2016.

WONG ET AL. 2012

Wong, C. S.; Chan, F.; Chung, S. H.: A genetic algorithm approach for production scheduling with mould maintenance consideration. *International Journal of Production Research* 50 (2012) 20, S. 5683–5697.

YE & MA 2015

Ye, J.; Ma, H.: Multiobjective Joint Optimization of Production Scheduling and Maintenance Planning in the Flexible Job-Shop Problem. *Mathematical Problems in Engineering* 2015 (2015), S. 1–9.

YOUSSEF ET AL. 2003

Youssef, H.; Brigitte, C.-M.; Noureddine, Z.: Lower bounds and multiobjective evolutionary optimization for combined maintenance and production scheduling in job shop. In: *ETFA 2003*. Piscataway, N.J.: IEEE. 2003, S. 95–100.

ZAVADSKAS ET AL. 2014

Zavadskas, E. K.; Turskis, Z.; Kildiene, S.: State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and Economic Development of Economy* 20 (2014) 1, S. 165–179.

ZELEWSKI ET AL. 2008

Zelewski, S.; Hohmann, S.; Hügens, T.: *Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme*. Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre. München: Oldenbourg. 2008.

ZHANG 1990

Zhang, S.: *Instandhaltung und Anlagenkosten*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag. 1990.

G. ZIMMERMANN 1996

Zimmermann, G.: Faktorkombinationen. In: *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. Hrsg. von W. Kern; H.-H. Schröder; J. Weber. *Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel. 1996, S. 444–451.

H.-J. ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991

Zimmermann, H.-J.; Gutsche, L.: *Multi-Criteria Analyse: Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen*. Heidelberger Lehrtexte Wirtschaftswissenschaften. Berlin, Heidelberg: Springer. 1991.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Defizite der Produktions- und Instandhaltungsplanung und beeinträchtigte Bereiche	6
1.2	Struktur eines Produktionssystems und Betrachtungsbereich anhand des Ebenenmodells in Anlehnung an WIENDAHL ET AL. (2007, S. 785) und WESTKÄMPER (2007)	10
1.3	Gliederung der Produktionsplanung und -steuerung nach Aufgabengruppen und Aufgaben in Anlehnung an SCHUH ET AL. (2012a, S. 38–57) und HACKSTEIN (1989, S. 3–17)	12
1.4	Formalziele der Instandhaltung mit ihren Zielbeziehungen in Anlehnung an BIEDERMANN (1990, S. 38–42)	15
1.5	Gliederung der Instandhaltungsplanung und -steuerung nach Aufgabengruppen und Aufgaben in Anlehnung an W. KLEIN (1988, S. 38)	16
1.6	Aufbau der Arbeit	20
2.1	Klassifikationsschema für Optimierungsmodelle in Anlehnung an DOMSCHKE ET AL. (2015, S. 7) und RAO (2009, S. 15–16)	28
4.1	Klassifikation von Modellen der modellgestützten Planung in Anlehnung an WERNERS (2013, S. 3–4)	39
5.1	Spezifikation des Optimierungsmodells der vorliegenden Arbeit	64
5.2	Prozessphasen der Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung	66
5.3	System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung	67
6.1	Klassifikationsstruktur zur Beschreibung von Ressourcenkombinationen für Produktions- und Instandhaltungsleistungen	72
6.2	Klassifikationsstruktur zur Beschreibung der Fähigkeiten von Ressourcenkombinationen für Produktionsleistungen	73

6.3	Klassifikationsstruktur zur Beschreibung der Fähigkeiten von Ressourcenkombinationen für Instandhaltungsleistungen	74
6.4	Darstellung des Informationsmodells der Ressourcen des Produktionssystems in UML-Notation	75
6.5	Darstellung des Informationsmodells der Leistungen in UML-Notation	77
6.6	Technologieabgleich zur Bestimmung der Struktur des Produktionssystems und der Leistungen	78
7.1	Struktur der Modellbildung des multikriteriellen Optimierungsmodells zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung	81
7.2	Strukturierung der Zeit eines endlichen Planungshorizontes mittels Makro- und Mikroperioden	83
7.3	Wechselmatrix von Leistungen und Equipments an einer Maschine . .	87
7.4	Planungsphasen von Produktionssystemen im Fabriklebenszyklus in Anlehnung an SCHENK ET AL. (2014, S. 151)	91
7.5	Zielgrößen der integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung .	95
7.6	Arbeitsvorgangsbezogene Durchlaufzeit eines Produktionsauftrages in Produktionssystemen in Anlehnung an WIENDAHL (2010, S. 263) . . .	97
7.7	Struktur des Abschnittes mathematisches Modell zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung	99
8.1	Phasen der Methode zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung mit den zugehörigen Abschnitten des Kapitels	125
8.2	Performance Measurement System für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung	131
9.1	Produktionssystem und beispielhafte Blechbauteile als Endprodukte des Fallbeispiels	144
9.2	Prinzipdarstellung der prototypischen softwaretechnischen Umsetzung des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung .	149
9.3	Gantt-Chart Darstellung der mittels der Zielsysteme ermittelten integrierten Produktions- und Instandhaltungspläne des Fallbeispiels . .	151
9.4	Vergleich der Zustandsverläufe der Equipments (a) E4, (b) E5 und (c) E18 in den Handlungsalternativen	152

Abbildungsverzeichnis

9.5	Synchronisation des Einsatzes des Equipments E5 in der Makroperiode 3 zwischen der Maschine M2 und der Werkstatt W1 in dem anhand des Zielsystems 1 ermittelten integrierten Plans . . .	153
9.6	Vergleich der Bestandsverläufe in den Handlungsalternativen	155
9.7	Auszug eines beispielhaften integrierten Produktions- und Instandhaltungsplans	156
9.8	Verläufe und Vergleich der Lagerbestände von Realplanung und dem Planungsergebnis des Zielsystems 1	162
D.1	Simulationsmodell des Produktionssystems in der Ebenenansicht . . .	220
D.2	Vergleich der Produktionsvolumen des Simulationsmodells und des realen Produktionssystems für beide Pressenlinien	221

Tabellenverzeichnis

1.1	Berücksichtigte Entscheidungsdimensionen der Produktionsplanung . .	13
1.2	Berücksichtigte Entscheidungsdimensionen der Instandhaltungsplanung	17
2.1	Notation der Lösungsverfahren der Klasse a priori Information in An- lehnung an MARLER & ARORA (2004) und SAGER (2019, S. 24)	30
4.1	Klassifikation der Optimierungsmodelle zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung	49
4.2	Anforderungsabgleich von bestehenden Ansätzen zur Modellierung von Produktionssystemen und planungsrelevanten Informationen sowie Ansätzen zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung . .	57
6.1	Gliederung der Betriebsmittel in Produktionssystemen nach VDI 2815	71
9.1	Leistungsportfolio der Breitbandpressen	146
9.2	Zielsysteme des Fallbeispiels	148
9.3	Bewertung der Planungsergebnisse	154
9.4	Erfüllungsgrad der Anforderungen an einen Ansatz zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung	159
9.5	Finanzielle Aufwände des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung	161
9.6	Nutzen der Anwendung des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung im Fallbeispiel	163
A.1	Adressierung von Defiziten mittels Anforderungen an Ansätze zur inte- grierten Produktions- und Instandhaltungsplanung	204
B.1	Einordnung der Modellparameter in die Informationsmodelle	205

Anhang

A Anforderungen an Ansätze zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

In der Tabelle A.1 sind die mittels Anforderungen (vgl. Abschnitt 3.2) adressierten Defizite der prozessualen und analytischen Komplexität (vgl. Abschnitt 1.2) dargestellt.

Tabelle A.1: Adressierung von Defiziten mittels Anforderungen an Ansätze zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Anforderungen	Defizite der prozessualen Komplexität			Defizite der analytischen Komplexität		
	Nachgelagerte Berücksichtigung der Bedarfe für Instandhaltungsleistungen	Fehlender Informationsaustausch zwischen den Planungsbereichen	Intransparente Handlungsalternativenermittlung und fehlende Bewertung	Fehlende analytische Ermittlung der Handlungsalternativen	Unzureichende Berücksichtigung der Restriktionen und Abbildung der Entscheidungsdimensionen	Fehlende integr. Berücksichtigung der Unternehmens-, Produktions- und Instandhaltungsziele
A.1 Ausreichende Detailtiefe der Produktionssystemmodellierung					●	
A.2 Berücksichtigung der Restriktionen der Ressourcen des Produktionssystems					●	
A.3 Abbildung der Entscheidungsdimensionen der Produktionsplanung					●	
A.4 Abbildung der Entscheidungsdimensionen der Instandhaltungsplanung	●				●	
A.5 Berücksichtigung verschiedener Instandhaltungsstrategien	●				●	
A.6 Berücksichtigung der Interdependenzen der Planungsbereiche		●	●		●	
A.7 Vollständige Durchsuchung des Lösungsraumes			●	●		
A.8 Berücksichtigung mehrerer Zielgrößen in der Planung			●			●
A.9 Erzeugung multipler Handlungsalternativen		●	●			
A.10 Abbildung der Phasen der Entscheidungsfindung	●	●	●			

● Anforderung adressiert Defizit

B Einordnung der Modellparameter und Indexmengen in die Informationsmodelle des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

In der Tabelle B.1 sind die Modellparameter des mathematischen Optimierungsmodells (vgl. Kapitel 7) in die Informationsmodelle (vgl. Kapitel 6) des Systems zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung eingeordnet.

Es werden planerische und technische Informationen unterschieden. Die planerischen Informationen beinhalten die Vorgaben des Managements der beteiligten Planungsbereiche sowie Angaben zu den betrieblichen Abläufen des Produktionssystems (u. a. Betriebszeiten, Rüstkosten und -zeiten). Die technischen Informationen umfassen die technischen Daten der Leistung-Ressourcen-Befähigungen sowie des Produktionssystems (u. a. Verschleißrate). Die Verbindung von Leistungen und Ressourcen erfolgt mittels des Technologieabgleiches der Technologievektoren (vgl. Abschnitt 6.3). Im mathematischen Optimierungsmodell werden ausschließlich technisch durchführbare Leistung-Linie-Maschine-Equipment-Betriebsmodus-Befähigungen berücksichtigt.

Tabelle B.1: Einordnung der Modellparameter in die Informationsmodelle

	planerische Informationen	technische Informationen
$b \in B$	X	
BAC_p^{INI}	X	
$befLLP_{l_1l_2p}$		X
$befPEP_{plmeb}$		X

Fortsetzung auf nächster Seite

Tabelle B.1: Einordnung der Modellparameter in die Informationsmodelle (Fortsetzung)

	planerische Informationen	technische Informationen
$cBAC_{pt}$	X	
cap_m	X	
$cCHB_{mb_1b_2}$	X	
$cINV_{pt}$	X	
COE_{pe}^{INI}	X	
COE_{pe}^{LIM}	X	
COE_{pe}^{MAX}		X
COM_{pm}^{INI}	X	
COM_{pm}^{LIM}	X	
COM_{pm}^{MAX}		X
$cPEP_{plmeb}$	X	
$cSET_{mp_1p_2e_1e_2}$	X	
$cTR_{amp_1p_2e_1e_2}$	X	
dem_{pt}	X	
DR_{pt}^{MIN}	X	
INV_p^{INI}	X	
INV_p^{MAX}		X
INV_p^{MIN}	X	
$mrc_{p_1p_2}$		X
pbz_{mi}	X	
$s \in S$	X	
SET_{plmeb}^{INI}	X	

Fortsetzung auf nächster Seite

Tabelle B.1: Einordnung der Modellparameter in die Informationsmodelle
(Fortsetzung)

	planerische Informationen	technische Informationen
$t \in T$	X	
$tCHB_{mb_1b_2}$	X	
$tDEC_p$	X	
$tHAP_p$	X	
$tPEP_{plmeb}$	X	
$tSET_{mp_1p_2e_1e_2}$	X	
weo_{plmeb}^E		X
weo_{plmeb}^M		X

C Ergänzung der Darstellung des mathematischen Modells zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung

Bei der Darstellung der mathematischen Formulierungen des Modells zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung in Abschnitt 7.2 wurde zur Vermeidung von Wiederholungen auf die Vorstellung gleichartiger Formulierungen verzichtet. Nachfolgend werden diese mathematischen Formulierungen vorgestellt. Sie ergänzen folglich die Formulierungen des mathematischen Modells zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung in Kapitel 7.

NIP.4 Abbildung von Wechseln von Leistungen und Equipments: Der Wechsel von einer Leistung p_1 zu einer Leistung p_2 oder der Wechsel von Equipment e_1 zu Equipment e_2 oder deren Kombination an einer Maschine m wird durch die binäre Entscheidungsvariable $bCHPE_{tspm_1p_2e_1e_2}$ repräsentiert. Die Ungleichungen (7.9) und (7.10) modellieren den Wechsel für die Mikroperioden ($s > 1$) der Makroperioden ($t > 1$). Sie müssen für die erste Mikroperiode ($s = 1$) der Makroperiode t abgewandelt werden. Die binäre Entscheidungsvariable $bCHPE_{tspm_1p_2e_1e_2}$ nimmt den Wert eins an, wenn ein Wechsel zwischen einer aktiven Leistung-Ressourcen-Kombination der letzten Mikroperiode ($s = s^{max}$) der vorherigen Makroperiode ($t - 1$) und aktiven Leistung-Ressourcen-Kombination der Maschine m der Mikroperiode s der Makroperiode t stattfindet (vgl. Ungleichungen (C.1) und (C.2)).

$$\begin{aligned}
 & bCHPE_{tspm_1p_2e_1e_2} \geq \\
 & \sum_{(p_1,l_1,m,e_1,b_1) \in PLMEB} bUSE_{(t-1)s^{max}p_1l_1m,e_1,b_1} + \sum_{(p_2,l_2,m,e_2,b_2) \in PLMEB} bUSE_{tsp_2l_2m,e_2,b_2} - 1 \\
 & \forall t \in \{T \mid t > 1\}, s \in \{S \mid s = 1\}, \\
 & (p_1, m, e_1 \wedge p_2, m, e_2) \in \{PME \mid p_1 \neq p_2 \vee e_1 \neq e_2\} \quad (C.1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& bCHPE_{tspm_1p_2e_1e_2} \leq \\
& \frac{1}{2} \cdot \left(\sum_{(p_1,l_1,m,e_1,b_1) \in PLMEB} bUSE_{(t-1)s^{\max}p_1l_1m_e_1b_1} + \sum_{(p_2,l_2,m,e_2,b_2) \in PLMEB} bUSE_{tsp_2l_2m_e_2b_2} \right) \\
& \quad \forall t \in \{T \mid t > 1\}, s \in \{S \mid s = 1\}, \\
& \quad (p_1, m, e_1 \wedge p_2, m, e_2) \in \{PME \mid p_1 \neq p_2 \vee e_1 \neq e_2\} \quad (C.2)
\end{aligned}$$

Ebenso muss die Modellierung für die erste Mikroperiode ($s = 1$) der ersten Makroperiode ($t = 1$) angepasst werden. Die Entscheidungsvariable $bCHPE_{tspm_1p_2e_1e_2}$ nimmt den Wert eins an, wenn sich die initial aktive Leistung-Ressourcen-Kombination im Ausgangszustand $SET_{p_1l_1m_e_1b_1}^{INI}$ der Maschine m von der aktiven Leistung-Ressourcen-Kombination $bUSE_{tsp_2l_2m_e_2b_2}$ der ersten Mikroperiode ($s = 1$) der ersten Makroperiode ($t = 1$) unterscheidet (vgl. Ungleichungen (C.3) und (C.4)).

$$\begin{aligned}
& bCHPE_{tspm_1p_2e_1e_2} \geq \\
& \sum_{(p_1,l_1,m,e_1,b_1) \in PLMEB} SET_{p_1l_1m_e_1b_1}^{INI} + \sum_{(p_2,l_2,m,e_2,b_2) \in PLMEB} bUSE_{tsp_2l_2m_e_2b_2} - 1 \\
& \quad \forall t \in \{T \mid t = 1\}, s \in \{S \mid s = 1\}, \\
& \quad (p_1, m, e_1 \wedge p_2, m, e_2) \in \{PME \mid p_1 \neq p_2 \vee e_1 \neq e_2\} \quad (C.3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& bCHPE_{tspm_1p_2e_1e_2} \leq \\
& \frac{1}{2} \cdot \left(\sum_{(p_1,l_1,m,e_1,b_1) \in PLMEB} SET_{p_1l_1m_e_1b_1}^{INI} + \sum_{(p_2,l_2,m,e_2,b_2) \in PLMEB} bUSE_{tsp_2l_2m_e_2b_2} \right) \\
& \quad \forall t \in \{T \mid t = 1\}, s \in \{S \mid s = 1\}, \\
& \quad (p_1, m, e_1 \wedge p_2, m, e_2) \in \{PME \mid p_1 \neq p_2 \vee e_1 \neq e_2\} \quad (C.4)
\end{aligned}$$

NIP.6 Abbildung der Bedarfe an Leistungen: Die Bedarfe an Zwischenprodukten $iTRA_{l_1l_2p}$ ergeben sich aus dem Leistungsvolumen $iPEPV_{tsp_2l_2m_e_2b_2}$ des Endproduktes multipliziert mit dem Materialbedarfskoeffizienten $mrc_{p_1p_2}$ der Produktstruktur. Er dokumentiert die benötigte Menge eines Zwischenproduktes p_1 zur Herstellung eines Endproduktes p_2 (vgl. Gleichung (C.5)).

$$\begin{aligned}
\sum_{(l_1, l_2, p_1) \in LLP} iTRA_{l_1 l_2 p_1} &\equiv \\
\sum_{s \in S} \sum_{(p_1, p_2) \in BOM} \sum_{(p_2, l_2, m, e, b) \in PLMEB} mrc_{p_1 p_2} \cdot iPEPV_{ts p_2 l_2 m e b} \\
&\forall t \in T, p_1 \in P^{IP}, l_2 \in L^{FP} \quad (C.5)
\end{aligned}$$

Aus der Materialflusserhaltung ergibt sich nach Gleichung (C.6), dass für ein Zwischenprodukt die Summe des Transportvolumens $iTRA_{l_1 l_2 p t}$ von Linie l_1 zu l_2 , des Leistungsvolumens $iPEPV_{ts p l_1 m e b}$, der Änderung des Lagerbestandes von der vorherigen Makroperiode $iINV_{p(t-1)}$ zum aktuellen Lagerbestand $iINV_{p t}$ sowie der Änderung Lieferrückstandes der vorherigen Makroperiode $iBAC_{p(t-1)}$ zum aktuellen Lieferrückstand $iBAC_{p t}$ null ergeben muss. In der ersten Makroperiode ($t = 1$) sind für die Zwischenprodukte die aus den vorherigen Planungsperioden bestehenden initialen Lieferrückstände BAC_p^{INI} und die Bestände INV_p^{INI} zu berücksichtigen (vgl. Gleichung (C.7))

$$\begin{aligned}
iINV_{p t} - iINV_{p(t-1)} - iBAC_{p t} + iBAC_{p(t-1)} \\
- \sum_{s \in S} \sum_{(p, l_1, m, e, b) \in PLMEB} iPEPV_{ts p l_1 m e b} + \sum_{(l_1, l_2, p) \in LLP} iTRA_{l_1 l_2 p t} &\equiv 0 \\
&\forall t \in \{T \mid t > 1\}, p \in P^{IP} \quad (C.6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
iINV_{p t} - iINV_p^{INI} - iBAC_{p t} + BAC_p^{INI} \\
- \sum_{s \in S} \sum_{(p, l_1, m, e, b) \in PLMEB} iPEPV_{ts p l_1 m e b} + \sum_{(l_1, l_2, p) \in LLP} iTRA_{l_1 l_2 p} &\equiv 0 \\
&\forall t \in \{T \mid t = 1\}, p \in P^{IP} \quad (C.7)
\end{aligned}$$

Zur Absicherung der Verfügbarkeit der Zwischenprodukte darf das benötigte Volumen eines Zwischenproduktes $p \in P^{IP}$ die Menge des Lagerbestandes $INV_{p(t-1)}$ der vorherigen Makroperiode ($t - 1$) nicht überschreiten (vgl. Ungleichung (C.8)). In der ersten Makroperiode ($t = 1$) darf nach Ungleichung (C.9) das Volumen $iTRA_{l_1 l_2 p t}$ eines Zwischenproduktes die Differenz des initialen Lagerbestandes INV_p^{INI} und des minimalen Lagerbestandes INV_p^{MIN} nicht überschreiten. Die Ungleichung (C.10) sichert die richtige Abbildung der Transportbeziehungen ab.

$$\sum_{(l_1, l_2, p) \in LLP} iTRA_{l_1 l_2 p t} \leq INV_{p(t-1)} \quad \forall t \in \{T \mid t > 1\}, p \in P^{IP} \quad (C.8)$$

$$\sum_{(l_1, l_2, p) \in LLP} iTRA_{l_1 l_2 p t} \leq (INV_p^{INI} - INV_p^{MIN}) \quad \forall t \in \{T \mid t = 1\}, p \in P^{IP} \quad (C.9)$$

$$iTRA_{l_1 l_2 p t} \leq BigM \cdot befLLP_{l_1 l_2 p} \quad \forall t \in T, (l_1, l_2, p) \in LLP \quad (C.10)$$

Die Ungleichungen (C.11) und (C.12) ermitteln, ob für Zwischenprodukte in einer Makroperiode t Lagerbestand existiert. Entspricht der Lagerbestand $iINV_{pt}$ dem minimalen Lagerbestand INV_{pt}^{MIN} , so nimmt die Entscheidungsvariable $bINV_{pt}$ den Wert null an.

$$bINV_{pt} \cdot BigM \geq (iINV_{pt} - INV_p^{MIN}) \quad \forall t \in T, p \in P^{IP} \quad (C.11)$$

$$bINV_{pt} \leq (iINV_{pt} - INV_p^{MIN}) \quad \forall t \in T, p \in P^{IP} \quad (C.12)$$

NIP.9 Abbildung von Betriebsmodi: Der Wechsel des Betriebsmodus einer Maschine m wird durch die binäre Entscheidungsvariable $bCHB_{tsmb_1 b_2}$ modelliert. Die Ungleichungen (7.39) und (7.40) müssen für die erste Mikroperiode ($s = 1$) abgewandelt werden. Die binäre Entscheidungsvariable $bCHB_{tsmb_1 b_2}$ nimmt den Wert eins an, wenn ein Wechsel des Betriebsmodus ($b_1 \neq b_2$) zwischen der aktiven Leistung-Ressourcen-Kombination der letzten Mikroperiode ($s = s^{max}$) der vorherigen Makroperiode ($t - 1$) und aktiven Leistung-Ressourcen-Kombination der Maschine m der Mikroperiode s der Makroperiode t stattfindet (vgl. Ungleichungen (C.13) und (C.14)).

$$bCHB_{tsmb_1 b_2} \geq \sum_{(p_1, l_1, m, e_1, b_1) \in PLMEB} bUSE_{(t-1)s^{max} p_1 l_1 m e_1 b_1} + \sum_{(p_2, l_2, m, e_2, b_2) \in PLMEB} bUSE_{t s p_2 l_2 m e_2 b_2} - 1$$

$$\forall t \in \{T \mid t > 1\}, s \in \{S \mid s = 1\}, (m, b_1 \wedge m, b_2) \in \{MB \mid b_1 \neq b_2\} \quad (C.13)$$

$$\begin{aligned}
& bCHB_{tsmb_1b_2} \leq \\
& \frac{1}{2} \cdot \left(\sum_{(p_1, l_1, m, e_1, b_1) \in PLMEB} bUSE_{(t-1)s^{max} p_1 l_1 m e_1 b_1} + \sum_{(p_2, l_2, m, e_2, b_2) \in PLMEB} bUSE_{ts p_2 l_2 m e_2 b_2} \right) \\
& \forall t \in \{T \mid t > 1\}, s \in \{S \mid s = 1\}, (m, b_1 \wedge m, b_2) \in \{MB \mid b_1 \neq b_2\} \quad (C.14)
\end{aligned}$$

Außerdem müssen die Ungleichungen (7.39) und (7.40) für die erste Mikroperiode ($s = 1$) der ersten Makroperiode ($t = 1$) angepasst werden. Die binäre Entscheidungsvariable $bCHB_{tsmb_1b_2}$ nimmt den Wert eins an, wenn sich der Betriebsmodus des Ausgangszustandes $SET_{p_1 l_1 m e_1 b_1}^{INI}$ der Maschine m von dem Betriebsmodus der aktiven Leistung-Ressourcen-Kombination $bUSE_{ts p_2 l_2 m e_2 b_2}$ der ersten Mikroperiode ($s = 1$) der ersten Makroperiode ($t = 1$) unterscheidet (vgl. Ungleichungen (C.15) und (C.16)).

$$\begin{aligned}
& bCHB_{tsmb_1b_2} \geq \\
& \sum_{(p_1, l_1, m, e_1, b_1) \in PLMEB} SET_{p_1 l_1 m e_1 b_1}^{INI} + \sum_{(p_2, l_2, m, e_2, b_2) \in PLMEB} bUSE_{ts p_2 l_2 m e_2 b_2} - 1 \\
& \forall t \in \{T \mid t = 1\}, s \in \{S \mid s = 1\}, (m, b_1 \wedge m, b_2) \in \{MB \mid b_1 \neq b_2\} \quad (C.15)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& bCHB_{tsmb_1b_2} \leq \\
& \frac{1}{2} \cdot \left(\sum_{(p_1, l_1, m, e_1, b_1) \in PLMEB} SET_{p_1 l_1 m e_1 b_1}^{INI} + \sum_{(p_2, l_2, m, e_2, b_2) \in PLMEB} bUSE_{ts p_2 l_2 m e_2 b_2} \right) \\
& \forall t \in \{T \mid t = 1\}, s \in \{S \mid s = 1\}, (m, b_1 \wedge m, b_2) \in \{MB \mid b_1 \neq b_2\} \quad (C.16)
\end{aligned}$$

NIP.10 Abbildung der Zustandsänderungen von Ressourcen durch

Leistungen: Die Ungleichung (7.44) muss für die erste Mikroperiode ($s = 1$) der Makroperiode ($t > 1$) angepasst werden. Die Modellierung, dass das Leistungsvolumen $iPEPV_{tsplmeb}$ in der ersten Mikroperiode ($s = 1$) der Makroperiode t den Wert null annimmt (vgl. Gleichung (7.13)), führt dazu, dass nach Ungleichung (C.17) der Startzustand $fCOE_{tspe}^{STA}$ eines Equipments e dem Endzustand $fCOE_{tspe}^{END}$ in der ersten Mikroperiode ($s = 1$) der Makroperiode t gleicht.

$$fCOE_{tspe}^{END} \equiv fCOE_{tspe}^{STA} \quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s = 1\}, (p, e) \in PE^{COE} \quad (C.17)$$

Überschreitet der Zustand eines Equipments e in der letzten Mikroperiode ($s = s^{max}$) der vorherigen Makroperiode ($t - 1$) den Grenzwert COE_{pe}^{MAX} , so ist nach (C.18) in der nachfolgenden Mikroperiode ($s + 1$) der Makroperiode t eine zustandsorientierte Instandhaltungsleistung durchzuführen.

$$fCOE_{(t-1)s^{max}pe}^{END} \leq COE_{pe}^{LIM} + COE_{pe}^{MAX} \cdot \sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB^{COE}} iPEPV_{t(s+1)plmeb} \\ \forall t \in \{T \mid t > 1\}, s \in \{S \mid s = 1\}, (p,e) \in PE^{COE} \quad (C.18)$$

Ebenso muss die Ermittlung der Notwendigkeit der Durchführung von zustandsorientierten Instandhaltungsleistungen nach Ungleichung (7.44) für die erste Mikroperiode ($s = 1$) der ersten Makroperiode ($t = 1$) angepasst werden. Der initiale Zustand eines Equipments e zu Beginn des Planungshorizontes ist durch COE_{pe}^{INI} gegeben. Eine zustandsorientierte Instandhaltungsleistung ist durchzuführen, wenn der initiale Zustand COE_{pe}^{INI} den Grenzwert COE_{pe}^{LIM} überschreitet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Leistungsvolumen $iPEPV_{tsplmeb}$ in der ersten Mikroperiode ($s = 1$) der Makroperiode t den Wert null annimmt (vgl. Gleichung (7.13)). Folglich ist die zustandsorientierte Instandhaltungsleistung nach Ungleichung (C.19) in der nachfolgenden Mikroperiode ($s + 1$) durchzuführen.

$$COE_{pe}^{INI} \leq COE_{pe}^{LIM} + COE_{pe}^{MAX} \cdot \sum_{(p,e) \in PLMEB^{COE}} iPEPV_{t(s+1)plmeb} \\ \forall t \in \{T \mid t = 1\}, s \in \{S \mid s = 1\}, (p,e) \in PE^{COE} \quad (C.19)$$

Der Zustand der Maschine m zu Beginn der Mikroperiode s der Makroperiode t wird durch die reelle Entscheidungsvariable $fCOM_{tspm}^{STA}$ abgebildet. Die Veränderung des Zustandes ist abhängig von der aktiven Leistung-Ressourcen-Befähigung. Der Betrag der Veränderung des Zustandes durch Produktionsleistungen in der Mikroperiode s der Makroperiode t berechnet sich nach der Gleichung (C.20) aus der Multiplikation des Leistungsvolumens $iPEPV_{tsp_1lmeb}$ mit der Abnutzungsrate $wco_{p_1lmeb}^M$. Die Veränderung des Zustandes durch eine vollständige Instandhaltungsleistung ergibt sich aus dem Instandhaltungsvolumen $iPEPV_{tsplmeb}$ und dem Zustandswert COM_{pm}^{LIM} .

$$\begin{aligned}
fCOM_{tspm}^{END} \equiv & fCOM_{tspm}^{STA} + \sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB^P} (iPEPV_{tsp1lmeb} \cdot weo_{p1lmeb}^M) \\
& - \sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB^{COM}} (iPEPV_{tsp1lmeb} \cdot COM_{pm}^{LIM}) \\
& \forall t \in T, s \in \{S \mid s > 1\}, (p,m) \in PM^{COM} \quad (C.20)
\end{aligned}$$

Die Ungleichung (C.20) muss für die erste Mikroperiode ($s = 1$) der Makroperiode ($t > 1$) angepasst werden. Aufgrund der Modellierung, dass das Leistungsvolumen $iPEPV_{tsp1lmeb}$ in der ersten Mikroperiode ($s = 1$) der Makroperiode t null ist (vgl. Gleichung (7.13)), gleicht nach Ungleichung (C.21) der Startzustand $fCOE_{tsp1e}^{STA}$ eines Equipments e dem Endzustand $fCOE_{tsp1e}^{END}$ in der ersten Mikroperiode ($s = 1$) der Makroperiode t .

$$fCOM_{tspm}^{END} \equiv fCOM_{tspm}^{STA} \quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s = 1\}, (p,m) \in PM^{COM} \quad (C.21)$$

Aufgrund der Zustandserhaltung müssen sich die Zustände einer Maschine m am Ende der vorherigen Mikroperiode ($s - 1$) und dem Anfang der Mikroperiode s der Makroperiode t entsprechen. Nach Gleichung (C.22) entspricht der Zustand $fCOM_{tspm}^{STA}$ einer Maschine m zu Beginn der Mikroperiode s dem Zustand $fCOM_{t(s-1)pm}^{END}$ zum Ende der vorherigen Mikroperiode ($s - 1$) der Makroperiode t .

$$fCOM_{tspm}^{STA} = fCOM_{t(s-1)pm}^{END} \quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s > 1\}, (p,m) \in PM^{COM} \quad (C.22)$$

Zur Sicherstellung der Zustandserhaltung der Maschinen m zwischen zwei Makroperioden muss die Gleichung (C.22) für die erste Mikroperiode ($s = 1$) einer Makroperiode t angepasst werden. Der Zustand $fCOM_{tspm}^{STA}$ einer Maschine m der ersten Mikroperiode ($s = 1$) einer Makroperiode t muss gleich dem Zustand $fCOM_{(t-1)spm}^{END}$ der letzten Mikroperiode ($s = s^{max}$) der vorherigen Makroperiode ($t - 1$) sein (vgl. Gleichung (C.23)).

$$fCOM_{tspm}^{STA} = fCOM_{(t-1)smaxpm}^{END} \quad \forall t \in \{T \mid t > 1\}, s \in \{S \mid s = 1\}, (p,m) \in PM^{COM} \quad (C.23)$$

Der Zustand einer Maschine m zum Ende einer Mikroperiode ($s > 1$) ist durch Entscheidungsvariable $fCOM_{t(s-1)pm}^{END}$ gegeben. Die Maschine kann im Leistungserstellungsprozess bis zum Erreichen des maschinenspezifischen Zustandsparameters COM_{pm}^{LIM} eingesetzt werden. Er repräsentiert den Grenzwert, ab dem eine zustandsorientierte Instandhaltungsleistung an der Maschine m durchgeführt werden kann. Der Einsatz der Maschine m ist darüber hinaus bis Erreichen des maximalen Zustandsparameters COM_{pm}^{MAX} möglich. Dieses Prozessfenster bietet Flexibilität zur Fertigstellung von Produktionsleistungen. Ein Einsatz der Maschine m über COM_{pm}^{MAX} hinaus ist nicht möglich. Nach Ungleichung (C.24) ist eine zustandsorientierte Instandhaltungsleistung in der Mikroperiode s der Makroperiode t durchzuführen, wenn der Zustand $fCOM_{t(s-1)pm}^{END}$ der Maschine m in der vorherigen Mikroperiode ($s-1$) der Makroperiode t den COM_{pm}^{LIM} überschreitet.

$$fCOM_{t(s-1)pm}^{END} \leq COM_{pm}^{LIM} + COM_{pm}^{MAX} \cdot \sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB^{COM}} iPEPV_{tsplmeb} \quad \forall t \in T, s \in \{S \mid s > 1\}, (p,m) \in PM^{COM} \quad (C.24)$$

Die Ungleichung (C.24) ist für die erste Mikroperiode ($s = 1$) der ersten Makroperiode ($t = 1$) anzupassen. Die zustandsorientierte Instandhaltungsleistung ist unter Berücksichtigung, dass das Leistungsvolumen $iPEPV_{tsplmeb}$ in der ersten Mikroperiode ($s = 1$) der Makroperiode t den Wert null annimmt (vgl. Gleichung (7.13)), in der nachfolgenden Mikroperiode ($s+1$) durchzuführen (vgl. Ungleichung (C.25)).

$$COM_{pm}^{INI} \leq COM_{pm}^{LIM} + COM_{pm}^{MAX} \cdot \sum_{(p,m) \in PLMEB^{COM}} iPEPV_{t(s+1)plmeb} \quad \forall t \in \{T \mid t = 1\}, s \in \{S \mid s = 1\}, (p,m) \in PM^{COM} \quad (C.25)$$

Wird der Grenzwert des maschinenspezifischen Zustandsparameters COM_{pm}^{LIM} einer Maschine m in der letzten Mikroperiode ($s = s^{max}$) der vorherigen Makroperiode ($t - 1$) überschritten, so muss unter Berücksichtigung, dass das Leistungsvolumen $iPEPV_{tsplmeb}$ in der ersten Mikroperiode ($s = 1$) der Makroperiode t den Wert null annimmt (vgl. Gleichung (7.13)), nach Ungleichung (C.26) eine zustandsorientierte Instandhaltungsleistung in der nachfolgenden Mikroperiode ($s + 1$) durchgeführt werden.

$$fCOM_{(t-1)s^{max}pm}^{END} \leq COM_{pm}^{LIM} + COM_{pm}^{MAX} \cdot \sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB^{COM}} iPEPV_{t(s+1)plmeb}$$

$$\forall t \in \{T \mid t > 1\}, s \in \{S \mid s = 1\}, (p,m) \in PM^{COM} \quad (C.26)$$

Die eindeutige Zuordnung von Instandhaltungsleistungen $iPEPV_{tsplmeb}$ zu einer Mikroperiode s der Makroperiode t wird mit der Ungleichung (C.27) sichergestellt. Eine mehrfache Durchführung einer zustandsorientierten Instandhaltungsleistung an einer Maschine m ist somit in einer Mikroperiode s nicht möglich.

$$iPEPV_{tsplmeb} \leq 1 \quad \forall t \in T, s \in S, (p,l,m,e,b) \in PLMEB^{COM} \quad (C.27)$$

NIP.11 Berücksichtigung der initialen Zustände der Ressourcen: Die reelle Entscheidungsvariable $fCOM_{tspm}^{STA}$ entspricht zu Beginn der ersten Mikroperiode ($s = 1$) der ersten Makroperiode ($t = 1$) dem initialen Zustand COM_{pm}^{INI} der Maschine m (vgl. Gleichung (C.28))

$$fCOM_{tspm}^{STA} = COM_{pm}^{INI} \quad \forall t \in \{T \mid t = 1\}, s \in \{S \mid s = 1\}, (p,m) \in PM^{COM} \quad (C.28)$$

NIP.12 Berücksichtigung der technischen Restriktionen der Ressourcen:

Mit Ungleichung (C.29) wird sichergestellt, dass der Zustand $fCOM_{tspm}^{END}$ der Maschine m den maximalen Betrag des Verschleißes, welcher der Summe der Parameter COM_{pm}^{LIM} und COM_{pm}^{MAX} entspricht, in keiner Mikroperiode s der Makroperiode t überschritten wird.

$$fCOM_{tspm}^{END} \leq COM_{pm}^{LIM} + COM_{pm}^{MAX} \quad \forall t \in T, s \in S, (p, m) \in PM^{COM} \quad (C.29)$$

Flexibilität: Flexibilität kann nur vorliegen, wenn kein Lieferrückstand existiert. Mit Formel (C.30) wird ermittelt, ob im Rahmen der existierenden Leistung-Ressourcen-Befähigungen für die Produkte p der Maschine m Lieferrückstände vorliegen.

$$bFL_{tpm}^{PM} \equiv \frac{1}{b_{max}} \cdot \sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB^p} (bBAC_{pt} \cdot befPEP_{plmeb}) \quad \forall t \in T, p \in P^P, m \in M \quad (C.30)$$

Die Gleichung (C.30) ist für den Beginn des Planungshorizontes anzupassen. Die Bestimmung, ob für die Produkte p der Maschine m der existierenden Leistung-Ressourcen-Befähigungen initiale Lieferrückstände vorliegen, erfolgt in den Formeln (C.31) und (C.32).

$$FL_{mp}^{INIPM} \equiv \frac{1}{b_{max} \cdot BAC_p^{INI}} \cdot \sum_{(p,l,m,e,b) \in PLMEB^p} (BAC_p^{INI} \cdot befPEP_{plmeb}) \quad \forall p \in \{P^P \mid BAC_p^{INI} \neq 0\}, m \in M \quad (C.31)$$

$$FL_{mp}^{INIPM} \equiv 0 \quad \forall p \in \{P^P \mid BAC_p^{INI} = 0\}, m \in M \quad (C.32)$$

Des Weiteren ist zu bestimmen, ob für Zwischenprodukte des Endproduktes Lieferrückstände vorliegen. Dies erfolgt in den Formeln (C.33) und (C.34).

$$bFL_{tp_2}^{IPM} \cdot BigM \geq \sum_{p_1 \in P^{IP}} \sum_{m \in M} (mrc_{p_1 p_2} \cdot bFL_{(t-1)mp_1}^{PM}) \quad \forall t \in \{T \mid t > 1\}, p_2 \in P^{FP} \quad (C.33)$$

$$bFL_{tp_2}^{IPM} \leq \sum_{p_1 \in P^{IP}} \sum_{m \in M} (mrc_{p_1 p_2} \cdot bFL_{(t-1)mp_1}^{PM}) \quad \forall t \in \{T \mid t > 1\}, p_2 \in P^{FP} \quad (C.34)$$

Es ist eine Anpassung der Formeln (C.33) und (C.34) für den Beginn des Planungshorizontes notwendig. Die Ermittlung der Vorlage von initialen Lieferrückständen erfolgt in den Formeln (C.35) und (C.36).

$$bFL_{tp_2}^{IPM} \cdot BigM \geq \sum_{p_1 \in P^{IP}} \sum_{m \in M} (mrc_{p_1 p_2} \cdot FL_{(t-1)mp_1}^{INIPM}) \quad \forall t \in \{T \mid t = 1\}, p_2 \in P^{FP} \quad (C.35)$$

$$bFL_{tp_2}^{IPM} \leq \sum_{p_1 \in P^{IP}} \sum_{m \in M} (mrc_{p_1 p_2} \cdot FL_{(t-1)mp_1}^{INIPM}) \quad \forall t \in \{T \mid t = 1\}, p_2 \in P^{FP} \quad (C.36)$$

Die Formeln (C.37) und (C.38) bestimmen, ob für die Endprodukte p der Maschine m der existierenden Leistung-Ressourcen-Befähigungen Lieferrückstände existieren.

$$bFL_{tm}^{FPM} \cdot BigM \geq \sum_{p \in P^{FP}} bFL_{tmp}^{PM} \quad \forall t \in T, m \in M \quad (C.37)$$

$$bFL_{tm}^{FPM} \leq \sum_{p \in P^{FP}} bFL_{tmp}^{PM} \quad \forall t \in T, m \in M \quad (C.38)$$

Das zusätzlich herstellbare Produktionsvolumen eines Endproduktes fFL_{tplmeb}^{FP} kann nur einen Wert größer null annehmen, wenn keine Lieferrückstände des Endproduktes oder der gemäß der Produktstruktur benötigten Zwischenprodukte vorliegen (vgl. Formeln (C.39) und (C.40))

$$fFL_{tplmeb}^{FP} \leq BigM \cdot (1 - bFL^{FPM}) \quad \forall t \in T, (p, l, m, e, b) \in \{PLMEB^{FP} \mid b = b^{max}\} \quad (C.39)$$

$$fFL_{tplmeb}^{FP} \leq BigM \cdot (1 - bFL^{IPM}) \quad \forall t \in T, (p, l, m, e, b) \in \{PLMEB^{FP} \mid b = b^{max}\} \quad (C.40)$$

D Ergänzung der Darstellung des Simulationsmodells der Pilotanwendung

Das Simulationsmodell des Fallbeispiels (vgl. Kapitel 9) wurde als Prognosemodell innerhalb einer ereignisorientierten Simulationsumgebung implementiert. Es umfasst analog zum Optimierungsmodell im Fallbeispiel (vgl. Abschnitt 9.1) die Segmente der Vorfertigung und der Instandhaltung. In der Vorfertigung wurden die beiden Pressenlinien mit den Breitbandpressen modelliert. Die Instandhaltung führt Instandhaltungsleistungen an den Pressenlinien sowie in der Werkstatt an den Werkzeugen durch. Die gefertigten Endprodukte werden durch die Logistik in das Lager transportiert und dort gelagert. Die Bedarfe an Endprodukten werden durch Lagerabgänge zum Bedarfszeitpunkt abgebildet. Das Simulationsmodell des Produktionssystems des Fallbeispiels ist in Abbildung D.1 dargestellt.

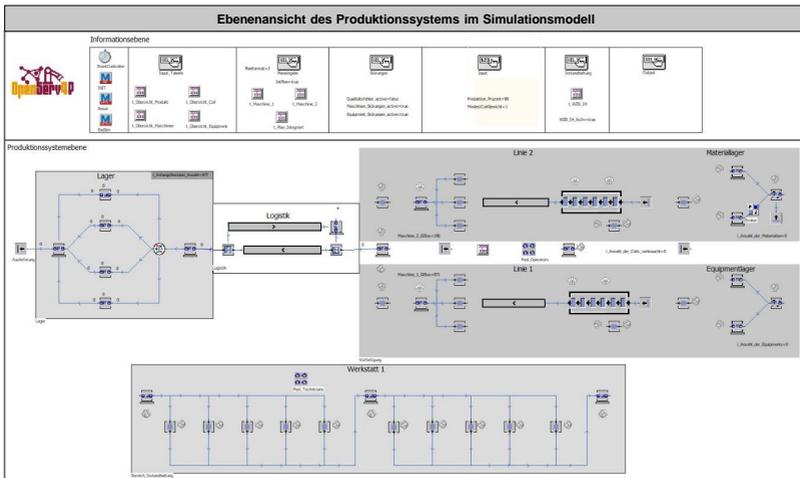


Abbildung D.1: Simulationsmodell des Produktionssystems in der Ebenenansicht

Validierung des Simulationsmodells: Die Validierung des Simulationsmodells erfolgte in enger Abstimmung mit den Experten der Produktions- und Instandhaltungsplanung. Zur Aufnahme der zugrundeliegenden Prozesse des Produktionssystems wurden strukturierte Expertengespräche mit den Entscheidungsträgern der Produktions- und Instandhaltungsplanung, Analysen der Daten in den Informationssystemen sowie Prozessaufnahmen im Produktionssystem durchgeführt. Anschließend wurden die Prozesse im Simulationsmodell modelliert und die Abläufe sowie das Verhalten der einzelnen Systemelemente in Workshops und Expertengesprächen verifiziert. Zur Bestimmung der Güte der Abbildung des realen Produktionssystems im Simulationsmodell wurde ein kennzahlenbasierter Vergleich von Simulation und realem Produktionssystem durchgeführt. Als Betrachtungshorizont dienten fünf Produktionswochen im Zeitraum von Juni bis August 2018 mit jeweils 15 Schichten. Aus den Informationssystemen des Produktionssystems des Fallbeispiels wurde das real gefertigte Produktionsvolumen je Schicht, welches die Summe der in der jeweiligen Schicht produzierten Endprodukte repräsentiert, sowie die durchgeführten Instandhaltungsleistungen und die Schichtpläne ermittelt. Sie wurden den mit der Simulation ermittelten Volumen gegenübergestellt. Daraus konnte die prozentuale Abweichung der Produktionsvolumen für jede Produktionswoche des Betrachtungshorizontes berechnet werden.

Die Ergebnisse des kennzahlenbasierten Vergleichs für beide Pressenlinien sind in Abbildung D.2 dargestellt.

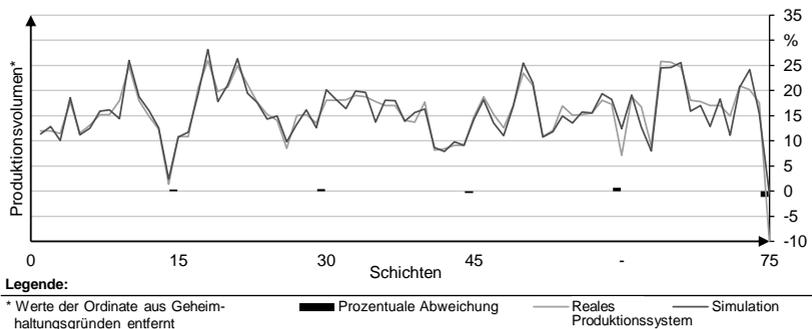


Abbildung D.2: Vergleich der Produktionsvolumen des Simulationsmodells und des realen Produktionssystems für beide Pressenlinien

Der Mittelwert der prozentualen Abweichung des wöchentlichen Produktionsvolumens von Simulation zu realem Produktionssystem beträgt -0,11 %. Die prozentuale Abweichung schwankt zwischen -1,13 % bis 0,66 %. Mögliche Ursachen für die Abweichungen zwischen Simulationsmodell und dem realen Produktionssystem sind in der Realität in kürzerer Zeit als in den Planungsdaten vorgesehenen Zeiten durchgeführte Wechsellvorgänge sowie Abweichungen von geplanten Pausenzeiten. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass das entwickelte Simulationsmodell eine sehr hohe Abbildungsgenauigkeit des realen Produktionssystems aufweist. Das Simulationsmodell wird folglich als validiert betrachtet.

Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen der Erstellung dieser Dissertation am Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) und am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München (TUM) entstanden unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die nachfolgend aufgeführten studentischen Arbeiten. In diesen Arbeiten wurden verschiedene wissenschaftliche Fragestellungen zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung untersucht. Die Ergebnisse sind in Teilen in die vorliegende Arbeit eingeflossen. Der Autor dankt den Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit. Im Folgenden sind die studentischen Arbeiten chronologisch aufgelistet:

- | | |
|------------------|--|
| VERNICKEL, K. M. | Vorausschauende Planung von Instandhaltungs- und Qualitätssicherungsmaßnahmen in Produktionssystemen, Masterarbeit, 2017. Teile der Arbeit sind in den Abschnitt 9.1 eingeflossen. |
| METKEN, J. C. | Ableitung strategischer Erfolgspotenziale für die Instandhaltung in Produktionssystemen, Semesterarbeit, 2018. Teile der Arbeit sind in die Abschnitte 7.1.4 und 8.1.1 eingeflossen. |
| ROSSMANN, J. | Entwicklung eines Kennzahlensystems zur Planung von Instandhaltungsleistungen in Produktionssystemen, Semesterarbeit, 2018. Teile der Arbeit sind in den Abschnitt 8.1.1 eingeflossen. |
| KERN, R. | Methode zur integrierten Planung von Produktionsaufträgen und Instandhaltungsleistungen in Produktionssystemen, Masterarbeit, 2018. Teile der Arbeit sind in die Abschnitte 8.3, 8.5 und 8.6 eingeflossen. |

Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

- ZECH, F. Planung von Produktionsaufträgen und Instandhaltungsleistungen in Produktionssystemen mittels multikriterieller Optimierung, Masterarbeit, 2018. Teile der Arbeit sind in die Abschnitte 4.2.2 und 7.2 eingeflossen.
- GRUSSLER, F. Entwicklung von Datenmodellen und eines Prozessmodells zur Initialisierung für ein System zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung, Masterarbeit, 2019. Teile der Arbeit sind in die Abschnitte 6.1 und 6.2 eingeflossen.
- GARICANO NUEZ, M.T. Multi-criteria optimization for the planning of production orders and maintenance measures, Masterarbeit, 2020. Teile der Arbeit sind in den Abschnitt 7.2 eingeflossen.

