

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

**System zur Produktionsplanung
für rekonfigurierbare Produktionssysteme**

Andreas Fabian Hees

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Die Dissertation wurde am 10.11.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 02.05.2017 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.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) in Augsburg sowie am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl, dem Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) und des Instituts für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken. Zudem möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Corné Schutte für die wissenschaftlichen Freiheiten und die Gastfreundschaft während meines dreimonatigen Forschungsaufenthaltes am Department of Industrial Engineering der University of Stellenbosch herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studierenden, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt und begleitet haben, recht herzlich. Mein besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Philipp Engelhardt, Fabian Keller und Dr.-Ing. Florian Geiger für die fachlichen Diskussion und die kritische Durchsicht meiner Arbeit, die es mir ermöglicht hat, die Arbeit qualitativ abzurunden. Außerdem danke ich Christina Bayerl, Lukas Merkel, Kilian Zellner und Leon Lipp, die mich im Rahmen Ihrer Studienarbeiten bei der Ausarbeitung meiner Dissertation tatkräftig unterstützt haben.

Schließlich möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Freunden und meiner Familie bedanken. Meine Eltern Klara und Fritz haben meinen bisherigen Lebensweg immer wohlwollend unterstützt und maßgeblich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen. Der größte Dank gilt Stephanie, die mich in unterschiedlichen Phasen des Promotionsvorhabens immer wieder motiviert hat, die vorliegende Dissertation erfolgreich abzuschließen. Ihr sei diese Arbeit gewidmet.

München, im Juni 2017

Andreas Fabian Hees

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Verzeichnis der Formelzeichen.....	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Aufbau der Arbeit	6
2 Grundlagen.....	9
2.1 Übersicht	9
2.2 Begriffsdefinitionen	9
2.2.1 Umrüstbarkeit	10
2.2.2 Flexibilität.....	10
2.2.3 Rekonfigurierbarkeit.....	11
2.2.4 Wandlungsfähigkeit.....	12
2.2.5 Abgrenzung der Begriffsdefinitionen.....	14
2.3 Rekonfigurierbare Produktionssysteme	15
2.3.1 Einordnung und Abgrenzung	15
2.3.2 Eigenschaften	19
2.3.3 Umsetzungsbeispiele	21
2.4 Produktionsplanung und -steuerung.....	23
2.4.1 Allgemeines	23

2.4.2	Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung.....	24
2.4.3	Methoden zur Optimierung der Maschinenbelegung.....	27
2.4.4	Daten für die Produktionsplanung und -steuerung	29
2.4.5	Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung.....	30
2.5	Fazit.....	32
3	Stand der Technik und Forschung.....	33
3.1	Übersicht.....	33
3.2	Modellierung von Produktionssystemen und -ressourcen.....	33
3.2.1	Allgemeine Ansätze	33
3.2.2	Rekonfigurationsorientierte Ansätze.....	36
3.3	Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme	38
3.3.1	Allgemeine Ansätze	38
3.3.2	Ansätze zur Generierung und Auswahl von Konfigurationen	40
3.3.3	Ansätze zur Arbeits- und Prozessplanung.....	44
3.3.4	Ansätze zur Kapazitätsplanung und -steuerung	46
3.3.5	Ansätze zur Optimierung der Maschinenbelegung.....	48
3.4	Ableitung des Handlungsbedarfs	51
4	Anforderungen.....	53
4.1	Allgemeines	53
4.2	Adaptionsfähigkeit und Übertragbarkeit	53
4.3	Konfigurationsabhängige Beschreibung von Produktionssystemen	54
4.4	Zuordnung und Auswahl von Konfigurationen.....	54
4.5	Integration der Skalierbarkeit in die Produktionsplanung.....	55

5	Systemübersicht	57
5.1	Überblick.....	57
5.2	Systemelemente.....	58
6	Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme	61
6.1	Übersicht	61
6.2	Modellierung rekonfigurierbarer Produktionssysteme	61
6.2.1	Allgemeines	61
6.2.2	Grundlagen von Petri-Netzen	62
6.2.3	Strukturierung rekonfigurierbarer Produktionssysteme	63
6.2.4	Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme	65
6.2.5	Abbildung und Klassifizierung von Auftragsanforderungen und Ressourcenfähigkeiten	68
6.3	Modellierung von Rekonfigurationsvorgängen	71
6.3.1	Allgemeines	71
6.3.2	Beschreibung von Rekonfigurationen	71
6.3.3	Bewertung von Rekonfigurationsaufwänden	73
6.3.4	Abbildung der Rekonfigurationsaufwände in einer Rekonfigurationsmatrix.....	75
6.4	Beschreibung der Skalierbarkeit für die Produktionsplanung	77
6.4.1	Allgemeines	77
6.4.2	Beschreibung konfigurationsabhängiger Bearbeitungszeiten	77
6.4.3	Beschreibung skalierbarer Produktionskapazitäten.....	80
6.5	Fazit.....	82

7	Methode zur Produktionsplanung	83
7.1	Übersicht.....	83
7.2	Ablauf der Methode zur Produktionsplanung.....	83
7.3	Produktionsbedarfsplanung	85
7.3.1	Allgemeines.....	85
7.3.2	Generierung und Spezifikation des Produktionsprogramms	86
7.3.3	Zuordnung von Konfigurationen durch Technologieabgleich.....	87
7.3.4	Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen.....	89
7.3.5	Abbildung produktspezifischer Auftragsdaten	93
7.3.6	Generierung konfigurationsabhängiger Herstellungsprozesse.....	95
7.4	Ressourcenplanung	97
7.4.1	Allgemeines.....	97
7.4.2	Spezifikation der Ressourcenkonfigurationen	97
7.4.3	Generierung von Konfigurationsalternativen.....	99
7.4.4	Verknüpfung von Produktanforderungen und Konfigurationen.....	101
7.4.5	Rekonfigurationsorientierte Kapazitätsabstimmung.....	102
7.5	Produktionsablaufplanung	106
7.5.1	Allgemeines.....	106
7.5.2	Annahmen	106
7.5.3	Modellformulierung	107
7.5.3.1	Eingangsparameter	108
7.5.3.2	Zielfunktion	109
7.5.3.3	Nebenbedingungen	110
7.5.4	Lösungsverfahren und Entscheidungsvariablen.....	114
7.6	Fazit.....	115

8	Anwendungsbeispiel und Bewertung.....	117
8.1	Allgemeines.....	117
8.2	Anwendungsbeispiel	117
8.2.1	Anwendungsszenario.....	117
8.2.2	Produktionstechnisches System	118
8.3	Anwendung des Systems zur Produktionsplanung	119
8.3.1	Allgemeines	119
8.3.2	Modellierung und Beschreibung des Produktionssystems	120
8.3.3	Durchführung der Produktionsbedarfsplanung	122
8.3.4	Anwendung der Ressourcenplanung	126
8.4	Simulationsbasierte Umsetzung und Validierung.....	128
8.4.1	Allgemeines	128
8.4.2	Beschreibung der Umsetzung.....	129
8.4.3	Planungsmodelle und Produktionsszenarien	130
8.4.4	Planungsergebnisse der Simulationen	133
8.4.4.1	Produktionsplanung für die Ausgangssituation	133
8.4.4.2	Produktionsplanung bei gesteigerter Nachfrage	135
8.4.4.3	Produktionsplanung bei Änderung der Funktionalitäten	136
8.4.4.4	Produktionsplanung bei reduzierter Nachfrage und Änderung der Funktionalität	138
8.4.5	Analyse und Diskussion der Simulationsergebnisse	140
8.5	Bewertung	145
8.5.1	Anforderungsbezogene Bewertung	145
8.5.2	Wirtschaftliche Bewertung.....	147
8.5.2.1	Allgemeines	147

Inhaltsverzeichnis

8.5.2.2	Wirtschaftlichkeitsrechnung am Anwendungsbeispiel	148
8.6	Fazit.....	153
9	Zusammenfassung und Ausblick	155
9.1	Zusammenfassung	155
9.2	Ausblick	157
10	Literaturverzeichnis	159
11	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten.....	181

Abkürzungsverzeichnis

AHP	Analytic Hierarchy Process (Analytischer Hierarchieprozess)
APS	Advanced Planning and Scheduling
AVO	Arbeitsvorgang
BDE	Betriebsdatenerfassung
bzw.	beziehungsweise
CNC	Computerized Numerical Control (Rechnergestützte Numerische Steuerung)
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DLZ	Durchlaufzeit
$DLZ_{RKi,j}$	Durchlaufzeit mit Ressourcenkonfiguration j von Ressource i
DML	Dedicated Manufacturing Line (Dediziertes Produktionssystem)
DSM	Design-Structure-Matrix
engl.	englisch
ERP	Enterprise Resource Planning
et al.	et alii (und andere)
etc.	et cetera (und so weiter)
FMS	Flexible Manufacturing System (Flexibles Produktionssystem)
FIFO	First in - First Out
ggf.	gegebenenfalls
ISO	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
KOZ	Kürzeste Operationszeit

Abkürzungsverzeichnis

LOZ	Längste Operationszeit
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution System
MILP	Mixed Integer Linear Programming (Gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung)
MRP	Material Requirements Planning
OR	Operations Research
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PT	Personentage
REFA	REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.
RMS	Reconfigurable Manufacturing System (Rekonfigurierbares Produktionssystem)
TBE	Bearbeitungsende
$TBE_{RKi,j}$	Bearbeitungsende mit Ressourcenkonfiguration j von Ressource i
TBEV	Bearbeitungsende Vorgänger
TRA	Rüstanfang
u. a.	unter anderem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel
ZDF	Durchführungszeit
$ZDF_{RKi,j}$	Durchführungszeit mit Ressourcenkonfiguration j von Ressource i
ZUE	Übergangszeit

Verzeichnis der Formelzeichen

A_m	mittlere Auslastung
A_w	Produktionsauftrag w
$A_{w.v}$	produktspezifischer Arbeitsvorgang v des Produktionsauftrages w
A_{mj}^{Ri}	Rekonfigurationsaufwand für den Wechsel von Konfiguration m nach j bei Produktionsressource i
A^S	Rekonfigurationsaufwand auf Systemebene
$\alpha_{l \rightarrow k}^S$	konfigurationsspezifischer Skalierungsfaktor
α_t	erfahrungswertbasierter Zeitfaktor
c_{ij}^b	Bearbeitungskostensatz mit Ressourcenkonfiguration j von Produktionsressource i
c^{ges}	Gesamtkosten im betrachteten Planungszeitraum
c_k	Stundensatz mit Systemkonfiguration k
c^{leer}	Kostensatz für die Leerzeiten t_s^{leer}
c_p^L	Lagerkosten von Produkt p je Makroperiode t
c^{Re}	Rekonfigurationskostensatz
c_k^{Stk}	Stückkosten mit Systemkonfiguration k
δ_{k0}	Indikator für den Konfigurationszustand zu Planungsbeginn
δ_{k1}	Indikator für den Konfigurationszustand in der ersten Mikroperiode
δ_{ks}	Indikator für den Konfigurationszustand des Produktionssystems in der Mikroperiode s
$\delta_{k,s-1}$	Indikator für den Konfigurationszustand in der vorherigen Mikroperiode
i	Laufvariable für die Produktionsressourcen
j	Laufvariable für die Konfigurationen von Produktionsressource i

Verzeichnis der Formelzeichen

K	Menge an Systemkonfigurationen
KAP^B	konfigurationsabhängiges Belastungsprofil (Zeit)
KAP^{Be}	Kapazitätsbedarf (Zeit) für die Bedarfsmenge
$KAP_{l/k}$	Kapazitätsangebot (Menge) mit Systemkonfiguration l bzw. k
KAP_{T_s}	maximales Kapazitätsangebot (Zeit) der Makroperiode
KAP^{Re}	Kapazitätsbedarf (Zeit) für die Rekonfigurationsvorgänge
KN_i^R	Ressourcen-Konfigurationsnetz für Produktionsressource i
KN^S	System-Konfigurationsnetz
l, k	Laufvariablen für Systemkonfigurationen
M^{KM}	Konfigurations-Kombinations-Matrix
M^{PK}	Produkt-Konfigurations-Kompatibilitäts-Matrix
M_{Ri}^{Re}	Rekonfigurationsmatrix der Produktionsressource i
M_{Ri}^{TR}	Technologie-Rekonfigurations-Matrix der Produktionsressource i
m^B	Bedarfsmenge
$m_{p,1}^B$	Bedarfsmenge von Produkt p in der ersten Makroperiode
$m_{p,t}^B$	Bedarfsmenge von Produkt p in der Makroperiode t
$n_i^{M,ent}$	Anzahl an entfernten Modulen in der Produktionsressource i
$n_i^{M,ges}$	Gesamtzahl an Modulen in der Produktionsressource i
$n_i^{M,hin}$	Anzahl an hinzugefügten Modulen in der Produktionsressource i
n_p	Anzahl an Produkten
η_{kls}	Indikator für den Rekonfigurationsvorgang von Systemkonfiguration k nach l am Ende der Mikroperiode s
o	Menge der Kanten von Stellen zu Transitionen
P	Menge an Produkten
p	Produkt p

Pro^S	Produktivität des Produktionssystems
q	Menge der Kanten von Transitionen zu Stellen
$q_{p,1,k}$	Losgröße von Produkt p in der ersten Mikroperiode unter Systemkonfiguration k
$q_{p,s,k}$	Losgröße von Produkt p in Mikroperiode s unter Systemkonfiguration k
R_i	Produktionsressource i
RK_i	Menge an Ressourcenkonfigurationen von Produktionsressource i
$RK_{i,j}$	Ressourcenkonfiguration j von Produktionsressource i
r_{mj}^{Ri}	Rekonfigurationsvektor von Ressourcenkonfiguration m nach j für Produktionsressource i
$r_{mj,n}^{Ri}$	n -tes Element des Rekonfigurationsvektors r_{mj}^{Ri}
r_{lk}^S	Rekonfigurationsvektor von Systemkonfiguration l nach k
S	Menge an Mikroperioden
s	Mikroperiode
s_0	Anfangsbelegung eines Petri-Netzes mit Marken
$\bar{S}_{(t)}$	letzte Mikroperiode der Makroperiode t
SK_k	Systemkonfiguration k
σ_{RK}	Gewichtungsfaktor auf Ressourcenebene mit $0,5 > \sigma_{RK} < 1$
T	Menge an Makroperioden
t	Makroperiode
T_{ij}^A	Auftragszeit mit Konfiguration j von Produktionsressource i
t_{ij}^a	Ausführungszeit mit Konfiguration j von Produktionsressource i
t_{AZ}	Amortisationszeit
t_{ij}^b	Bearbeitungszeit mit Konfiguration j von Produktionsressource i

Verzeichnis der Formelzeichen

t_{er}	Erholungszeit
t_g	Grundzeit
t_h	Hauptzeit
$t_{k/l}$	Taktzeit mit Systemkonfiguration k bzw. l
t_n	Nebenzeit
$t_{p,ges}$	Gesamte Produktionszeit
T_R	Menge der Transitionen eines Petri-Netzes
t_r	Rüstzeit
t_{kl}^{Re}	Rekonfigurationszeit von Systemkonfiguration k nach l
T_s	entsprechende Makroperiode der Mikroperiode s
t_s^{leer}	Leerzeit in der Mikroperiode s
$t_{\text{über}}$	Überstunden
t_v	Verteilzeit
τ_s	Endzeitpunkt der Mikroperiode s
τ_{s-1}	Endzeitpunkt der vorherigen Mikroperiode
$\tau_{\bar{s}(t)}$	Endzeitpunkt der letzten Mikroperiode
$TF_{v,n}^{Aw}$	Technologiefaktor n eines Arbeitsvorgangs v des Auftrages w
$TF_{j,n}^{Ri}$	Technologiefaktor n der Konfiguration j der Produktionsressource i
$TV_{w,v}^A$	Technologievektor der Arbeitsvorgänge
TV_j^{Ri}	Technologievektor der Konfiguration j der Produktionsressource i
$\Delta TV_{w,v}^{Ri,j}$	konfigurationsspezifischer Differenzvektor
v	Laufvariable für Arbeitsvorgänge des Produktionsauftrages w
W	Gewichtung der Kante
w	Laufvariable für Produktionsaufträge

y_m	mittlerer Lagerbestand je Makroperiode
y_p^{max}	maximal zulässiger Lagerbestand von Produkt p
$y_{p,0}$	Lagerbestand von Produkt p zu Planungsbeginn
$y_{p,1}$	Lagerbestand von Produkt p in der ersten Makroperiode
$y_{p,t}$	Lagerbestand von Produkt p am Ende der Makroperiode t
$y_{p,t-1}$	Lagerbestand von Produkt p in der vergangenen Makroperiode
Z	Menge der Stellen bzw. Zustände eines Petri-Netzes
Z_{pk}	Indikator für die Kompatibilität zwischen dem Produkt p und der Systemkonfiguration k
\mathbf{Z}_i^R	Zustandsvektor der Produktionsressource i
$\mathbf{Z}_{i,0}^R$	Initialer Zustandsvektor von Produktionsressource i vor einem Rekonfigurationsvorgang
\mathbf{Z}'_i^R	Zustandsvektor von Produktionsressource i nach einem Rekonfigurationsvorgang
\mathbf{Z}^S	Zustandsvektor des Produktionssystems

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Am Wirtschafts- und Exportstandort Deutschland trägt das produzierende Gewerbe einen wesentlichen Teil zur Wirtschaftsleistung bei. Dieser Wirtschaftszweig beschäftigte im Jahr 2014 24,6 % aller Erwerbstätigen (STATISTISCHES BUNDESAMT 2015B) und generierte dabei 25,9 % der Bruttowertschöpfung in der Bundesrepublik Deutschland (STATISTISCHES BUNDESAMT 2015A). Infolgedessen zeichnet sich das produzierende Gewerbe als substanzielles Element der volkswirtschaftlichen Wertschöpfungskette aus (ZÄH ET AL. 2006). Mehr denn je sieht sich der Hochlohnstandort Deutschland mit besonderen Herausforderungen konfrontiert. Das Umfeld produzierender Unternehmen gilt u. a. aufgrund der zunehmenden Nachfrage nach individuellen Produkten (LINDEMANN & BAUMBERGER 2006, JOVANE ET AL. 2009, ABELE & REINHART 2011) sowie verkürzten Produkt- und Technologiezyklen (ABELE ET AL. 2006A) als hochdynamisch (WIENDAHL ET AL. 2007). Als Folge können produzierende Unternehmen nur erfolgreich im Wettbewerb bestehen, wenn sie durch die gezielte Ausrichtung ihres Leistungsangebotes eine Differenzierung gegenüber ihren Wettbewerbern erreichen (PILLER 1997, PILLER & STOTKO 2003, REINHART & ZÄH 2003). Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, bieten Unternehmen immer mehr individualisierte anstelle von standardisierten Produkten an und entwickeln sich in zunehmendem Maße zu Einzel- und Kleinserienproduzenten. Als Folge des Wandels hin zu einer Produktion mit kleinen Losgrößen nehmen die produzierten Stückzahlen ab, wohingegen die Anzahl abzuwickelnder Aufträge sowie der notwendige Koordinationsaufwand zunehmen (MÖRTL 2008).

Mit der steigenden Nachfrage nach individuellen Produkten müssen Unternehmen ihre bestehenden Produktionskonzepte überdenken und diese flexibel gestalten (GÜNTNER ET AL. 2006, ABELE & REINHART 2011). Insbesondere müssen sie auf Änderungen ihrer Produktionsressourcen durch Hinzufügen, Austauschen oder Entfernen von Elementen jenseits normaler Rüstvorgänge, d. h. auf Rekonfigurationen, vorbereitet sein (WIENDAHL 2002). Kurzfristig auf neue Anforderungen reagieren zu können, stellt für produzierende Unternehmen eine große Herausforderung dar (KIRCHNER ET AL. 2003). Produktionssysteme müssen nun proaktiv und schnell an die Anforderungen des Marktes angepasst werden (SPATH & SCHOLTZ 2007, JANORSCHKE & PRITZEL 2009, BRECHER ET AL. 2011, PACHOW-FRAUENHOFER 2012, BAUERNHANSL 2014), wohingegen bisher Ände-

1 Einleitung

rungen an Produktionssystemen lediglich bei einer Erhöhung der Ausbringungsmenge, der Einführung neuer Produkte und Varianten sowie als Maßnahme zur Kostensenkung vorgenommen wurden (BACKHAUS ET AL. 2012).

Für die globale Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen ist die Möglichkeit, sich schnell an veränderliche Rahmenbedingungen anpassen zu können, essentiell (MEHRABI ET AL. 2002). Um nachhaltig erfolgreich zu sein, muss für produzierende Unternehmen die Steigerung der Wandlungsfähigkeit und Flexibilität mit einer Effizienzsteigerung einhergehen (KLEINE ET AL. 2008). Wandlungsfähige Systeme ermöglichen diesen Unternehmen, schnell auf unvorhersehbare Situationen, die über einen inhärenten Flexibilitätskorridor hinausgehen, reagieren zu können (KOREN ET AL. 1999, WIENDAHL ET AL. 2007). In der Produktionstechnik werden diese Systeme als rekonfigurierbare Produktionssysteme bezeichnet (KOREN ET AL. 1999). Um wirtschaftlich produzieren und die Lebenszyklen komplexer Produktionsressourcen verlängern zu können, muss der Anteil an Rekonfigurationen von Produktionsanlagen wachsen, der komplette Austausch hingegen vermieden werden (ABELE & REINHART 2011). Aktuell werden jedoch in Unternehmen aufgrund fehlender Rekonfigurationsmöglichkeiten noch eine Vielzahl von Produktionsanlagen ausgetauscht (KARL ET AL. 2012).

Für eine effiziente Planung und Steuerung der Produktionsabläufe in rekonfigurierbaren Produktionssystemen sind geeignete Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS) erforderlich, die den Anforderungen dieser Systeme entsprechen (ELMARAGHY 2006). Während Produktionsanlagen vermehrt flexibel und wandlungsfähig gestaltet werden, z. B. mittels standardisierter Schnittstellen und modularem Aufbau (vgl. DRABOW 2006), weisen bestehende PPS-Systeme nicht das Maß an Veränderungsfähigkeit auf, das heutzutage für die Planung und Steuerung veränderlicher Produktionsbedingungen und -abläufe notwendig ist. In vielen Fällen werden PPS-Systeme als starr und unflexibel beschrieben (UNGER 1998, WIENDAHL 2009). Insbesondere können die vorhandenen Algorithmen den Anforderungen des Marktes nicht gerecht werden (SCHOLZ-REITER ET AL. 2008). Des Weiteren sind eine unklare Schnittstellendefinition, eine inkonsistente Ziel- und Aufgabenverantwortlichkeit, die fehlerhafte Parametrierung (z. B. mittelwertbasierte Durchlaufzeitplanung) sowie ungenügende Stamm- und Bewegungsdaten als Stolpersteine der PPS zu nennen (WIENDAHL ET AL. 2005, KLETTI & SCHUMACHER 2011). Diese sind in Abbildung 1 dargestellt. Insbesondere die vorhandenen Stammdaten basieren in vielen Fällen auf Vergangenheitsdaten und besitzen nur so lange Gültigkeit, wie die gleichen Bedingungen in der Produktion bestehen (NYHUIS & WIENDAHL 2003). Die Bedeutung der Qualität von Stamm-

und Bewegungsdaten wurde auch im Rahmen einer Studie unter dem Titel *Liefertreue im Maschinen- und Anlagenbau* herausgestellt (SCHUH & WESTKÄMPER 2006). Dabei zeigte sich, dass ungenügende Stamm- und Rückmeldedaten sowie eine inkonsistente Auftragssteuerung wesentliche Einflussgrößen für die Nichteinhaltung von Lieferterminen und somit eine mangelnde Liefertreue darstellen. Darüber hinaus wird in vielen Fällen keine Aktualisierung der Stammdaten an die in der Produktion vorherrschenden Bedingungen vollzogen (GEIGER 2015).

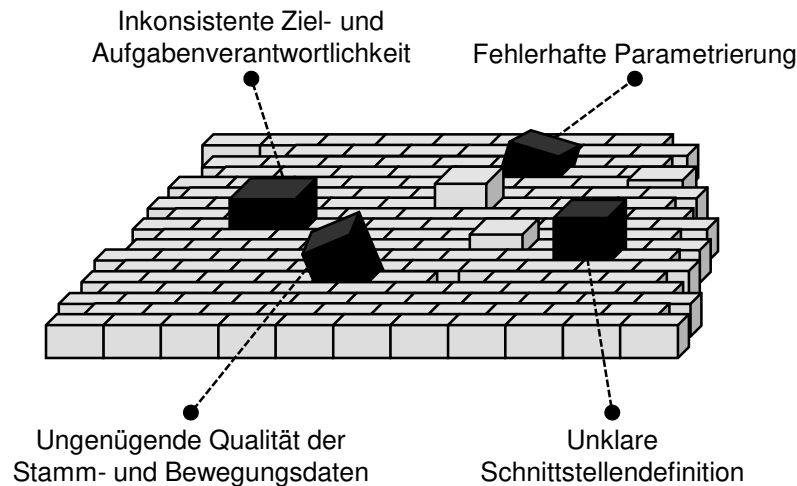


Abbildung 1: Ausgewählte Stolpersteine der PPS

Zusammenfassend besteht für produzierende Unternehmen die Notwendigkeit, die Fertigung und die Montage schnell und einfach hinsichtlich ihrer Struktur und Abläufe anzupassen sowie in der Produktionsplanung eine wesentlich höhere Flexibilität bereitzustellen (SETHI & SETHI 1990, WIENDAHL ET AL. 2007, NYHUIS 2008, NYHUIS ET AL. 2009). Weiterhin sind für die Realisierung von Industrie-4.0¹-Potenzialen angepasste und geeignete Beschreibungen von Ressourcenfähigkeiten sowie neue Planungsmethoden unter Berücksichtigung von Rekonfigurationen notwendig (KAGERMANN ET AL. 2013). Aus heutiger Sicht fehlt es jedoch an der Möglichkeit, sowohl die produktionsseitigen Änderungen, wie z. B. die Integration einer neuen Maschine, schnell in Planungsdaten und -methoden abzubilden und anzupassen als auch die in der Produktion verfügbare Flexibilität planungsseitig bereitzustellen (WIENDAHL 2009). Um diesen Herausforderungen begegnen zu können, bedarf es geeigneter Methoden der Produktionsplanung sowie verlässlicher, qualitativ hochwertiger Planungsdaten.

¹ Unter Industrie 4.0 wird die technische Integration von Cyber-Physischen Systemen unter Anwendung von Applikationen des Internets der Dinge und Dienste verstanden. Als Anwendungsfelder werden insbesondere die Produktion und die Logistik gesehen (KAGERMANN ET AL. 2013).

1.2 Zielsetzung

Die im vorherigen Abschnitt dargelegte Ausgangssituation zeigt den Bedarf nach einer geeigneten Planung von Produktionsabläufen unter Berücksichtigung der notwendigen und vorhandenen Fähigkeiten eines Produktionssystems auf. Für eine effiziente und verlässliche Planung mit rekonfigurierbaren Produktionssystemen muss folglich ein hoher Grad an Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der Produktionsplanung geschaffen werden. Dies kann nur durch die Beschreibung und planungsseitige Integration der charakteristischen Fähigkeiten und Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme in die Produktionsplanung erreicht werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme. Das zu entwickelnde System soll im Speziellen die Produktionsplanung zum Umgang mit Rekonfigurationen befähigen. Dabei sollen aktuelle Konfigurationen sowie notwendige Rekonfigurationen in verschiedenen Planungsschritten berücksichtigt und eingeplant werden. Das dargelegte Gesamtziel der vorliegenden Arbeit soll über die folgenden Teilziele erreicht werden:

- *Modellierung und Beschreibung der Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme:*

Für die Realisierung des zu entwickelnden Systems müssen die Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme abgebildet und für die Anwendung im Rahmen der Produktionsplanung konkretisiert werden. Hierfür sind Modellierungs- und Beschreibungsansätze erforderlich, welche in den verschiedenen Phasen der Produktionsplanung und zur Vorbereitung von Planungsentscheidungen eingesetzt werden können. Eine wesentliche Voraussetzung ist ein allgemeingültiger Modellierungsansatz zur Abbildung der konfigurationsabhängigen Eigenschaften. Des Weiteren soll die Möglichkeit zur Erweiterung der resultierenden Ansätze gegeben sein. Die Fähigkeiten der einzelnen Produktionsressourcen, wie z. B. die Fertigungsverfahren mit den jeweils notwendigen Hilfsmitteln, sollen dabei als Konfigurationen, die die Zusammensetzung einer Produktionsressource aus einzelnen Komponenten mit definierten Eigenschaften darstellen, in die Planungsdaten integriert werden. Weiterhin sollen Konfigurationen und Produktanforderungen anwendungsfallspezifisch zugeordnet und ausgewählt werden können. Darüber hinaus gilt es, den Aufwand für

die einzuplanenden Rekonfigurationsvorgänge mithilfe einer geeigneten Berechnungsmethode zu quantifizieren.

- *Beschreibung der Skalierbarkeit für die Produktionsplanung:*

Die wesentlichen Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme sind die Skalierbarkeit der Kapazität sowie die Anpassung der Funktionalität. Um insbesondere die Skalierbarkeit im Rahmen der Produktionsplanung nutzen zu können, bedarf es geeigneter Beschreibungsansätze. Hierfür sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit entsprechende Ansätze entwickelt werden. Dabei gilt es, die bestehenden Planungsgrundlagen, wie z. B. Bearbeitungs- und Durchlaufzeiten, in Bezug auf die Zielstellung zu untersuchen und ggf. zu erweitern. Des Weiteren muss der Skalierungsvorgang bei einer Rekonfiguration für die Nutzung im Rahmen der Produktionsplanung beschrieben werden. Auf diese Weise wird angestrebt, die Skalierbarkeit der Kapazität von rekonfigurierbaren Produktionssystemen in die Produktionsplanung zu integrieren, z. B. im Rahmen der Kapazitätsabstimmung.

- *Entwicklung einer Methode zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme:*

Zur Nutzung der Eigenschaften rekonfigurierbare Produktionssysteme in den Planungsabläufen soll darauf aufbauend eine Methode zur Produktionsplanung für diese Systeme erarbeitet werden. Diese Methode soll in der Lage sein, die charakteristischen Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme in die Planungsabläufe zu integrieren. Im Fokus der Betrachtungen stehen dabei vor allem die prädiktive Skalierung der notwendigen Produktionskapazitäten sowie die planungsseitige Integration der angepassten Funktionalitäten. Der Anwendungsbereich soll dabei verschiedene Planungsphasen abdecken.

Den inhaltlichen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit bildet die Synthese der vorherigen Teilziele zu einem System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme. In den Betrachtungen ausgeschlossen sind die Methoden der Produktionssteuerung und Koordinationsaufgaben, die das Wertschöpfungsnetzwerk betreffen. Zusammenfassend schließt der Betrachtungsbereich die Modellierung und Beschreibung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen, die Auswahl und Adaption von Konfigurationen sowie die Entwicklung von geeigneten Methoden zur Produktionsplanung ein.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit unterteilt sich in neun inhaltliche Kapitel. Der strukturelle Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. In *Kapitel 1* werden die Ausgangssituation, die Problemstellung und die Zielsetzung der Arbeit dargelegt. Ausgehend hiervon werden in *Kapitel 2* für das Verständnis der Arbeit wichtige Grundlagen erläutert. Hierbei werden insbesondere die grundlegenden Begriffsdefinitionen, die Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme sowie die Prinzipien der PPS in den Fokus der Betrachtungen gestellt.

Kapitel 3 stellt den relevanten Stand der Technik und Forschung dar. Aufbauend auf den Anforderungen und Merkmalen rekonfigurierbarer Produktionssysteme werden bestehende Forschungsansätze analysiert und hinsichtlich einer möglichen Übertragbarkeit detailliert betrachtet sowie bewertet. Im Hinblick auf die Zielstellung der vorliegenden Arbeit werden Ansätze zur Modellierung von Produktionssystemen und -ressourcen sowie Ansätze zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme diskutiert. Den Abschluss des Kapitels bildet die Ableitung des Handlungsbedarfs. Ausgehend vom resultierenden Handlungsbedarf werden in *Kapitel 4* die Anforderungen an ein System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme definiert.

Eine Übersicht über das System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme wird in *Kapitel 5* dargestellt. Insbesondere der modulare Aufbau sowie die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Systemelementen werden dabei fokussiert. Diese Elemente sind die Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme sowie die Methode zur Produktionsplanung.

In den Kapiteln 6 und 7 werden die wesentlichen Elemente des Systems zur Produktionsplanung detailliert. Als essentielle Voraussetzung für die Produktionsplanung werden in *Kapitel 6* die entwickelten Ansätze zur Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme für die Produktionsplanung aufgezeigt. Die wesentliche Aufgabe dieses Systemelements ist die Befähigung und Unterstützung der Methode zur Produktionsplanung für den zielgerichteten Einsatz rekonfigurierbarer Produktionssysteme. Im Fokus der Betrachtungen stehen hier vor allem die Beschreibung der Skalierbarkeit für die Produktionsplanung sowie die Abbildung von Rekonfigurationsvorgängen und -aufwänden. Der strukturelle Aufbau und die Funktionsweise der Methode zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme werden in *Kapitel 7* dargestellt. Im Speziellen werden die Produktionsbedarfsplanung, die Ressourcenpla-

nung sowie die Produktionsablaufplanung aufgezeigt. Darüber hinaus wird auch auf die für die Produktionsplanung notwendigen Informationen und Dokumente eingegangen.

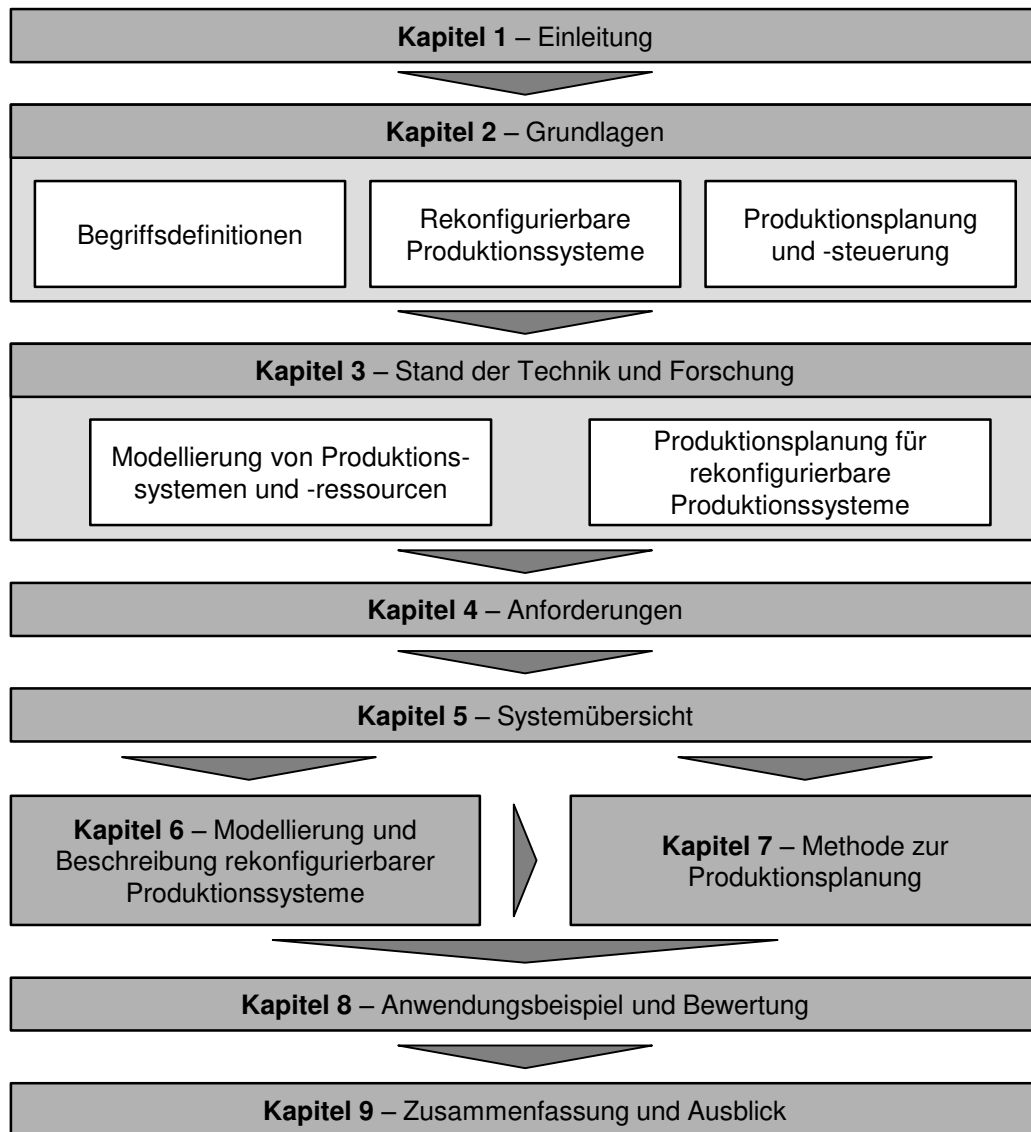


Abbildung 2: Aufbau der vorliegenden Arbeit

Die exemplarische Anwendung und Bewertung des Systems zur Produktionsplanung wird anhand eines realen Anwendungsbeispiels in *Kapitel 8* aufgezeigt. Die Validierung erfolgt mithilfe einer Simulationsumgebung und anhand unterschiedlicher, realitätsnaher Produktionsszenarien. Im Speziellen werden dabei die Integration der Skalierbarkeit sowie die Möglichkeit zur Funktionsanpassung im Rahmen der Produktionsplanung untersucht. Weiterhin beinhaltet dieses Kapitel eine technische und wirtschaftliche Bewertung des Planungssystems. Hierbei werden insbesondere die Ergebnisse der simulationsgestützten Untersuchungen

1 Einleitung

in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit des entwickelten Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme analysiert. Abgeschlossen wird die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in *Kapitel 9*.

2 Grundlagen

2.1 Übersicht

Im vorliegenden Kapitel werden die Grundlagen rekonfigurierbarer Produktionssysteme sowie der PPS dargelegt. Hierfür werden im Abschnitt 2.2 die für die vorliegende Arbeit relevanten Begrifflichkeiten definiert. Im Abschnitt 2.3 wird auf die Grundlagen rekonfigurierbarer Produktionssysteme eingegangen. Dabei werden insbesondere die Eigenschaften in den Vordergrund gestellt. Anschließend ist der Abschnitt 2.4 der PPS gewidmet. Das Kapitel schließt mit einem Fazit in Abschnitt 2.5.

2.2 Begriffsdefinitionen

Im Folgenden werden die für die vorliegende Arbeit relevanten Begrifflichkeiten definiert und dargelegt. Abbildung 3 stellt in Anlehnung an WIENDAHL ET AL. (2007) fünf verschiedene Klassen der Veränderungsfähigkeit von Produktionssystemen in Abhängigkeit von der Produktions- und der Produktebene vor.





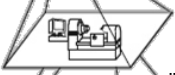
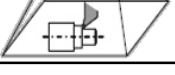
Produktionsebene	Klasse der Veränderungsfähigkeit	Produktebene
 Netzwerk	Agilität	Produktportfolio
 Fabrik	Wandlungsfähigkeit	Produktgruppe
 Segment	Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit	Produkt
 System	Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit	Teilegruppe
 Zelle	Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit	Einzelteil
 Station	Flexibilität, Umrüstbarkeit	Teilelement

Abbildung 3: Klassen der Veränderungsfähigkeit von Produktionssystemen (in Anlehnung an ELMARAGHY & WIENDAHL 2009)

Die Klassen der Veränderungsfähigkeit bauen aufeinander auf und sind Voraussetzung für die darüber liegende Klasse. Die Betrachtungsebenen der vorliegen-

den Arbeit sind die Ebenen System, Zelle und Station. Die Begriffe Umrüstbarkeit, Rekonfigurierbarkeit, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit werden nachfolgend als essentielle Grundlagen beschrieben, definiert und voneinander abgegrenzt.

2.2.1 Umrüstbarkeit

Nach einer Definition der REFA wird das *Rüsten* als die Vorbereitung eines Arbeitssystems für die Erfüllung einer Arbeitsaufgabe aufgefasst (VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION (REFA) 1978). Weiter wird die *Umrüstbarkeit* definiert als die operative Fähigkeit einer Maschine, sich mit minimalem Aufwand an neue Arbeitsaufgaben auf der Ebene der Arbeitsstation anzupassen (WIENDAHL ET AL. 2007). Die damit verbundenen Tätigkeiten werden zumeist von Werkern durchgeführt und umfassen u. a. das Einrichten von Werkzeugen oder die Bestückung mit Rohteilen. Mit Fokus auf den Bereich der Werkzeugmaschinen definiert LORENZER (2011) die Umrüstbarkeit als eine Möglichkeit, mit minimalem Aufwand Anpassungen definierter Arbeitsoperationen innerhalb eines vorgegebenen Rahmens durchzuführen. Hierzu zählen z. B. ein Tausch oder eine Veränderung passiver Komponenten, wie etwa Werkzeuge oder Spannvorrichtungen. Eingriffe in die Steuerungskonfiguration sind dabei nicht notwendig. Die Umstellung ist reaktiv und kann sowohl manuell als auch automatisch erfolgen (WIENDAHL ET AL. 2007). Grundsätzlich lässt sich die Dauer einer Umrüstung als Rüstzeit festlegen. Darunter werden alle Sollzeiten verstanden, die notwendig sind, um ein Arbeitssystem für die Erfüllung einer Arbeitsaufgabe vorzubereiten (WIENDAHL 2010).

2.2.2 Flexibilität

Nach ZÄH ET AL. (2005A) wird die *Flexibilität* als Fähigkeit definiert, ein System ohne großen Aufwand und Leistungseinbußen innerhalb kurzer Zeit zu geringen Kosten an Veränderungen anzupassen. Ein System besitzt dabei eine obere und eine untere Schranke, zwischen denen sich das System reversibel verändern kann. Es kann hier lediglich vordefinierte Zustände annehmen (ZÄH ET AL. 2005B). Sollten jedoch Veränderungen jenseits dieses zuvor festgelegten Korridors notwendig sein, so gelangt das System an seine Grenzen. Ein flexibles System ist nur auf die „*Beherrschung von Veränderungen (...) in vorplanbaren Bereichen ausgerichtet*“ (REINHART 2000). Infolgedessen existiert ein vorab definierter Umfang an Merkmalen, der reversibel anpassbar ist (WESTKÄMPER ET

AL. 2000). Der Umfang der Merkmale, wie z. B. Funktion und Leistung, ist dabei in der Regel überdimensioniert (HALLER 1999). Unter Berücksichtigung der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit werden auf Basis der Forschungsarbeiten von BROWNE ET AL. (1984) die für den Rahmen der Arbeit relevanten Flexibilitätsarten definiert:

- *Betriebsmittelflexibilität*: Fähigkeit einer Produktionsressource, wechselnde Fertigungsaufgaben innerhalb des technologischen Korridors auszuführen.
- *Auftragsflexibilität*: Fähigkeit eines Produktionssystems, ein bestimmtes Produktspektrum ohne Umrüstaufwände herzustellen.
- *Produktflexibilität*: Möglichkeit zur schnellen und kostengünstigen Einführung von neuen Produkttypen.
- *Produktionsmengenflexibilität*: Fähigkeit, ein Produktionssystem bei schwankenden Stückzahlen wirtschaftlich und mit der optimalen Konfiguration zu betreiben.
- *Erweiterungsflexibilität*: Möglichkeit, das System durch Module in den Ausprägungen Kapazität und Fähigkeiten zu erweitern.

Die oben aufgeführten Flexibilitätsarten sowie deren Ausprägung werden im Rahmen der Ausgestaltung des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme berücksichtigt.

2.2.3 Rekonfigurierbarkeit

Unter *Rekonfigurierbarkeit* wird im Allgemeinen die Möglichkeit zur Anpassung einer Produktionsressource an veränderte Bedingungen mittels Austauschen, Hinzufügen oder Eliminieren von Komponenten oder Baugruppen verstanden (KOREN ET AL. 1999, LANDERS ET AL. 2001, ELMARAGHY 2006, WIENDAHL ET AL. 2007). WIENDAHL ET AL. (2007) definieren die Rekonfigurierbarkeit zusätzlich als taktische Fähigkeit eines ganzen Produktionsbereichs zur schnellen und kostengünstigen Reaktion auf Marktschwankungen und Störungen. LORENZER (2011) definiert die Rekonfigurierbarkeit anhand einer Werkzeugmaschine. Hierbei beinhaltet der Begriff die Modularität der Maschine, die schnelle Anpassungsfähigkeit hinsichtlich Struktur, Technologie, Funktionalität und Kapazität. Weiter stellen TOLIO & VALENTE (2006) die Rekonfigurierbarkeit als die Fähigkeit dar, das Verhalten eines Systems durch eine Änderung seiner Konfiguration anzupassen.

Des Weiteren wird eine *Konfiguration* eines Systems oder einer Ressource als das Ergebnis einer Rekonfiguration definiert (LORENZER 2011). Eine *Rekonfiguration* geht über den regulären Betrieb eines Produktionssystems hinaus und wird durch unvorhergesehene Ereignisse, wie z. B. eine Änderung der Produktausprägung oder einen Anstieg der zu produzierenden Stückzahlen, hervorgerufen (KARL 2014) und führt zu einer Anpassung des Leistungspotenzials (RASCH 2000). Die Rekonfiguration ermöglicht somit auch eine mehrmalige Konfiguration eines Produktionssystems bzw. einer Ressource (LORENZER 2011). ELMARAGHY (2006) unterscheidet darüber hinaus zwischen einer harten und weichen Rekonfiguration. Während unter einer harten Rekonfiguration die Änderungen und Modifikationen der Hardware (z. B. Änderung der Spindeln) verstanden werden, fallen Anpassungen an der Software oder organisatorische Aspekte, wie z. B. eine Veränderung der Planungsabläufe oder Zusatzschichten, unter die Kategorie weicher Rekonfigurationen (ELMARAGHY 2006). Die Zeit, die für den Wechsel von einer Konfiguration zu einer anderen notwendig ist, wird von BENSMAINE ET AL. (2013) als Konfigurationswechselzeit bezeichnet.

Zusammenfassend wird in der vorliegenden Arbeit die *Rekonfigurierbarkeit* als die Fähigkeit verstanden, Zustände eines Produktionssystems oder einer Ressource durch eine Änderung seiner Konfiguration anzupassen. Des Weiteren wird unter einer *Rekonfiguration* der Wechsel zwischen in der Produktionsplanung bekannten Konfigurationen, ein sogenannter Konfigurationswechsel, verstanden. Mithilfe von anwendungsfallspezifischen Anpassungsmaßnahmen (z. B. Austausch von Modulen) können zudem die Konfigurationsmöglichkeiten des Systems und der Produktionsressourcen durch neue Konfigurationen erweitert werden, die der Produktionsplanung anschließend zur Verfügung stehen.

2.2.4 Wandlungsfähigkeit

Die *Wandlungsfähigkeit* ist auf der Ebene der Fabrik angesiedelt und umfasst die Flexibilität, die Rekonfigurierbarkeit sowie die Umrüstbarkeit. Weiter ist sie als Möglichkeit zur Anpassung an neue, bisher nicht vorgedachte Situationen zu verstehen (WIENDAHL 2002). In einer Vielzahl an Forschungsansätzen finden sich unterschiedliche Definitionen dieses Begriffs (u. a. REINHART 2000, WESTKÄMPER ET AL. 2000, CISEK ET AL. 2002, WIENDAHL 2002, ZÄH ET AL. 2005A, ZÄH ET AL. 2005B, HEGER 2007, SPATH & SCHOLTZ 2007, SPATH ET AL. 2008, PRINZ ET AL. 2012). In diesem Abschnitt werden ausgewählte Definitionen dargestellt und zur Beschreibung der Eigenschaften der Wandlungsfähigkeit herangezogen.

Ein System kann als wandlungsfähig bezeichnet werden, wenn eine Variabilität in den Dimensionen Prozess, Struktur und Verhalten vorliegt (WESTKÄMPER ET AL. 2000). Der zeitliche Ablauf des Wandlungsprozesses wird durch den Markt vorgegeben und ist mit einer bestimmten Geschwindigkeit durchzuführen (WIENDAHL ET AL. 2002). Ausgehend von internen und externen Turbulenzen bietet die Wandlungsfähigkeit die Möglichkeit, Veränderungen der Struktur aller Ebenen proaktiv mit geringem Aufwand vorzunehmen (WIENDAHL 2002, SPATH & SCHOLTZ 2007). System- und prozessbedingte Anpassungen können dabei reaktiv oder proaktiv vorgenommen werden (HEGER 2007).

Für REINHART (2000) ist die Wandlungsfähigkeit dann notwendig, wenn die Flexibilität nicht mehr ausreichend ist. In diesem Zusammenhang wird die Wandlungsfähigkeit als Summe von Flexibilität und Reaktionsfähigkeit definiert. Sie stellt ein Maß zur Adaption an ein turbulentes Unternehmensumfeld dar. Dieser Zusammenhang geht aus Abbildung 4 hervor.

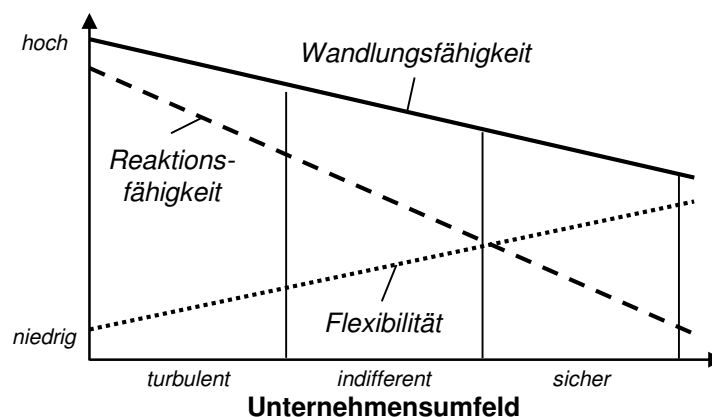


Abbildung 4: Bedarf an Wandlungsfähigkeit in Abhängigkeit vom Unternehmensumfeld (REINHART 2000)

Je nach Unternehmensumfeld ist ein unterschiedliches Maß an Flexibilität, Reaktionsfähigkeit und folglich an Wandlungsfähigkeit erforderlich. Eine geeignete Kombination aus Flexibilität und Reaktionsfähigkeit führt zu einer optimalen Wandlungsfähigkeit (REINHART 2000, CISEK ET AL. 2002). Dabei nimmt die notwendige Wandlungsfähigkeit mit zunehmender Sicherheit des Unternehmensumfeldes ab. Weiter ist die Wandlungsfähigkeit als Möglichkeit zu sehen, die Grenzen eines Korridors in geringer Zeit, zu niedrigen Kosten und ohne Leistungseinbußen auf ein zu Planungsbeginn unbekanntes Niveau zu verschieben (ZÄH ET AL. 2005A, SPATH ET AL. 2008). Die Grenzen können anforderungsgerecht angepasst werden. Weiterhin können verschiedene, auf unterschiedlichen Niveaus liegende Zustände eingenommen werden (ZÄH ET AL. 2005B).

2.2.5 Abgrenzung der Begriffsdefinitionen

Bei den dargelegten Begrifflichkeiten kommt es inhaltlich zu Überschneidungen. Nachfolgend werden die Begriffe Umrüstbarkeit und Rekonfigurierbarkeit sowie Flexibilität und Wandlungsfähigkeit voneinander abgegrenzt.

In Abbildung 5 sind in Abhängigkeit der Eingriffstiefe bei Änderung einer Produktionsressource die Begriffe Umrüstung, Rekonfiguration und Herstellung aufgetragen. Es wird deutlich, dass Überschneidungen bei den Begriffen existieren und keine trennscharfe Abgrenzung möglich ist.

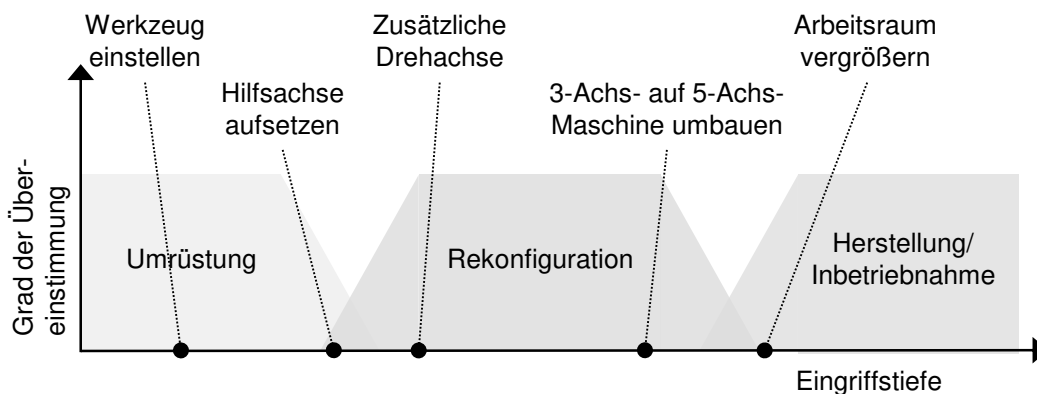


Abbildung 5: *Abgrenzung der Begriffe Umrüstung, Rekonfiguration und Herstellung am Beispiel einer Werkzeugmaschine (in Anlehnung an LORENZER 2011)*

Die Umrüstung ermöglicht, bestimmte Operationen eines bekannten Werkstücks oder einer Baugruppe zu jedem Zeitpunkt mit minimalem Aufwand auszuführen (WIENDAHL ET AL. 2007). Als Beispiel kann hier die Einstellung eines Werkzeugs aufgeführt werden. Eine Rekonfiguration hingegen passt u. a. die Funktionalität, die Struktur, die Kapazität und die Technologie durch Hinzufügen, Ersetzen oder Entfernen von Modulen an (WIENDAHL ET AL. 2007, LORENZER 2011). Ein wesentlicher Unterschied dabei ist, dass im Gegensatz zur Rekonfigurierbarkeit die Umrüstbarkeit einen geringeren Aufwand für die Vorbereitung des Arbeitssystems bedingt (LORENZER 2011). Beispielsweise ist der Umbau einer Werkzeugmaschine von drei auf fünf Achsen als eine Rekonfiguration zu verstehen. Die Herstellung und im Speziellen die Inbetriebnahme einer Werkzeugmaschine gehen über die Aufwände der Umrüstung und Rekonfiguration deutlich hinaus. Als Beispiel ist eine Vergrößerung des Arbeitsraums anzuführen.

Der Hauptunterschied zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit besteht im Allgemeinen darin, dass mit wandlungsfähigen Produktionssystemen auf weitaus mehr, nicht antizipierte Situationen reagiert werden kann als mit starren Produktionssystemen (REINHART 2000, ELMARAGHY & WIENDAHL 2009). Die Umstellung eines wandlungsfähigen Systems erfordert einen längeren Planungsvorlauf, kann aber in kürzerer Zeit und zu geringeren Kosten im Lebenszyklus durchgeführt werden als bei einem starren Produktionssystem (WIENDAHL 2002). Weiterhin sollte die Flexibilität zur Anwendung kommen, wenn Systeme über kurze Reaktions- und Anpassungszeiten verfügen sollen sowie Anpassungen innerhalb des Flexibilitätskorridors häufig auftreten. Das Niveau dieses Korridors kann nicht verändert werden und lässt Änderungen nur innerhalb dieses Bereiches zu (ZÄH ET AL. 2005A). Werden der Flexibilitätskorridor und das damit verbundene, fest eingeplante Flexibilitätspotenzial nicht genutzt, entstehen hohe Kosten (REINHART 2000). Im Gegensatz dazu kann bei einem wandlungsfähigen System der Flexibilitätskorridor auf ein neues, bisher unbekanntes Niveau verschoben werden (ZÄH ET AL. 2005A, SPATH ET AL. 2008). Die Wandlungsfähigkeit wird zudem als strategische Möglichkeit zur schnellen Anpassung an neue Produkte oder Prozesse gesehen.

2.3 Rekonfigurierbare Produktionssysteme

Rekonfigurierbare Produktionssysteme sind vor allem seit KOREN ET AL. (1999) Gegenstand verschiedener Forschungsaktivitäten und haben das Potenzial, sich schnell und einfach an veränderliche Rahmenbedingungen anzupassen. In den folgenden Abschnitten werden diese Systeme eingeordnet und abgegrenzt, ihre Eigenschaften dargelegt sowie erste Umsetzungsbeispiele aufgezeigt.

2.3.1 Einordnung und Abgrenzung

Die Produktionstechnik wurde in der Vergangenheit von *dedizierten Produktionssystemen* (engl. *Dedicated Manufacturing Line (DML)*) und produktspezifischen Bearbeitungseinrichtungen geprägt (WIENDAHL ET AL. 2007). Diese finden sich in hochautomatisierten und stückkostenminimalen Produktionsumgebungen. Dedizierte Fertigungssysteme sind Systeme, die auf ein spezifisches Produkt oder Produktspektrum und eine große Stückzahl ausgelegt sind. Hierbei sind die System- und die Maschinenstruktur fixiert. Damit gehen auch eine feste Kapazität sowie eine mangelnde Reaktionsfähigkeit auf sich verändernde Rahmenbedingungen einher (KOREN ET AL. 1999). Tabelle 1 stellt die Eigenschaften im

2 Grundlagen

Vergleich zu flexiblen und rekonfigurierbaren Produktionssystemen dar. Lediglich unter der optimalen Ausnutzung des vorher festgelegten Betriebspunktes kann eine wirtschaftliche Produktion, z. B. zu geringen Stückkosten, gewährleistet werden (ELMARAGHY 2006). Bei geringerer Nachfrage, die z. B. zu Beginn und Ende eines Produktlebenszyklus vorliegen kann, resultieren somit nicht nutzbare Überkapazitäten.

	Dediziertes Produktionssystem (DML)	Rekonfigurierbares Produktionssystem (RMS)	Flexibles Produktionssystem (FMS)
Systemstruktur	fixiert	anpassbar	anpassbar
Maschinenstruktur	fixiert	anpassbar	fixiert
Skalierbarkeit	nein	ja	ja
Flexibilität	nein	anpassbar	generell
Produktivität	hoch	hoch	niedrig
Kosten	niedrig	mittel	mittel bis hoch

*Tabelle 1: Vergleich der Eigenschaften von DML, RMS und FMS
(in Anlehnung an KOREN 2006)*

Ausgehend von Bedarfsschwankungen und Turbulenzen wurden *flexible Produktionssysteme* (engl. *Flexible Manufacturing Systems (FMS)*) entwickelt. Diese sind bereits zu Beginn der Betriebsphase mit allen Möglichkeiten hinsichtlich Kapazität und Funktionalität ausgestattet und können sich sowohl in ihrer Hardware als auch in ihrer Software nur innerhalb ihres vorgedachten Flexibilitätskorridors anpassen (MEHRABI ET AL. 2002, WIENDAHL ET AL. 2007). Anpassungen, die über den Korridor hinausgehen, erfordern große technische und finanzielle Aufwände. Zusammenfassend sind FMS in ihrer Kapazität und Funktionalität anpassbar, können aber nur konfiguriert und nicht rekonfiguriert werden (WIENDAHL ET AL. 2007). Weiterhin sind die Anpassungen auf die ex-ante vorgedachten Flexibilitätskorridore beschränkt.

Mit dem Ziel, die Vorteile dedizierter Fertigungslinien (z. B. geringe Produktionskosten) und flexibler Produktionssysteme zu kombinieren, wurde das Konzept *rekonfigurierbarer Produktionssysteme* (engl. *Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS)*) entwickelt. Diese lassen sich als dynamische Systeme

beschreiben, die mit unvorhersehbaren Situationen umgehen können (KOREN ET AL. 1999, KOREN 2013, CIRP 2014). Ein wesentlicher Schlüsselfaktor von rekonfigurierbaren Produktionssystemen ist ihre schnelle Anpassungsfähigkeit in Bezug auf ihre Kapazität und Funktionalität (HEISEL & MEITZNER 2002, ABELE ET AL. 2006B, WURST ET AL. 2006, DHUPIA ET AL. 2007), ihre Hard- und Software (ELMARAGHY 2006), ihre Technologie (HEISEL & MEITZNER 2002, KIRCHER ET AL. 2004, WURST ET AL. 2006) sowie ihre Struktur (KOREN ET AL. 1999, ABELE ET AL. 2006, ELMARAGHY 2006). Diese Änderungen können mit minimalem Aufwand hinsichtlich Zeit und Kosten umgesetzt werden (KOREN ET AL. 1999, WIENDAHL ET AL. 2007). Der Aufbau eines rekonfigurierbaren Produktionssystems, wie in Abbildung 6 dargestellt, wird im Speziellen durch die System-, die Maschinengestaltung und die Steuerung beschrieben (KOREN ET AL. 1999). Des Weiteren können diese Systeme unterschiedliche Konfigurationen einnehmen (KOREN ET AL. 1999, WIENDAHL ET AL. 2007, CHALFOUN ET AL. 2013).

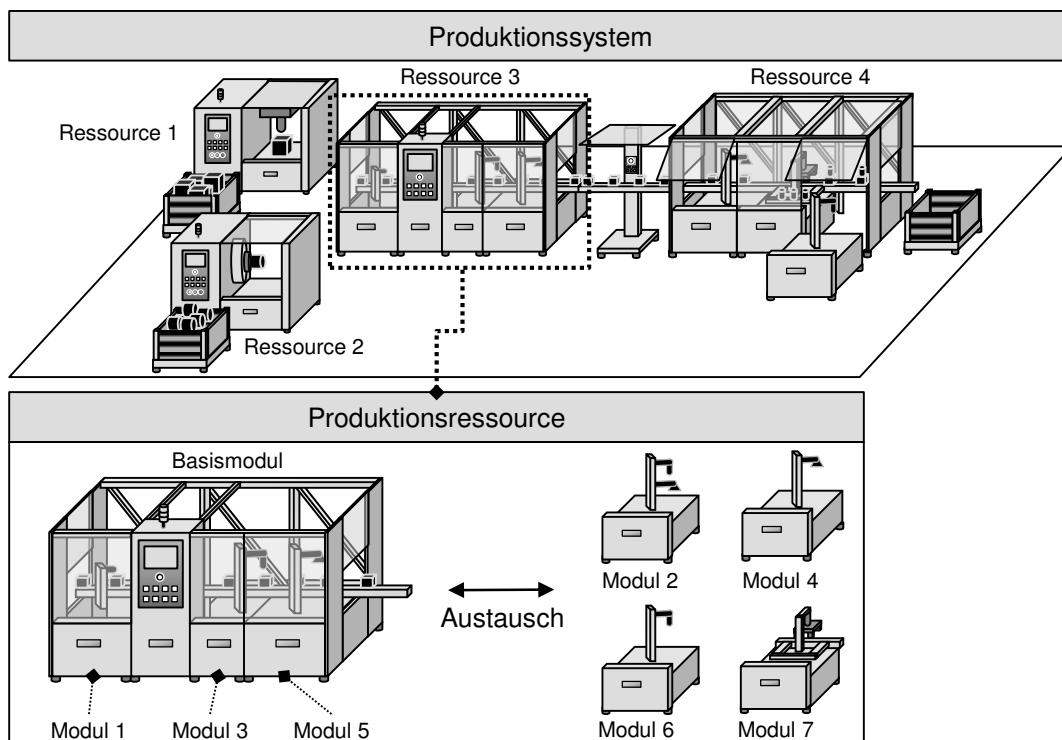


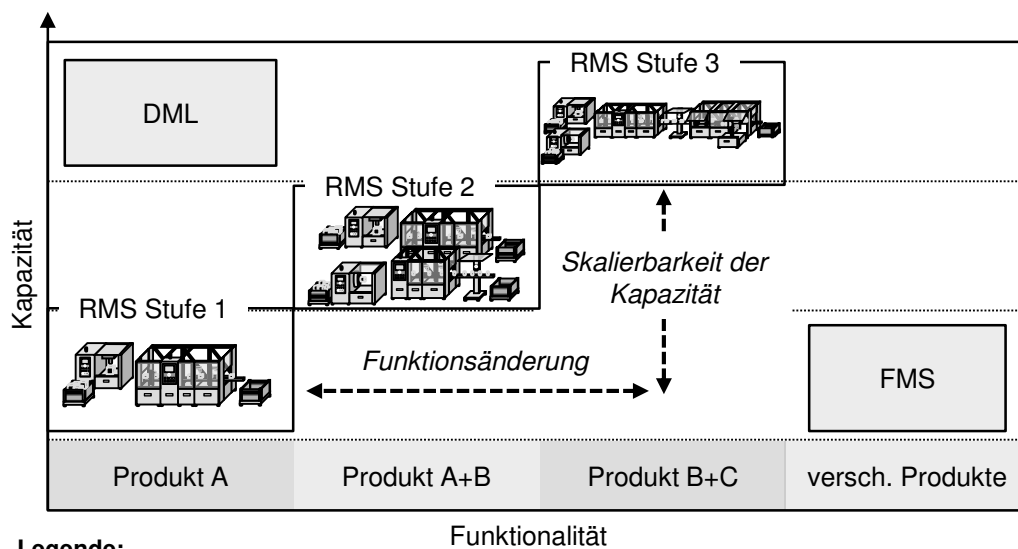
Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung eines rekonfigurierbaren Produktionssystems

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein rekonfigurierbares Produktionssystem auf der System- und Ressourcenebene betrachtet. Auf der Systemebene erfolgt die Zusammensetzung des Produktionssystems durch die Aneinanderreihung unterschiedlicher Produktionsressourcen zu einem Produktionslayout (KOREN ET AL. 1999). Ergänzend hierzu können Produktionsressourcen, die oftmals aus Basis-

2 Grundlagen

und Funktionsmodulen bestehen, durch den Austausch von einzelnen Produktionsmodulen hinsichtlich ihrer Funktionalität und Kapazität rekonfiguriert werden (DASHCHENKO 2006A). Einer Ressource kann zu einem Zeitpunkt nur eine Konfiguration zugeordnet werden, die zur Durchführung eines Produktionsvorgangs geeignet ist (YOUSSEF & ELMARAGHY 2006A, YOUSSEF & ELMARAGHY 2007).

Aufgrund der Eigenschaft, die Funktionalität und Kapazität des rekonfigurierbaren Produktionssystems an die notwendigen Randbedingungen anpassen zu können, kann auf Änderungen der Marktbedingungen schnell und effizient reagiert werden (KOREN ET AL. 1999, WIENDAHL ET AL. 2007). Abbildung 7 stellt die Anpassungsfähigkeit in Bezug auf die Eigenschaften Kapazität und Funktionalität im Vergleich zu dedizierten und flexiblen Fertigungssystemen dar.



Legende:

DML: dediziertes Produktionssystem (engl. Dedicated Manufacturing Line)

FMS: flexibles Produktionssystem (engl. Flexible Manufacturing System)

RMS: rekonfigurierbares Produktionssystem (engl. Reconfigurable Manufacturing System)

Abbildung 7: Einordnung von DML, FMS und RMS hinsichtlich Kapazität und Funktionalität (in Anlehnung an KOREN ET AL. 1999)

Eine Anpassung der Kapazität wird dabei als kontinuierlicher Zustandswechsel klassifiziert, wohingegen die Funktionsänderung als diskreter Zustandswechsel charakterisiert wird. Um den Marktanforderungen Rechnung zu tragen, bieten RMS die notwendige Flexibilität mittels einer inkrementellen Skalierbarkeit ihrer Kapazität und Funktionalität (MEHRABI ET AL. 2002, ELMARAGHY 2006). RMS können an das marktseitig geforderte Produktportfolio angepasst werden, wohingegen FMS verschiedene Produkte mit einer beschränkten Kapazität bereits zu Beginn produzieren können. So ist z. B. zu Produktionsbeginn das Produkt A

fertigbar, wohingegen in der nächsten Ausbaustufe die Produkte B und C produziert werden können. Mittels der sechs Hauptmerkmale Modularität, Skalierbarkeit, Integrationsfähigkeit, Diagnosefähigkeit, Anpassungsfähigkeit und Umrüstbarkeit können rekonfigurierbare Produktionssysteme spezifiziert werden (vgl. Abschnitt 2.3.2). Weiterhin sind diese Systeme vor allem auf Teilefamilien ausgelegt. Darunter werden Teile verstanden, die ähnliche geometrische Eigenschaften und Toleranzanforderungen aufweisen, dieselben Produktionsprozesse erfordern und in einem vergleichbaren Kostenrahmen liegen (KOREN 2006).

2.3.2 Eigenschaften

Für eine erfolgreiche Umsetzung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen müssen nach KOREN ET AL. (1999) die Eigenschaften Modularität, Umrüstbarkeit, Anpassungsfähigkeit, Skalierbarkeit, Diagnosefähigkeit und Integrationsfähigkeit auf die Anlagen, ihre Hardware- und Softwarekomponenten und auch die Peripherie zutreffen (siehe Abbildung 8).

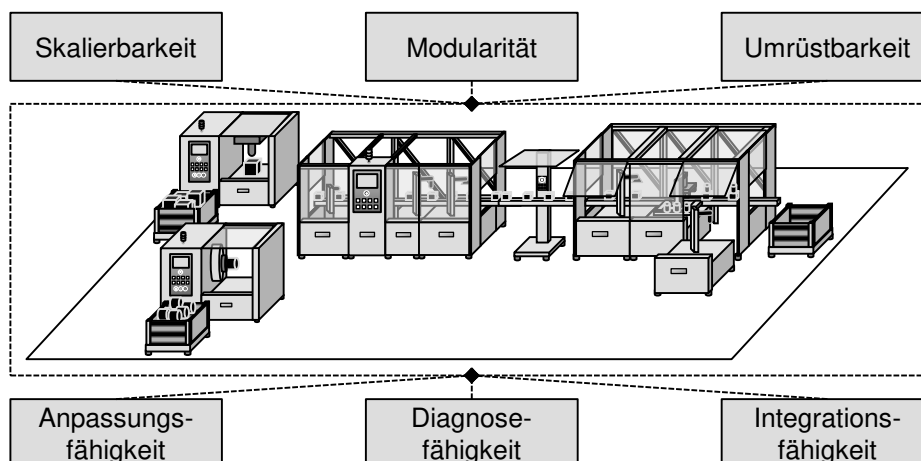


Abbildung 8: Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme

Die *Modularität* adressiert sowohl den hardware- als auch den softwaretechnischen Aufbau des Systems. Die wesentlichen Hardware-Komponenten, wie z. B. eine Bearbeitungsachse, sind modular aufgebaut und können in Abhängigkeit der geforderten Funktionalität und Kapazität ausgetauscht werden (KOREN ET AL. 1999). Seitens der Software können z. B. neue Algorithmen und Steuerungsapplikationen ergänzt oder ausgetauscht werden. Die Modularität ermöglicht weiterhin die schnelle Einführung neuer Technologien (ELMARAGHY 2006).

Für den schnellen und kostengünstigen Wechsel zwischen zwei Teilen innerhalb einer Teilefamilie ist die *Umrüstbarkeit* (vgl. auch Abschnitt 2.2.1) essentiell.

2 Grundlagen

Rekonfigurierbare System müssen so gestaltet sein, dass diese Eigenschaft unterstützt wird. Dies bedingt beispielsweise standardisierte Schnittstellen und eine schnelle Parametrierung der Bearbeitungseinrichtungen. (KOREN ET AL. 1999)

Das wesentliche Unterscheidungskriterium von dedizierten und flexiblen Fertigungssystemen ist die *Anpassungsfähigkeit*. Mit dieser Eigenschaft wird die Auslegung auf die Produktion einer bestimmten Teile- bzw. Produktfamilie ermöglicht. Beispielsweise kann durch Hinzufügen und Entfernen von Maschinen entlang der Produktionskette die Funktionalität hinsichtlich der möglichen Fertigungsverfahren angepasst werden. (KOREN ET AL. 1999)

Um auf Nachfrageschwankungen reagieren zu können, ist die *Skalierbarkeit* des Produktionssystems notwendig. Durch z. B. Hinzufügen zusätzlicher Bearbeitungsmodule oder Ressourcen kann sowohl die Kapazität als auch die Funktionalität eines rekonfigurierbaren Produktionssystems bzw. einer Produktionsressource schnell und kostengünstig angepasst werden. (KOREN ET AL. 1999)

Aufgrund der zunehmenden Wechsel der Konfigurationen des Systems und der Ressourcen ist die *Diagnosefähigkeit* für schnelle Produktionsanläufe essentiell. Mit dieser Eigenschaft sollen die Detektion von Maschinenfehlern und die Diagnose von Qualitätsmängeln unterstützt werden. Das Ziel ist es, die geplanten Stückzahlen mit gleichbleibender Qualität zu produzieren. (KOREN ET AL. 1999)

Die Möglichkeit, neue Module und Komponenten in das bestehende System integrieren zu können, wird unter dem Begriff der *Integrationsfähigkeit* verstanden. Hierfür sind standardisierte Schnittstellen sowie Konfigurations- und Integrationsregeln notwendig. (KOREN ET AL. 1999)

Als Zielgrößen für rekonfigurierbare Produktionssysteme können die Reduzierung der Rekonfigurationszeiten und -aufwände, der Lebenszykluskosten sowie die Steigerung der Produktivität aufgeführt werden (KOREN 2006, KOREN 2013). Wesentlichen Einfluss auf die Rekonfigurationszeit und -aufwände haben neben der Modularität auch die Integrationsfähigkeit, die Umrüstbarkeit sowie die Diagnosefähigkeit. Mit Ausnahme der Modularität tragen alle Eigenschaften zur Reduzierung der Lebenszykluskosten eines rekonfigurierbaren Produktionssystems bei. Zur Steigerung der Produktivität können insbesondere die Anpassungsfähigkeit, die Skalierbarkeit, die Umrüstbarkeit und die Diagnosefähigkeit beitragen (KOREN ET AL. 1999, KOREN 2006).

2.3.3 Umsetzungsbeispiele

Rekonfigurierbare Produktionssysteme schaffen die Grundlage für eine schnelle und einfache Anpassung der Produktion auf der System- und Maschinenebene an sich ändernde Marktbedingungen. Dabei können sowohl einzelne Maschinenmodule als auch komplette Maschinen in einem gegebenen Layout hinzugefügt, entfernt oder angepasst werden (ELMARAGHY 2006). Die Realisierung rekonfigurierbarer Produktionssysteme erfordert die Umsetzung der in Abschnitt 2.3.2 dargestellten Eigenschaften auf den Ebenen der Hardware und Software. *Rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen* (engl. *Reconfigurable Machine Tool (RMT)*) sind ein wesentlicher Bestandteil auf der Hardware-Seite (WIENDAHL ET AL. 2007). Eine solche Maschine ist in Abbildung 9 beispielhaft dargestellt. Diese Art von Werkzeugmaschinen ist insbesondere unter dem Aspekt der Modularität gestaltet und bietet durch standardisierte Schnittstellen die Möglichkeit, neue Bearbeitungsmodule (z. B. Wechsel von 3- auf 5-Achs-Bearbeitung) in kurzen und wirtschaftlichen Rekonfigurationszeiträumen zu integrieren.

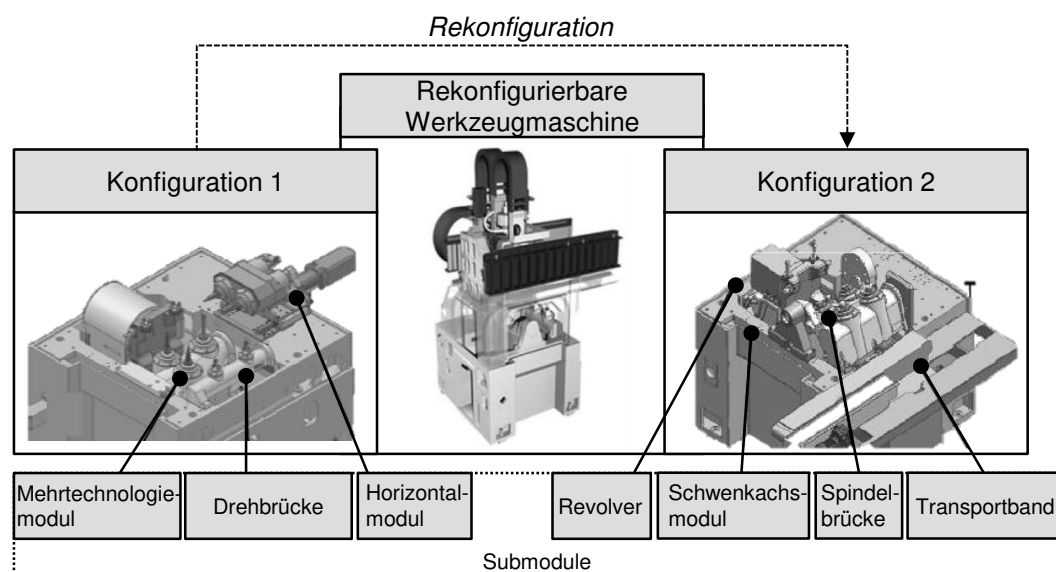


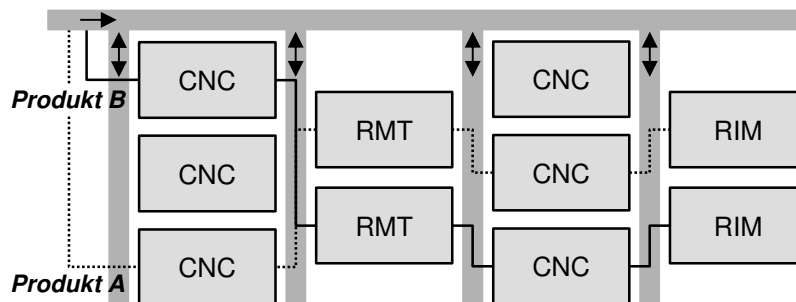
Abbildung 9: Aufbau und Elemente einer rekonfigurierbaren Werkzeugmaschine (in Anlehnung an ABELE & WÖRN 2009)

Prototypen rekonfigurierbarer Werkzeugmaschinen sind u. a. im Forschungsprojekt „METEOR“ (Mehrtechnologie-orientierte rekonfigurierbare Werkzeugmaschine) (ABELE ET AL. 2006B) und von LORENZER (2011) entwickelt worden. Auf Basis einer universellen Plattform können mit unterschiedlichen Modulen und Sub-Modulen verschiedenartige Konfigurationen einer Werkzeugmaschine realisiert werden. Auf Ebene der Software bilden adaptierbare Kontrollstrukturen die

2 Grundlagen

Basis für eine Steuerung rekonfigurierbarer Werkzeugmaschinen und Produktionssysteme. Diese Kontrollsysteme bestehen aus modularen und austauschbaren Softwarekomponenten und ermöglichen folglich eine automatische Adaption der Software an veränderte Maschinenmodule (PRITSCHOW ET AL. 2009). Weitere technische Lösungen und Vorgehensweisen für rekonfigurierbare Bearbeitungssysteme und Produktionsanlagen stellen u. a. HEISEL & MEITZNER (2004), KIRCHER ET AL. (2004) sowie PANTFÖRDER ET AL. (2014) dar.

Als weiteres Beispiel kann das in KOREN (2013) beschriebene rekonfigurierbare Produktionssystem für die Herstellung von Motorenbauteilen angeführt werden. Das System basiert auf modularen CNC-Maschinen sowie rekonfigurierbaren Werkzeugmaschinen und ist in Abbildung 10 schematisch dargestellt. Bei der Entwicklung fanden insbesondere die charakteristischen Eigenschaften Berücksichtigung. Des Weiteren können im System Maschinen und Maschinenmodule entfernt oder hinzugefügt werden. Infolgedessen kann das komplette Produktionssystem skaliert und an die notwendigen Anforderungen angepasst werden.



Legende:

CNC: rechnergestützte numerische Steuerung (engl. Computerized Numerical Control Machine)

RMT: rekonfigurierbare Werkzeugmaschine (engl. Reconfigurable Machine Tool)

RIM: rekonfigurierbare Prüfstation (engl. Reconfigurable Inspection Machine)

*Abbildung 10: Beispiel eines rekonfigurierbaren Produktionssystems
(in Anlehnung an KOREN 2013)*

Beispielhafte industrielle Umsetzungen von rekonfigurierbaren Produktionssystemen wurden insbesondere in Form von modularen Produktionsanlagen für Montage- und Prüfaufgaben umgesetzt (LOTTER 2012). Basis dieser Anlagen sind modulare Plattformen sowie eine umfangreiche Auswahl an möglichen Prozessmodulen (WIENDAHL ET AL. 2007, LOTTER 2012). Produktionsanlagen können somit anforderungsgerecht konfiguriert werden (NYHUIS 2008). Die einzelnen Prozessmodule können hierbei ausgetauscht und kombiniert werden. Als Plattform dienen neutrale Prozessträger. Mittels standardisierter Schnittstel-

len sind eine schnelle Anpassung und damit auch kurze Inbetriebnahmezeiten realisierbar (NYHUIS 2008). Derartige Systeme sind industriell für viele Anwendungsfälle umsetzbar und stellen somit eine ideale Basis für eine Skalierbarkeit der Produktionskapazitäten und eine Anpassung der Funktionalitäten dar.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass einzelne Lösungen für rekonfigurierbare Produktionssysteme und Werkzeugmaschinen zur Verfügung stehen, der flächendeckende Einsatz jedoch noch ausbleibt. Als Grund hierfür können die höheren Investitionskosten genannt werden, die sich erst im Lebenszyklus einer solchen Anlage amortisieren.

2.4 Produktionsplanung und -steuerung

In den folgenden Abschnitten werden die Grundlagen der PPS dargestellt. Die für die Planung und Steuerung notwendigen Schritte sowie die beeinflussbaren, teilweise konkurrierenden Zielgrößen werden dabei in den Fokus der Betrachtungen gerückt. Einen Schwerpunkt bilden des Weiteren die für die Produktionsplanung essentiellen Daten.

2.4.1 Allgemeines

Die PPS gilt als Rückgrat der Informationsverarbeitung in produzierenden Unternehmen (KURBEL 2003) und dient zur Erstellung von Grob- und Feinplänen (KURBEL 2005). Primäre Aufgabe der PPS ist die Planung und Steuerung der Prozesse in der Montage und Fertigung unter Berücksichtigung von Terminen, Kapazitäten und Mengen (EVERSHEIM 2002, SCHUH & STICH 2012).

PPS-Systemen kommt bei der Beherrschung der Produktionsabläufe sowie der Durchsetzung von Planungsvorgaben aus der Arbeitsvorbereitung eine wesentliche Bedeutung zu (WIENDAHL 2010). Insbesondere zur Erreichung der Zielgrößen und Realisierung einer wirtschaftlichen Produktion tragen die einzelnen Teilbereiche und -aufgaben einer PPS wesentlich bei (WIENDAHL 1997). Die Produktionsplanung wird im Rahmen dieser Arbeit in Anlehnung an die Definitionen des VDI (1992, S. 167) als das „(...) *Suchen und Festlegen von Zielen für die Produktion, Vorbereiten von Produktionsaufgaben und Festlegung des Ablaufes zum Erreichen dieser Ziele*“ definiert. Dahingegen dient die Produktionssteuerung dem „*Veranlassen, Überwachen und Sichern der Durchführung von Produktionsaufgaben hinsichtlich Bedarf (Menge und Termin), Qualität und*

2 Grundlagen

Kosten und Arbeitsbedingungen“ (VDI 1992, S. 167). Als Anwendungsbereich der PPS werden zudem alle Fertigungsverfahren der DIN 8580 angesehen.

Bei der Ausführung ihrer Aufgaben verfolgt die PPS die Ziele der Unternehmensplanung mit dem obersten Prinzip der Wirtschaftlichkeit (KURBEL 2005). Als klassische Zielgrößen der PPS gelten eine hohe Termintreue, eine hohe und gleichmäßige Kapazitätsauslastung, kurze Durchlaufzeiten, geringe Bestände sowie eine hohe Flexibilität (HACKSTEIN 1989, SCHUH & STICH 2012). Dabei ist zu beachten, dass es sich um teilweise konkurrierende Zielgrößen handelt, die in seltenen Fällen gleichzeitig erreicht werden können.

2.4.2 Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung

SCHUH & STICH (2012) unterteilen die Aufgaben der PPS in die Bereiche *Produktionsprogrammplanung*, *Produktionsbedarfsplanung*, *Eigenfertigungsplanung und -steuerung* sowie *Fremdfertigungsplanung und -steuerung*. In der Praxis werden derzeit für die Durchführung der Sukzessivplanung, d. h. der schrittweisen Planung der Produktion, unterschiedliche Zeithorizonte verwendet. Diese können von mehreren Monaten, z. B. für die Programmplanung, bis hin zu wenigen Tagen, z. B. für die Reihenfolgeplanung, reichen. Abbildung 11 zeigt die Aufgabensicht der PPS.

In der *Produktionsprogrammplanung* wird für einen bestimmten Planungszeitraum das zu realisierende Produktionsprogramm nach Art, Menge und Termin definiert. Aus der Absatzplanung, die z. B. auf Basis konkreter Kundenaufträge durchgeführt werden kann, ergibt sich der Bruttoprimarybedarf der Endprodukte. Reduziert um den vorhandenen Lagerbestand der jeweiligen Produkte ergibt sich der Nettoprimärbedarf, der als Grundlage für die Ressourcengrobplanung und das Produktionsprogramm dient.

In der folgenden *Produktionsbedarfsplanung* wird das Beschaffungsprogramm für die Realisierung des entstandenen Produktionsprogramms festgelegt. Aus den ermittelten Primärbedarfen werden über eine Stücklistenauflösung der Sekundär- und der Tertiärbedarf an untergeordneten Teilen berechnet und mit den vorhandenen Lagerbeständen abgeglichen. Anschließend erfolgt eine Festlegung der Beschaffungsart (Eigen- oder Fremdbezug). Für diejenigen Komponenten, die im Rahmen der Eigenfertigung realisiert werden, können mithilfe einer Durchlaufterminierung Ecktermine festgelegt werden.

2.4 Produktionsplanung und -steuerung

Netzwerkaufgaben	Kernaufgaben		Querschnittsaufgaben		
Netzwerkkonfiguration	Produktionsprogrammplanung		Auftragsmanagement	Bestandsmanagement	Controlling
Netzwerkabsatzplanung	Produktionsbedarfsplanung				
Netzwerkbedarfsplanung	Fremdbezugsplanung und -steuerung	Eigenfertigungsplanung und -steuerung			
Datenverwaltung					

Abbildung 11: Aufgabensicht der PPS (SCHUH & STICH 2012)

In der *Eigenfertigungsplanung und -steuerung* werden die Fertigungsaufträge detailliert, umgesetzt und überwacht. Die Kernaufgaben sind nach SCHUH & STICH (2012) die Losgrößenrechnung, die Feinterminierung, die Ressourcenfeinplanung, die Reihenfolgeplanung, die Verfügbarkeitsprüfung und die Auftragsfreigabe. Mittels der Losgrößenrechnung werden wirtschaftliche Losgrößen ermittelt. In einem nächsten Schritt erfolgt mit der Feinterminierung die Festlegung von Start- und Endterminen je Arbeitsgang. Die resultierenden Material- und Kapazitätsbedarfe (Personal und Maschinen) werden in der Ressourcenfeinplanung den vorhandenen Angeboten der Produktionsressourcen gegenübergestellt. Im Speziellen werden in der Feinplanung mit einer Kapazitätsplanung die Kapazitätsbedarfe und das zur Verfügung stehende Kapazitätsangebot ermittelt und anschließend synchronisiert. In einem ersten Schritt erfolgt hierbei eine Unterteilung des Planungshorizonts in gleich große Planungsperioden. Eine Kapazitätsabstimmung wird dann notwendig, wenn sich Differenzen zwischen dem Bedarf und dem möglichen Angebot ergeben. Zur Gewährleistung einer gleichmäßigen und hohen Auslastung wird anschließend eine Kapazitätsanpassung, ein Kapazitätsabgleich oder eine Fremdvergabe vorgenommen (vgl. Abbildung 12).

Als Anpassungsmaßnahmen sind jene Maßnahmen zu verstehen, die zur Synchronisation des Kapazitätsangebotes mit der Kapazitätsnachfrage führen sollen (AUST 1990). Grundsätzlich wird zwischen einer zeitlichen, einer intensitätsmäßigen und einer quantitativen Kapazitätsanpassung unterschieden (FANDEL ET AL. 1994, SCHUH ET AL. 2014). Die zeitliche Anpassung bedingt eine Veränderung der Einsatzzeit der Produktionsressourcen (GLASER ET AL. 1991). Als mögliche Maßnahmen können Überstunden und Zusatzschichten genannt werden (SCHUH & STICH 2012). Bei der quantitativen Anpassung werden die Anzahl der Betriebsmittel oder die Mitarbeiteranzahl angepasst (BUFFA 1967, FANDEL ET AL.

2 Grundlagen

1994). Bezüglich der Anpassung der Betriebsmittel können diese verkauft, vermietet, angemietet oder angekauft werden (FANDEL ET AL. 1994). Die intensitätsmäßige Anpassung resultiert in einer Veränderung der Leistungsfähigkeit der Betriebsmittel und Arbeitsplätze und kann somit die Ausbringungsmenge skalieren (FANDEL ET AL. 1994). Als mögliches Beispiel kann einer Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit genannt werden (LÖDDING 2008). Diese Art der Anpassung ist allerdings nur bei Betriebsmitteln möglich, die rekonfiguriert oder angepasst werden können. Zudem können im Rahmen eines Kapazitätsabgleichs einzelne Aufträge verschoben oder zurückgestellt werden. Eine weitere Möglichkeit, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet wird, ist die Fremdvergabe an Unterauftragnehmer.

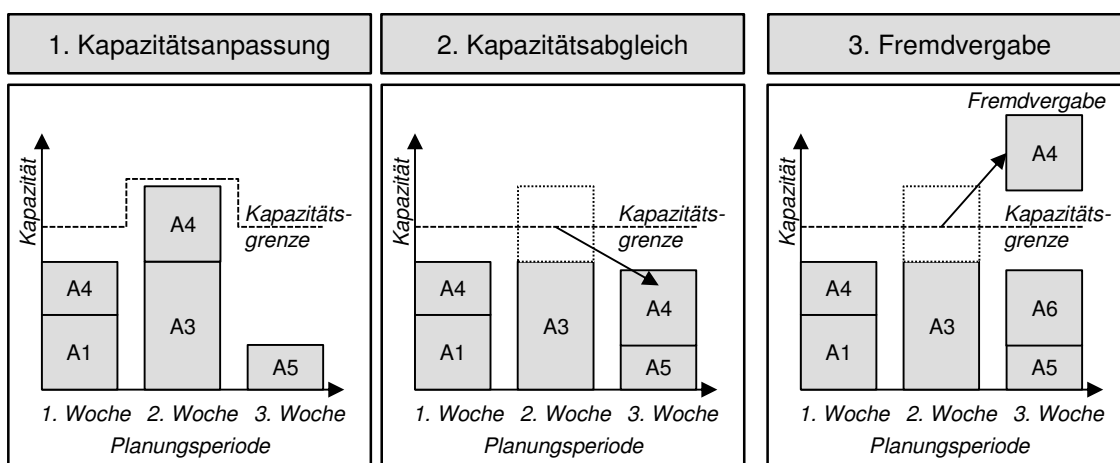


Abbildung 12: Möglichkeiten zur Kapazitätsanpassung im Rahmen der PPS (SCHUH & STICH 2012)

Darauf aufbauend wird für jede Ressource eine geeignete Abarbeitungsreihenfolge durch die Maschinenbelegung bestimmt. Aufgrund der Vielzahl an Zielgrößen und Rahmenbedingungen, die die Maschinenbelegung für die Bestimmung der Reihenfolge erfüllen muss, existieren zur Festlegung einer Reihenfolge optimierende und nicht-optimierende Lösungsverfahren, wie z. B. Prioritätsregeln (SCHULZ ET AL. 1995). Die Lösungsmöglichkeiten unterscheiden sich dabei vor allem hinsichtlich des Aufwandes für die Berechnung einer gültigen Lösung. Bei Anwendung von Prioritätsregeln werden jedem wartenden Auftrag vor der Bearbeitungsstation Prioritätskennziffern zugewiesen. Der Auftrag mit der höchsten Priorität wird im Anschluss als erster bearbeitet. Wesentliche Prioritätsregeln sind u. a.: First in - First Out (FIFO), Kürzeste Operationszeit (KOZ), Längste Operationszeit (LOZ) und geringster Restschlupf (LÖDDING 2008). Prioritätsregeln ermöglichen nur für besonders einfache Maschinenbelegungsproble-

me eine Identifikation einer optimalen Lösung und kommen daher in der Produktionsplanung nur selten zum Einsatz. Eine Übersicht und Einordnung optimierender Verfahren, z. B. für die Maschinenbelegung, wird im nachfolgenden Abschnitt 2.4.3 ausführlich dargestellt. Abschließend erfolgen im Rahmen der Eigenfertigungssteuerung nach der Reihenfolgeplanung und der Verfügbarkeitsprüfung die Auftragsfreigabe und die Überwachung des Auftragsfortschrittes (SCHUH & STICH 2012).

In der *Fremdfertigungsplanung und -steuerung* werden aus den ermittelten Bedarfen in einem ersten Schritt optimale Bestellmengen für die Fremdvergabe berechnet. Im Anschluss werden eine Bewertung der Angebote sowie die Auswahl der Lieferanten durchgeführt. Den Abschluss bildet die Freigabe der Bestellung. (SCHUH & STICH 2012)

2.4.3 Methoden zur Optimierung der Maschinenbelegung

Bestehende Methoden im Bereich der Optimierung der Maschinenbelegung lassen sich vor allem der wissenschaftlichen Disziplin des Operations Research (OR) zuordnen. Die adressierte Zielsetzung des OR ist die möglichst exakte Lösung von Optimierungsproblemen unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen (NEUMANN & MORLOCK 2002, KLEIN & SCHOLL 2004). Hierfür wird ausgehend von einem Realproblem ein mathematisches Problem (Formalproblem) formuliert, welches im Anschluss durch die Anwendung eines Algorithmus gelöst wird (MÜLLER-MERBACH 1992, DOMSCHKE & DREXL 2007).

Die Teilgebiete des Operations Research umfassen nach DOMSCHKE & DREXL (2007) die lineare Programmierung, die Graphentheorie und Netzplantechnik, die ganzzahlige (lineare) und kombinatorische Optimierung (engl. Mixed Integer Linear Programming (MILP)), die dynamische Optimierung, die nichtlineare Optimierung, die Warteschlangentheorie sowie die Simulation. Abbildung 13 stellt diese Teilgebiete dar. Als beispielhaftes analytisches Optimierungsverfahren aus dem Teilgebiet der Warteschlangentheorie sei der Johnson-Algorithmus für die Lösung eines Flow-Shop-Problems mit zwei Maschinen und minimaler Durchlaufzeit genannt (JAEHN & PESCH 2014). Hierbei lässt sich festhalten, dass viele der heutigen Problemstellungen komplex sind und nicht effizient mit analytischen Vorgehensweisen in einer vertretbaren Rechenzeit gelöst werden können (CARAMIA & DELL'OLMO 2006).

2 Grundlagen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit steht die ganzzahlige (lineare) und kombinatorische Optimierung im Fokus, die mithilfe der Formulierung von Nebenbedingungen die Abbildung von produktionstechnischen Rahmenbedingungen ermöglicht. Diese Art der Optimierung eignet sich insbesondere für Zuordnungs-, Reihenfolge-, Gruppierungs- und Auswahlprobleme (DOMSCHKE & DREXL 2007).

Operations Research (OR)			
Simulation	Graphentheorie und Netzplantechnik	Warteschlangentheorie	Dynamische Optimierung
Lineare Programmierung	Ganzzahlige und kombinatorische Optimierung	Nichtlineare Programmierung	

Abbildung 13: Teilgebiete des Operations Research
(in Anlehnung an DOMSCHKE & DREXL 2007)

Die Maschinenbelegungs- oder Reihenfolgeplanung als ein klassisches Realproblem des Operations Research beschäftigt sich mit der Terminierung von Aufträgen auf Maschinen unter Berücksichtigung von verschiedenen Nebenbedingungen und Zielfunktionen (NEUMANN & MORLOCK 2002). Für die Modellierung von Maschinenbelegungsproblemen eignen sich gemischt-ganzzahlige lineare Programmierungsansätze. Diese Optimierungsmodelle beinhalten im Allgemeinen eine oder mehrere lineare Zielfunktionen sowie lineare Nebenbedingungen, die die Anpassung an die spezifischen Rahmenbedingungen des Optimierungsproblems ermöglichen. Die Variablen können reelle Zahlenwerte annehmen, sich auf ganzzahlige Werte oder Binärzahlen beschränken (POCHET & WOLSEY 2006, DOMSCHKE & DREXL 2007). Binäre Variablen sind beispielsweise notwendig, um eine eindeutige Zuordnung von Produktionsaufträgen zu Maschinen vorzunehmen (HILLIER & LIEBERMAN 2010).

Für die Lösung mathematisch formulierter Optimierungsmodelle existieren *exakte und heuristische Verfahren*. *Exakte Lösungsverfahren* garantieren, dass für ein lösbares Entscheidungsproblem die optimale Lösung identifiziert wird. Die Verfahren unterteilen sich in Entscheidungsbaumverfahren (z. B. vollständige Enumeration, Branch-and-Bound-Verfahren), in Schnittebenenverfahren und Kombinationen aus den beiden Verfahrensarten (DOMSCHKE & DREXL 2007). Bei komplexen Problemen, wie z. B. der Maschinenbelegungsplanung, ist eine Lösung des Problems mit exakten Verfahren aufgrund der großen Rechenzeit nicht immer möglich. Hier bieten *Heuristiken* die Möglichkeit, gute Lösungen innerhalb kurzer Rechenzeiten zu identifizieren (NEUMANN & MORLOCK 2002). Diese

Verfahren lassen sich in Eröffnungs- und Iterationsverfahren kategorisieren (ZÄPFEL & BRAUNE 2005). Während ein Eröffnungsverfahren für eine Ausgangslösung geeignet ist, wird ein Iterationsverfahren zur sukzessiven Annäherung der Lösung an ein Optimum herangezogen. Hierbei wird in vielen Fällen, ausgehend von der vorhergehenden Lösung, ein weiteres Optimum gesucht. Heuristische Methoden und Metastrategien, mit deren Hilfe Näherungslösungen ermittelt werden können, sind u. a. Tabu-Search, Simulated Annealing und genetische Algorithmen (PLÜMER 2003, ZÄPFEL & BRAUNE 2005). Jedes der aufgeführten Verfahren wurde in vielfältigen Anwendungsfällen angewandt und für den jeweiligen Einsatzzweck angepasst (ZÄPFEL & BRAUNE 2005). Die Verfahren lassen sich hinsichtlich der Geschwindigkeit zur Lösungsfindung sowie der Genauigkeit der resultierenden Lösungsergebnisse unterscheiden.

Zur Lösung der formulierten Optimierungsmodelle existieren anwendungsfall-spezifische Software-Lösungen. Beispielsweise können einfache Modelle in Tabellenkalkulationsprogrammen (z. B. Microsoft Excel[®]) formuliert und mittels des integrierten Lösungsverfahrens determiniert werden. Für komplexe Optimierungsmodelle hingegen bieten sich Lösungen an, die über Schnittstellen zu existierenden Softwareumgebungen verfügen und eine eigene Programmiersprache zur Verfügung stellen. Hierzu zählen z. B. die FICO[®] Xpress Optimization Suite und das IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.

2.4.4 Daten für die Produktionsplanung und -steuerung

Zur Realisierung der PPS ist eine Vielzahl an Daten notwendig. Die erforderlichen Daten lassen sich in *Stamm-* und in *Bewegungsdaten* unterteilen (SCHUH & STICH 2012).

Für die Produktionsplanung sind zumeist die *Stammdaten* relevant. Diese sind in der Regel über einen längeren Zeitraum gültig und weisen eine geringe Änderungshäufigkeit auf (LOOS 1999, SCHUH & STICH 2012). Weiter lassen sie sich in Materialstammdaten, Ressourcenstammdaten, Stücklisten, Arbeitspläne, Kunden- und Lieferantenstammdaten aufteilen (SCHUH & STICH 2012). Zu den wichtigsten Stammdaten zählt der Materialstamm. Neben Rohstoffen, Zwischen- und Endprodukten finden sich hier u. a. Hilfs- und Betriebsstoffe. Insbesondere die Ressourcenstammdaten werden für die Produktionsplanung herangezogen. Sie umfassen produktionstechnische, kostenrechnerische und fertigungsorganisatorische Informationen (SCHUH & STICH 2012). Als eine produktionstechnische Information kann z. B. das zur Verfügung stehende Kapazitätsangebot genannt

werden. Des Weiteren finden sich in den Stammdaten Stücklisten und Arbeitspläne. Diese geben die Struktur der Erzeugnisse und die Abfolge für die Ausführung der Produktionsprozesse an. Zusätzlich zählen Kunden- und Lieferantendaten zu den Stammdaten. Als wesentliches Problemfeld im Bereich der Stammdaten ist vor allem die Stammdatenpflege zu nennen (UNGER 1998, KLETTI & SCHUMACHER 2011, GEIGER 2015).

Im Gegensatz zu den Stammdaten haben *Bewegungsdaten* nur eine begrenzte Lebensdauer (SCHUH & STICH 2012). Beispiele für Bewegungsdaten sind Betriebs- und Maschinendaten, Lagerbestände sowie Fertigungsaufträge, die nach der Produktion ihre Gültigkeit verlieren (LOOS 1999). Grundsätzlich ermöglichen Bewegungsdaten die Verwaltung von Zuständen (z. B. Maschine ausgefallen) und können zudem einen Zeitbezug (z. B. Auftragsbestand zu einem bestimmten Zeitpunkt) aufweisen.

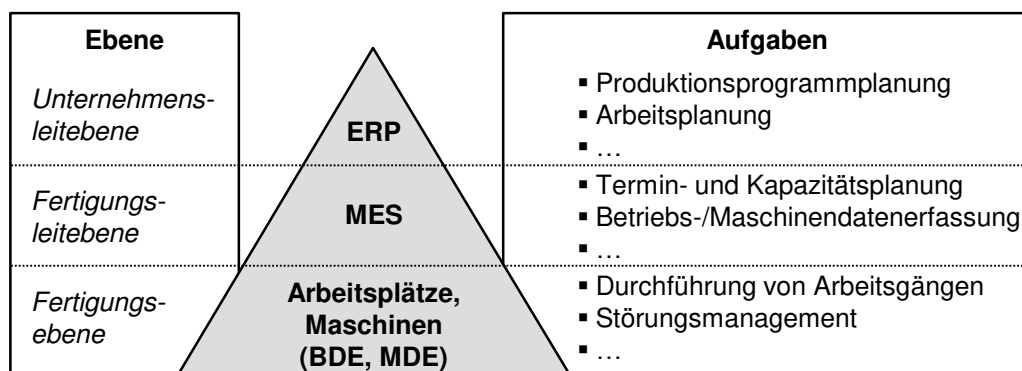
2.4.5 Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung

Zur Bewältigung des Aufgabenbereichs der PPS existiert eine Vielzahl an entsprechenden Softwaresystemen für den Einsatz in Industrieunternehmen. In Abbildung 14 sind die Aufgaben von PPS-Systemen entsprechend den funktionalen Aufgaben und dem Zeithorizont der *Unternehmensleitebene* (engl. *Enterprise Resource Planning (ERP)*), der *Fertigungsleitebene* (engl. *Manufacturing Execution System (MES)*) und der *Fertigungsebene* zugeordnet.

Innerhalb der *Unternehmensleitebene* werden die Art und der Umfang der Aufträge festgelegt, die in einem definierten Zeitraum zu produzieren sind. Weiterhin werden Ressourcen nach kaufmännischen Gesichtspunkten verwaltet, Materialbedarfe abgeleitet und Bestellungen ausgelöst (VDI-RICHTLINIE 5600 Blatt 1). Zusammenfassend decken ERP-Systeme eine große Anzahl an operativen und dispositiven Geschäftsprozessen ab und zeichnen sich durch eine hohe Integration von Prozessen aus (JACOB 2008). Jedoch sind die in ERP-Systemen integrierten Ansätze des Material Requirements Planning (MRP) in vielen Fällen starr und unflexibel. Weiterhin sind die am Markt verfügbaren ERP-Systeme aufgrund ihres groben Planungsrasters nicht für die Planung unter unsicheren Planvorgaben geeignet (KLETTI 2007). Um diesen Problemen entgegenzuwirken, wurden ERP-Systeme um sogenannte Advanced Planning and Scheduling (APS) Werkzeuge ergänzt. Diese Werkzeuge sollen eine Abstimmung zwischen Auftrags- und Fertigungsdaten in Echtzeit ermöglichen (GOULD 1998), benötigen

hierfür aber eine entsprechend hochwertige Datenqualität, die heute aufgrund der ungenügenden Stammdaten nicht vorhanden ist.

Auf der *Fertigungsleitebene* werden für die vorliegenden Aufträge u. a. Bearbeitungszeitpunkte, Zuordnungen zu Ressourcen sowie Reihenfolgen definiert. Des Weiteren werden Ressourcen nach aktuellen Zuständen und Verfügbarkeiten verwaltet sowie Rückmeldedaten (z. B. über BDE-Terminals) erfasst und an die übergeordnete Ebene aggregiert weitergegeben (VDI-RICHTLINIE 5600 Blatt 1). Folglich ermöglichen ME-Systeme die Verknüpfung der Betriebsmittel in der Fertigung mit einem PPS-System (KLETTI 2007) und ergänzen diese um die Aufgaben der Feinplanung sowie der Fertigungssteuerung (VDI-RICHTLINIE 5600 Blatt 1). Der Einsatz eines MES in Kombination mit einem ERP-System ermöglicht die Erhöhung der Transparenz über die aktuelle Situation in der Produktion sowie die Erschließung vieler Potenziale, wie z. B. die Identifikation von Engpässen (BERLAK ET AL. 2004).



Legende:

ERP: Enterprise Resource Planning
MES: Manufacturing Execution System
BDE: Betriebsdatenerfassung
MDE: Maschinendatenerfassung

Abbildung 14: Ebenen und Aufgaben von PPS-Systemen
(KLETTI 2007 und VDI-RICHTLINIE 5600 Blatt 1)

Auf der *Fertigungsebene* werden anschließend die definierten Arbeitsgänge nach den Vorgaben der übergeordneten Ebenen an den Arbeitsplätzen und den Maschinen umgesetzt. Das vorliegende Material wird hierbei zu Zwischen- oder Endprodukten verarbeitet (VDI-RICHTLINIE 5600 Blatt 1).

2.5 Fazit

Ausgehend von der in Kapitel 1 dargelegten Ausgangssituation und Problemstellung erfolgte in diesem Kapitel die Definition der relevanten Begrifflichkeiten. Dabei rücken vor allem die Abgrenzung der Begrifflichkeiten und die wesentlichen Eigenschaften einer Rekonfiguration in den Fokus der Betrachtungen. Weiterhin wurden die wesentlichen Grundlagen rekonfigurierbarer Produktionssysteme aufgezeigt. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wurden insbesondere die Eigenschaften rekonfigurierbarer Systeme sowie deren Potenziale zur Steigerung der Anpassungsfähigkeit produzierender Unternehmen herausgestellt. Des Weiteren wurden einzelne Lösungen für rekonfigurierbare Produktionssysteme und Werkzeugmaschinen identifiziert, die vor allem als Prototypen umgesetzt wurden. Dahingegen steht der flächendeckende industrielle Einsatz jedoch noch aus. Anschließend erfolgte die Darstellung der Aufgaben und Zielgrößen der PPS. Im Speziellen wurden grundlegende Möglichkeiten zur Kapazitätsanpassung und Methoden zur Optimierung der Maschinenbelegung dargestellt. Darüber hinaus wurden die für die Produktionsplanung notwendigen Daten aufgezeigt. Wesentliche Kritikpunkte an den zur Planung verfügbaren Stammdaten sind aus heutiger Sicht insbesondere die mangelnde Qualität und die schlechte Datenpflege. Dies führt in vielen Fällen zu fehlerhaften Planungsergebnissen. Aufbauend auf den grundlegenden Ausführungen erfolgt in Kapitel 3 die Untersuchung des relevanten Standes der Technik und Forschung.

3 Stand der Technik und Forschung

3.1 Übersicht

Auf Basis der Ausgangssituation sowie der dargelegten Grundlagen in Kapitel 2 wird nachfolgend der relevante Stand der Technik und Forschung beschrieben. Die diskutierten Ansätze stammen dabei aus den Bereichen der Modellierung von Produktionssystemen und -ressourcen (vgl. Abschnitt 3.2) und der Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme (vgl. Abschnitt 3.3). Aus den Erkenntnissen sowie der Beurteilung der vorgestellten Konzepte und Ansätze hinsichtlich der Relevanz für die vorliegende Arbeit, wird in Abschnitt 3.4 anschließend der resultierende Handlungsbedarf abgeleitet.

3.2 Modellierung von Produktionssystemen und -ressourcen

Eine Voraussetzung für eine verlässliche PPS und den damit verbundenen Datenverarbeitungsvorgängen ist die Modellierung und Bereitstellung der Fähigkeiten der Produktionsressourcen. Dies bedingt eine detaillierte Beschreibung und Klassifizierung von Produktionsressourcen. Um die notwendigen Daten in den Vorgehensweisen nutzen zu können, werden diese in vielen Fällen in Datenmodellen für die PPS hinterlegt. Im Folgenden werden die relevanten Forschungsansätze für die Modellierung von Produktionssystemen und -ressourcen aufgezeigt. Im Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit werden in diesem Abschnitt allgemeine und rekonfigurationsorientierte Ansätze dargestellt und diskutiert.

3.2.1 Allgemeine Ansätze

Einen grundlegenden Überblick der Einteilung und Gliederung von Betriebsmitteln für die Durchführung von Fertigungs-, Montage-, Transport- und Prüfvorgängen liefert die VDI-RICHTLINIE 2815 Blatt 1 (vgl. Abbildung 15). Die Einteilung der Betriebsmittel wird in die Kategorien Versorgungs- und Entsorgungsanlagen, Fertigungsmittel, Mess- und Prüfmittel, Fördermittel, Lagermittel und Organisationsmittel vorgenommen. Schwerpunktmäßig werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Fertigungsmittel betrachtet.

3 Stand der Technik und Forschung

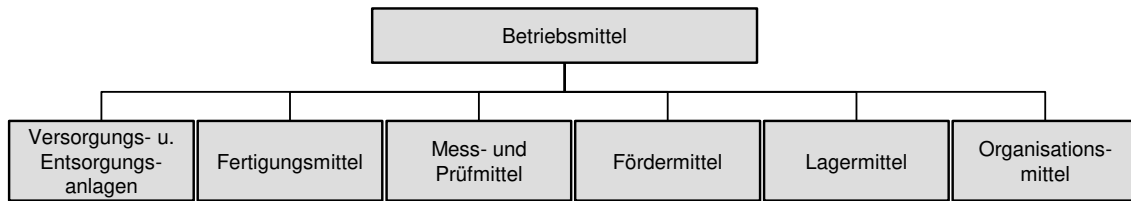


Abbildung 15: Einteilung und Gliederung von Betriebsmitteln
(VDI-RICHTLINIE 2815 Blatt 1)

Für eine integrierte Fertigungs- und Montageplanung hat STEINWASSER (1997) Datenmodelle zur Beschreibung von Produkten, Ressourcen und Prozessen entwickelt. Die Strukturierung wird dabei im Speziellen zur Formulierung eines abstrakten Modells verwendet, das Informationen, Abläufe und Komponenten beinhaltet. Des Weiteren unterteilt sich das Ressourcenmodell in die Kategorien Geometrie, Struktur, Technik, Organisation und Funktion.

In seiner Methode zur systematischen, rechnerunterstützten Auswahl und Generierung von Prozessketten in der Grobplanungsphase der Produktionsplanung unterteilt MORYSON (2004) Produktionsressourcen u. a. in organisatorische Informationen, Betriebsmittelfähigkeiten (z. B. Arbeitsraum), Wirtschaftlichkeit (z. B. Anschaffungskosten, Maschinenstundensatz) und Umgebungseinflüsse (z. B. Geräuscheinflüsse). Die organisatorischen Informationen fassen beispielsweise den Namen oder Informationen zum Hersteller zusammen. Des Weiteren werden prozessspezifische Parameterlisten, die die Merkmale und deren Ausprägungen enthalten, als Erweiterung zum Betriebsmittelmodell dargestellt.

Ein Modell zur Beschreibung von Fertigungsverfahren wird von KNOCHE (2005) vorgestellt. Als Basis dient die Einteilung der Fertigungsverfahren nach der Klassifizierung der Fertigungsverfahren entsprechend der DIN 8580. Mithilfe einer feature-basierten Beschreibung der zu bearbeitenden Werkstücke wird die Auswahl von möglichen Fertigungsverfahren sowie der damit verbundenen Produktionsressourcen ermöglicht.

In der Forschungsarbeit von PRIESE (2007) wird ein Verfahren zur durchgehenden dezentralen Planung in Werkstattstrukturen vorgestellt. Im Speziellen wird im Rahmen des entwickelten Informationsmodells ein Fähigkeitsmodell für die Produktionsplanung dargestellt. Dieses Modell umfasst die Gesamtheit der zur Verfügung stehenden Fähigkeiten in der Produktion und ermöglicht die Generierung ressourcenunabhängiger Arbeitspläne, die anschließend in einer agentenbasierten Planungsvorgehensweise genutzt werden.

Für eine Methodik zur selbstoptimierenden Produktionssteuerung verwendet LAU (2010) eine Beschreibung der Fähigkeiten von Betriebsmitteln für die Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Betriebsmitteln. Die einzelnen Arbeitsvorgänge werden in Anlehnung an die Norm ISO/DIS 10303-214 durch die Elemente „id“, „process-typ“, „name“, „version_id“, „description“ und „operation_time“ beschrieben. Die Detaillierung der Produktionsprozesse und Fähigkeitsprofile der Betriebsmittel erfolgt mithilfe der DIN 8580. Die einzelnen Vorgänge werden anschließend in einen sogenannten Produktgraphen überführt. Zusammenfassend wird durch die Beschreibungsansätze die Grundlage für eine automatische Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Betriebsmitteln geschaffen.

In der Arbeit von KLUGE (2011) wird als Basis für eine Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme ein Fähigkeitsmodell dargelegt. Dieses ermöglicht den Abgleich der Fähigkeiten von Produkten und Montageresourcen anhand definierter Beschreibungskriterien, die u. a. aus gängigen Normen stammen. Als Grundlage für den Abgleich zwischen Anforderung und Fähigkeit werden die Montagereihenfolgen in Fähigkeitsfolgen transformiert.

In Ergänzung zu den bestehenden Ansätzen hat OSTGATHE (2012) zur Beschreibung der Fähigkeiten von Produktionsressourcen ein Ressourcenmodul im Rahmen eines Systems zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage entwickelt. Die Unterteilung des Datenmodells erfolgt in Anlehnung an bestehende Normen und Richtlinien (z. B. DIN 8580). Des Weiteren werden die zur Beschreibung relevanten Informationen in die Kategorien Organisation, Betriebsmittelfähigkeiten, Wirtschaftlichkeit und Umgebungseinflüsse unterteilt. Organisatorische Informationen stellen grundlegende Angaben dar, wie z. B. Name oder Angaben zum Hersteller. Den essentiellen Bestandteil des Ressourcenmoduls bilden die Betriebsmittelfähigkeiten. Als Ausgangsbasis für die Beschreibung dienen die Kategorisierung der Fertigungsverfahren nach der DIN 8580 sowie technische Informationen. Als technische Informationen werden in diesem Zusammenhang technologie- und geometriebezogene Daten, wie z. B. Leistungskennwerte des Betriebsmittels oder bearbeitbare Werkstoffe, verstanden. Unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit werden Angaben zu Anschaffungskosten, Maschinenstundensätzen, Instandhaltungssowie Rüstzeiten zusammengefasst. Darüber hinaus beschreiben die Umgebungseinflüsse diejenigen Eigenschaften, die von der Umgebung abhängig sind (z. B. Energieverbrauch). Die im Rahmen des Ressourcenmoduls beschriebenen Fähigkeiten dienen lediglich Zuordnungszwecken und werden in den Steuerungselementen nicht weiter berücksichtigt.

3 Stand der Technik und Forschung

Für ein System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten stellt GEIGER (2015) ein Datenmodell für die Maschinenbelegungsplanung dar. Ein Bestandteil dieses Modells ist ein Ressourcenmodell, das der Beschreibung von Fähigkeiten von Betriebsmitteln dient. Eine Unterteilung wird in die Klassen organisatorische Daten, Wirtschaftlichkeit, Umgebungseinflüsse und Betriebsmittelfähigkeiten vorgenommen. Die Fähigkeiten orientieren sich an den Fertigungsverfahren der DIN 8580. Ergänzend hierzu werden Zusammenhänge zwischen dem Zustand der Produktion und den Durchlaufzeit-Anteilen im sogenannten ressourcenbezogenen Produktionswissen beschrieben. Wesentlicher Einsatzzweck des Ressourcenmodells ist die Auswahl und Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Maschinen. Des Weiteren wird das Ressourcenmodell in ein Systemmodell integriert.

Im vorliegenden Abschnitt wurde im Speziellen auf Ansätze eingegangen, welche die grundlegende Modellierung von Produktionssystemen und -ressourcen zum Ziel haben. Es hat sich gezeigt, dass Ansätze zur Modellierung existieren, die eine automatische Zuordnung von Betriebsmitteln mithilfe von Fähigkeitsprofilen ermöglichen und allgemeine Strukturierungsansätze für Betriebsmittel bieten. Mithilfe der Beschreibung der Betriebsmittelfähigkeiten (z. B. auf Basis der DIN 8580) und der Darstellung der Wirtschaftlichkeit können beispielsweise Fertigungsaufträge und Produktionsressourcen anhand von definierten Zielkriterien zugeordnet werden. Eine Darstellung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen und -ressourcen ist mit den beschriebenen Ansätzen nur eingeschränkt möglich, da sie oftmals für Spezialfälle, wie z. B. für die Maschinenbelegung, entworfen wurden. Die Ansätze bieten jedoch eine gute Ausgangsbasis für weitere Forschungsarbeiten, müssen aber hinsichtlich der Eigenschaften von rekonfigurierbaren Produktionssystemen angepasst werden. Insbesondere die automatische Zuordnung von Konfigurationen anhand technologischer Kriterien sowie die Bewertung der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Konfigurationen sind im Zuge dessen zu berücksichtigen. Des Weiteren müssen konfigurationsabhängige Eigenschaften, wie z. B. Belegungszeiten, in die Modellierungsansätze integriert werden.

3.2.2 Rekonfigurationsorientierte Ansätze

Vielfältige Ansätze zur Beschreibung und Strukturierung rekonfigurierbarer Produktionssysteme finden sich im Bereich der Bewertung der Wandlungs- und Rekonfigurationsfähigkeit von Produktionssystemen oder -ressourcen (u. a. DOHMS 2001, HERNÁNDEZ 2003, CISEK 2005, DRABOW 2006, HEGER 2007,

MÖLLER 2008). Diese Ansätze eignen sich allerdings nur bedingt für die Beschreibung der speziellen Eigenschaften für den Anwendungsbereich der Produktionsplanung. Grundsätzlich werden für die Modellierung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen und Rekonfigurationsprozessen Methoden der Graphentheorie, wie z. B. Petri-Netze, oder mathematische Modelle verwendet (u. a. REN ET AL. 2007, DOU ET AL. 2009, ZHANG & RODRIGUES 2009, CHALFOUN ET AL. 2013). Nachfolgend werden exemplarische Ansätze für die Modellierung rekonfigurierbarer Produktionssysteme vorgestellt, die im Kontext der vorliegenden Arbeit von Relevanz sind.

Im Speziellen haben YOUSSEF & ELMARAGHY (2007) ein Verfahren zur Auswahl einer optimalen Konfiguration entwickelt. Als Eingangsgröße dient u. a. die Beschreibung der Produktionsressourcen mit den zur Verfügung stehenden Konfigurationen. Die Beschreibung der Produktionsressourcen unterteilt sich beispielsweise in die Anzahl an Konfigurationen pro Ressource, den Wert der Konfigurationen, die zugehörige Abschreibungsrate, die durchschnittliche Verfügbarkeit sowie die Anzahl der austauschbaren Module. Der Ansatz beinhaltet relevante Daten zur Darstellung von Konfigurationen, geht aber nicht auf technologische Eigenschaften, wie z. B. die verfügbaren Fertigungsverfahren, ein.

In Ergänzung zu den bestehenden Ansätzen verwenden BENSMAINE ET AL. (2014) in ihrem Auswahlalgorithmus konfigurationsabhängige Bearbeitungszeiten. Die Konfigurations- und Werkzeugwechselzeiten resultieren dabei aus einer Matrix, in der der zeitliche Aufwand für den Wechsel zwischen den jeweiligen Konfigurationen dargestellt ist. Eine Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Ressourcen sowie die Beschreibung von Fähigkeiten sind nicht vorgesehen.

Eine Methodik zur Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln wird von KARL (2014) dargestellt. Essentielle Grundlagen zur Durchführung der Methodik sind ein Betriebsmittelanforderungs-, ein Betriebsmitteleigenschafts- sowie ein Betriebsmittelstrukturmodell. Letzteres basiert auf einer statischen Produktarchitektur-Design-Structure-Matrix. Alternative Rekonfigurationen werden anschließend in einem Anforderungsabgleich und mithilfe eines Rekonfigurationsalgorithmus identifiziert und als Graphen dargestellt. Anschließend erfolgt eine Auswahl der besten Rekonfigurationsalternative.

Bei der Modellierung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen hat die Modellierung und Beschreibung von System- und Maschinenkonfigurationen einen großen Einfluss auf die Güte und Detaillierung der Planungsergebnisse. Im Allgemeinen eignen sich Petri-Netze aufgrund ihrer Eigenschaften für die Modellie-

nung von komplexen Systemen (PRIESE & WIMMER 2008). Als Vorteile von Petri-Netzen für die Abbildung von rekonfigurierbaren Systemen lassen sich insbesondere die einfache Durchführung der Modellierung, die graphische Darstellung von Zuständen sowie die Möglichkeit von Berechnungen anführen (LI ET AL. 2012). Es lässt sich daher festhalten, dass sich Petri-Netze aufgrund ihrer generellen Eigenschaften zur Modellierung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen eignen. Für die Auswahl von Konfigurationen rekonfigurierbarer Produktionssysteme werden des Weiteren Beschreibungen der Eigenschaften zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Konfigurationen benötigt. Die konkrete Beschreibung der Fähigkeiten einzelner Konfigurationen wird bei den präsentierten Ansätzen nicht beachtet oder lediglich vereinfacht dargestellt. Daher werden im folgenden Abschnitt Ansätze zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme untersucht.

3.3 Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme

Die primäre Aufgabe der PPS ist die Planung und Steuerung der Prozesse in der Montage und Fertigung unter Berücksichtigung von Terminen, Kapazitäten und Mengen (EVERSHEIM 2002). Zunächst ist festzustellen, dass nur sehr wenige Forschungsarbeiten ein gesamtheitliches Vorgehen für die PPS für rekonfigurierbare Produktionssysteme bieten. Eine Übersicht der relevanten Arbeiten, die allgemeine Ansätze für die Gestaltung einer anpassungsfähigen PPS beinhalten, wird nachfolgend dargestellt. Des Weiteren werden die bisherigen Forschungsaktivitäten in Ansätze zur Generierung und Auswahl von Konfigurationen, Arbeits- und Prozessplanung, Kapazitätsplanung und -steuerung sowie Optimierung der Maschinenbelegung unterteilt und im Folgenden diskutiert.

3.3.1 Allgemeine Ansätze

Nach dem heutigen Stand der Technik und Forschung existieren keine Ansätze zur durchgängigen Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme. In den meisten Fällen werden einzelne Teilbereiche der PPS betrachtet oder allgemeine Möglichkeiten zur Strukturierung und Gestaltung anpassungsfähiger PPS-Systeme aufgezeigt. Im vorliegenden Abschnitt werden daher ausgewählte Forschungsarbeiten vorgestellt, die grundlegende Ansätze zur Strukturierung und Gestaltung der PPS aufzeigen.

3.3 Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme

Der Ansatz von LILES & HUFF (1990) stellt ein Planungsmodell speziell für die PPS von sich verändernden Produktionssystemen dar. Dieses baut auf einem hierarchisch gegliederten Modell von Expertensystemen auf. Dabei werden zunächst Kundenaufträge und Absatzprognosen aufgenommen und Materialbedarfe abgeleitet. Zusätzlich werden mögliche Arbeitspläne sowie die optimale Konfiguration des Systems generiert. Zuletzt berücksichtigt das Modell auch Bereiche der Produktionssteuerung, wie beispielsweise die Auftragsfreigabe. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Planungsschritte fehlt.

In der Forschungsarbeit von UNGER (1998) wird ein Beitrag zur Produktionsplanung und -steuerung komplexer Produkte in wandlungsfähigen Unternehmensstrukturen dargestellt. Im Speziellen wird ein Modell für die Koordination von Produktionsaufträgen unter Berücksichtigung von Kooperationspartnern und dynamischen, organisatorischen Strukturen gezeigt. Das Modell, das grundsätzlich als ein Rahmenwerk für die Produktionsplanung gesehen werden kann, besteht aus einem Grundmodell, einem Ablaufmodell sowie mehreren Vereinfachungsprinzipien. Eine Betrachtung rekonfigurierbarer Produktionssysteme sowie deren spezifischer Eigenschaften finden nicht statt.

Ausgehend von einem turbulenten Unternehmensumfeld und dem Bestreben, sich stetig an verändernde Marktanforderungen anzupassen, zeigen WIENDAHL ET AL. (2007), welche Randbedingungen und Anforderungen hinsichtlich der Gestaltung der PPS einzuhalten sind. Dabei unterscheiden sie die Ebenen der Parametrisierung, der Basiskonfiguration und der logistischen Strategie. Die Werkzeuge der PPS werden in funktionale Logik und Arbeitsablauf der Prozessreihenfolge aufgeteilt. Weiterhin beinhalten sie u. a. die Elemente Funktionsmodell, Methoden, Datenmodell, Dateninterface, Prozessstatus und Prozesssequenz. Aufbauend darauf zeigt WIENDAHL (2009) ein Rahmenwerk für die Gestaltung eines anpassungsfähigen PPS-Systems sowie die hierfür notwendigen befähigende Elemente auf. Letztere sind die Anpassungsfähigkeit, die Neutralität, die Skalierbarkeit, die Modularität und die Kompatibilität. Weiterhin werden die für die Umsetzung notwendigen Prozesse dargelegt. WIENDAHL (2009) stellt in seinem Beitrag zudem eine Design-Matrix dar, die mögliche Anpassungen von PPS-Systemen nach einer Top-Down-Perspektive strukturiert. Aus Sicht von WIENDAHL (2009) sind die Anpassungen aufseiten der Parametrierung, der Basis-Konfiguration und der logistischen Strategie für eine Steigerung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der PPS vorzunehmen. Im Mittelpunkt der Betrachtungen steht die grundlegende Veränderbarkeit von PPS-Systemen. Dahingegen fehlen Methoden zur Produktionsplanung und konkrete Lösungsvorschläge.

Aus Sicht des heutigen Standes der Technik und Forschung lässt sich festhalten, dass durchgängige Vorgehensweisen für die PPS, die die Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme in allen Planungsebenen und -phasen beinhalten, bisher nicht erforscht und entwickelt worden sind. Eine umfassende Betrachtung bleibt folglich aus. Dahingegen bieten die vorgestellten Forschungsarbeiten grundsätzliche Richtlinien für die wandlungsfähige und flexible Gestaltung der PPS.

3.3.2 Ansätze zur Generierung und Auswahl von Konfigurationen

Eine wesentliche Prämisse für die Planung von Produktionsabläufen in rekonfigurierbaren Produktionssystemen ist die strukturierte und konsistente Abbildung von Konfigurationen sowie die hierfür benötigten Informationen. Als Konfigurationen gelten sowohl der Aufbau und die Zusammensetzung des Systems als auch die Zusammensetzung einzelner Produktionsressourcen aus Modulen. Auf Systemebene werden insbesondere Layout-Alternativen als Konfiguration verstanden (KOREN ET AL. 1999, SPICER ET AL. 2002, KOREN & SHPITALNI 2010, WANG & KOREN 2012). Des Weiteren können beispielsweise neue Systemkonfigurationen durch Anpassung der Maschinenanzahl und der Anordnung generiert werden. Auf der Ebene der Maschine wird eine Rekonfiguration vor allem als ein Austausch von Modulen, wie z. B. Achsen und Spindeln, verstanden (SPICER 2002, TANG 2005, WIENDAHL ET AL. 2007). Die vorhandenen Forschungsansätze verwenden für die Beschreibung von Konfigurationen unterschiedliche Abstraktionsgrade und sind auf verschiedenen Betrachtungsebenen angesiedelt. Im Allgemeinen wird die Beschreibung von Konfigurationen in vielen Forschungsansätzen adressiert. Dabei werden in vielen Fällen mathematische Methoden und Modellierungsansätze angewandt (SAAD ET AL. 2002, NOURELFATH ET AL. 2003, DASHCHENKO 2006B, CHALFOUN ET AL. 2013). Geeignete und optimale Konfigurationen können nach unterschiedlichen Gesichtspunkten definiert und ausgewählt werden. Beispielhafte Auswahlkriterien können geringe Durchlaufzeiten unter Berücksichtigung notwendiger Werkzeuge (REN ET AL. 2007), Produktions- und Rekonfigurationskosten (JAIN & PALEKAR 2005) sowie Bauteilanforderungen (SHABAKA & ELMARAGHY 2007) sein. In den nachfolgenden Ausführungen werden die für die vorliegende Arbeit relevanten Forschungsarbeiten dargestellt.

KOREN ET AL. (1999) definieren grundlegende Gestaltungsregeln für rekonfigurierbare Produktionssysteme. Hierbei wird vor allem die Modularität in Form von unterschiedlichen Konfigurationen herausgestellt. In den Betrachtungen werden zudem die Auswirkungen der Konfigurationen auf die Produktivität und die

3.3 Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme

Betriebskosten adressiert. Insbesondere Systemkonfigurationen, die eine serielle Anordnung der Maschinen beinhalten, weisen eine geringe Produktivität auf. Zusammenfassend stellen die Autoren fest, dass die Ausgestaltung der Konfigurationen einen maßgeblichen Einfluss auf die Leistung des Systems hat. Die Auswahl geeigneter Konfigurationen wird nicht weiter betrachtet.

XIAOBO ET AL. (2000A) stellen ein stochastisches Modell eines rekonfigurierbaren Produktionssystems vor. Hierbei werden u. a. Produktfamilien, unterschiedliche Konfigurationen sowie die zur Auswahl notwendigen Zielfunktionen berücksichtigt. Die Konfigurationen beinhalten primär teilfamilienabhängige Produktionszeiten. Eine Beschreibung der technischen Zusammensetzung und Eigenschaften erfolgt dabei nicht. Im Speziellen werden bei der Konfigurationsauswahl stochastisch verteilte Ankunftszeiten neuer Aufträge betrachtet. Bei der anschließenden Auswahl wird die Maximierung der Zielfunktion, d. h. der maximale Erlös des Produktionsauftrages in den Fokus der Betrachtungen gestellt. Weiterhin wird für die Auswahl eine Vielzahl an Annahmen aufgestellt. Beispielsweise werden die Rekonfigurationszeiten vernachlässigt. Weiterführende Forschungsansätze, wie z. B. Auswahlstrategien von Konfigurationen, die auf dem entwickelten stochastischen Modell basieren, sind in XIAOBO ET AL. (2000B) und XIAOBO ET AL. (2001) zu finden.

Ein Modell zur Generierung von Konfigurationen, welches auf kinematischen Anforderungen basiert, wird von SHABAKA & ELMARAGHY (2007) vorgestellt. Hierbei werden die Bauteilanforderungen mit den verfügbaren Konfigurationen der Maschinen abgeglichen. Die identifizierten Maschinenmodule, die die Bearbeitung ermöglichen, werden anschließend zur Generierung neuer Konfigurationen herangezogen.

Darüber hinaus finden sich bei mehreren Autoren Ansätze zur Auswahl von Konfigurationen für gegebene Rahmenbedingungen. Der Fokus liegt dabei auf der Systemebene. Für REN ET AL. (2007) sind diejenigen Konfigurationen optimal, die geringe Durchlaufzeiten unter Berücksichtigung der notwendigen Werkzeuge realisieren. Mithilfe eines Analytisch-Hierarchischen-Prozesses (AHP) ermittelt und bewertet ABDI (2009) unter Beachtung verschiedener Zielgrößen, wie etwa Kosten und Qualität, mögliche Layout-Alternativen. Eine Auswahl der besten Alternative schließt sich an. Einen weiteren Forschungsansatz stellen DOU ET AL. (2011) in ihrer Methode zur Optimierung der Kapitalkosten bei der Konfigurationsauswahl in der Fließproduktionslinie vor. Für die Auswahl der optimalen Konfiguration kommt ein genetischer Algorithmus zum Einsatz.

3 Stand der Technik und Forschung

Ein Modell zur Konfigurationsauswahl für rekonfigurierbare Prozesse ist in JAIN & PALEKAR (2005) dargestellt. Auf Basis einer deterministischen Nachfrage wird der optimale Einsatz der jeweiligen Konfigurationen innerhalb der Planungsperioden ermittelt. Als Konfiguration werden in dieser Veröffentlichung die Anordnung der Maschinen sowie deren Positionierung im Layout verstanden. Eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Maschinen erfolgt nicht. Im Auswahlprozess werden u. a. konfigurationsabhängige Produktionskosten und Rekonfigurationskosten berücksichtigt.

YOUSSEF & ELMARAGHY (2006A) stellen eine Vorgehensweise zur Berechnung des Rekonfigurationsaufwandes für Produktionssysteme vor. Bei der Beschreibung der Rekonfiguration werden der kostentechnische und zeitliche Aufwand berücksichtigt. Für die Berechnung führen sie den sogenannten „reconfiguration smoothness (RS)“ Index ein. Dieser Index stellt ein Maß für den Rekonfigurationsaufwand dar und betrachtet die Markt-, System- und Maschinenebene. Die Gewichtung der einzelnen Faktoren ergänzt die Berechnung. Mithilfe des Index können Systemkonfigurationen bewertet und ausgewählt werden. Des Weiteren wird ergänzend von YOUSSEF & ELMARAGHY (2006B) die Minimierung der Anlagenkosten eines rekonfigurierbaren Systems untersucht. In die Betrachtungen werden dabei die Anzahl und Anordnung der Maschinen, die Durchführbarkeit der Arbeitsgänge sowie die Deckung des Kapazitätsbedarfs einbezogen. Aufbauend auf den Erkenntnissen stellen YOUSSEF & ELMARAGHY (2007) in einem weiteren Forschungsansatz die Verwendung des RS-Index u. a. in Meta-Heuristiken und genetischen Algorithmen dar. Das Ziel ist hierbei die Auswahl und Optimierung von Konfigurationen. In einer ersten Planungsphase werden anhand von Nachfrageszenarien und den aufgeführten Optimierungsmethoden geeignete Konfigurationen identifiziert. Fortführend werden diese anhand des RS-Index bewertet und die notwendigen Rekonfigurationen abgeleitet. Zusammenfassend lässt die Komplexität dieses Ansatzes keine breite industrielle Anwendung zu.

Eine Fortführung der vorherigen Forschungsarbeiten findet sich bei YOUSSEF & ELMARAGHY (2008). Die bestehenden Ansätze werden dabei um die Berücksichtigung der Maschinenverfügbarkeit bei der Auswahl geeigneter Konfigurationen erweitert. Weiter gehen sie sowohl auf die System- als auch auf die Maschinenebene ein. Im Rahmen dieses Ansatzes werden aus der Anzahl der notwendigen Maschinen und unter Berücksichtigung technologischer sowie logistischer Restriktionen mögliche Systemkonfigurationen generiert. Dabei wird u. a. ein genetischer Algorithmus zur Minimierung der Kapitalkosten und Maximierung der

3.3 Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme

Systemverfügbarkeit angewandt. Weiterhin bilden u. a. Werkzeuge und Spindeln die Basis für die Maschinenkonfigurationen. Es zeigt sich, dass sich die Betrachtung der Maschinenverfügbarkeit auf die Auswahl der optimalen Konfigurationen auswirkt und in einer erhöhten Maschinenanzahl resultiert.

Auf Basis eines mathematischen Modells berechnen SAXENA & JAIN (2012) die Betriebskosten eines Produktionssystems. In die Berechnung fließen u. a. Kapital-, Rekonfigurations-, Betriebs- und Wartungskosten ein. Die Auswahl der Konfigurationen erfolgt in drei Phasen unter Berücksichtigung der zu produzierenden Bauteile und der Anzahl an Produktionsstufen. Ausgehend von Szenarien werden die Konfigurationen in der ersten Phase mathematisch beschrieben. Anschließend erfolgt in der zweiten Phase die Generierung unterschiedlicher Alternativen. In der letzten Phase werden abschließend die Konfigurationsalternativen optimiert und eine kostenminimale Konfiguration ausgewählt. Zusammenfassend werden Möglichkeiten zur mathematischen Beschreibung des Systemverhaltens dargestellt. Eine technische Beschreibung der Ressourcen bleibt hierbei aus.

WANG & KOREN (2012) betrachten in ihrem Ansatz vorwiegend die Systemebene. Ziel ihres Vorhabens ist die Identifikation der wirtschaftlichsten Rekonfiguration durch Hinzufügen und Entfernen von Bearbeitungskapazitäten. Als Eingangsgrößen werden die verfügbaren Maschinen sowie der Durchsatz betrachtet. Die Optimierung und Auswahl erfolgt mithilfe eines genetischen Algorithmus. Dabei werden Produktionsaufträge abgebildet und den Ressourcen zugeordnet. Anschließend wird die optimale Konfiguration mit einer minimalen Anzahl an Maschinen ermittelt. Im Rahmen dieses Ansatzes werden damit lediglich Systemkonfigurationen optimiert.

Eine Vorgehensweise zur optimierten Maschinenauswahl wird von BENSMAINE ET AL. (2013) dargestellt. Im Speziellen werden bei der Auswahl die Minimierung der Gesamtkosten, bestehend aus Produktions-, Rekonfigurations-, Werkzeugwechsel- und Werkzeugnutzungskosten sowie der Durchführungszeit betrachtet. Zur Lösung dieser Problemstellung verwenden die Autoren einen genetischen Sortieralgorithmus.

Für die Generierung und Auswahl von Konfigurationen existiert eine Vielzahl von Ansätzen, die sowohl die System- als auch die Maschinenebene adressieren. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass zwar ein grundlegendes Verständnis für die Zusammensetzung von Konfigurationen existiert, jedoch detaillierte Anwendungen in der Produktionsplanung fehlen. Für die Auswahl kommen insbesondere mathematische Modelle und Optimierungsalgorithmen zum Einsatz. In

vielen Fällen werden allerdings starre Randbedingungen oder Modellierungsannahmen ausgewählt, die die Anforderungen rekonfigurierbarer Produktionssysteme nur unzureichend erfüllen und somit nur bedingt für die Entwicklung eines Systems für rekonfigurierbare Produktionssysteme anwendbar sind.

3.3.3 Ansätze zur Arbeits- und Prozessplanung

Die Arbeitsplanung wird grundsätzlich als Teilgebiet der Arbeitsvorbereitung verstanden, die die Schnittstelle zwischen der Konstruktion und der Produktion bildet (EVERSHEIM 2002). Im Fokus der Tätigkeiten stehen die Gestaltung und Festlegung der Inhalte der einzelnen Fertigungsprozesse für die wirtschaftliche Herstellung eines Produktes (EVERSHEIM 2002). Nachfolgend werden die in diesem Bereich repräsentativen und relevanten Arbeiten dargestellt.

Einen Schwerpunkt im Bereich der Arbeits- und Prozessplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme stellt die Bildung von Teilefamilien dar. Hierfür zeigt GALÁN (2008) einen Forschungsansatz zur Bestimmung der Größe einer Produktfamilie im Rahmen der Maschinenbelegung, sodass Rekonfigurationskosten, Überkapazitäten sowie Überfunktionalitäten minimiert werden.

ELMARAGHY (2007) klassifiziert die Prozessplanung nach Granularität, Automatisierung und Umfang der Prozesspläne. Weiterhin erfolgt eine Unterteilung der Granularität u. a. in eine Multi-Domain-Prozessplanung, Makroprozessplanung und Prozessparameteroptimierung. Als eine Möglichkeit zur Anpassung werden rekonfigurierbare Prozesspläne eingeführt, die sich an ändernde Teilefamilien anpassen lassen. Eine Einordnung der Vorgehensweisen und Prozesspläne in die Phasen und Aufgaben der Produktionsplanung erfolgt nicht.

Der Ansatz rekonfigurierbarer Prozesspläne wird von AZAB & ELMARAGHY (2007) fortgeführt. Des Weiteren werden die Erzeugnisgliederung und die Arbeitsvorgangsplanung miteinander verknüpft. Im Speziellen kommt ein genetischer Algorithmus zur Identifikation von Produktänderungen, die über die bisherigen Produktfamilien hinausgehen, zur Anwendung. Auf Basis eines Master-Prozessplans, der alle Informationen hinsichtlich der Produktion beinhaltet, erfolgt ein Abgleich mit dem neuen zu produzierenden Produkt. Änderungen der Produktmerkmale können folglich identifiziert werden. Sollten Merkmale bisher nicht berücksichtigt worden sein, werden diese durch ein mathematisches Modell hinzugefügt, das die Zeit der Umpositionierung des Bauteils zwischen zwei Vorrichtungen sowie die Werkzeugwechselzeit abbildet. Im Anschluss erfolgt eine

3.3 Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme

Optimierung der Position in einem Vorranggraphen. Der Ansatz betrachtet ausschließlich die Prozessplanung und bietet keine Möglichkeit, Arbeitsvorgänge den einzelnen Ressourcen konfigurationsspezifisch zuzuordnen.

SHABAKA & ELMARAGHY (2008) zeigen eine Methode zur Optimierung der Kosten von Prozessplanung basierend auf einer genetischen Clusterbildung. In die Betrachtungen fließen u. a. die Maschinenbelegung und -konfiguration, die Clustervorgangsreihenfolge sowie die Zuordnung von Werkzeugen und Vorgängen ein. Der Ansatz zeigt zudem das kostentechnische Potenzial der Clusteroptimierung. Dahingegen finden technologische Kriterien keine Berücksichtigung.

Für Anwendungsfälle, bei denen Teile außerhalb der ursprünglichen Produktfamilie produziert werden sollen, zeigen AZAB ET AL. (2009) ein Modell zur Erzeugung von Arbeitsplänen. Sie verwenden u. a. einen Rekonfigurations-Index, der ein Maß für die Mehrarbeit, Zeit und somit auch Kosten der Rekonfiguration eines Arbeitsplans darstellt. Weiterhin werden konfigurationsabhängige Produktionskosten mittels konfigurationsabhängiger Verrechnungssätze berücksichtigt. Die Modellierung der Produktionsressourcen kann nicht zur automatisierten Zuordnung von Arbeitsvorgängen genutzt werden. Hierzu müssen die Fähigkeiten der einzelnen Konfigurationen detailliert beschrieben werden.

Mit Fokus auf kleine Losgrößen legen BENSMAINE ET AL. (2011) in ihrem Forschungsansatz einen entwickelten genetischen Algorithmus zur Minimierung der Gesamtkosten und der Durchlaufzeiten dar. In Fortführung zu diesem Ansatz demonstrieren BENSMAINE ET AL. (2012) eine Metaheuristik zur Auswahl von Prozessplänen auf Basis von Durchlaufzeiten, den Gesamtkosten und dem Aufwand für Rekonfigurationen. Des Weiteren stellen BENSMAINE ET AL. (2014) eine integrierte Prozess- und Reihenfolgeplanung auf Basis einer Heuristik dar. Ausgangsbasis hierbei sind alternative Prozesspläne, die eine Flexibilität hinsichtlich Prozess und Vorgang ermöglichen. Eine Annahme dieser Vorgehensweise ist, dass jeder Arbeitsvorgang durch verschiedene Konfigurationen ausgeführt werden kann. Weiterhin werden Prozesszeiten und Verfügbarkeiten in der Planung berücksichtigt. Mittels eines Auswahlindex wird iterativ die Terminierung von Arbeitsvorgängen durchgeführt. Im Rahmen des Forschungsansatzes werden jedoch keine unterschiedlichen Planungsebenen betrachtet.

Zusammenfassend sind in den vorgestellten Forschungsansätzen im Bereich der Arbeits- und Prozessplanung jeweils Teilbereiche und Teilfunktionen der Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme abgebildet. Die Integration in die Produktionsplanung ist oftmals unklar und nicht definiert. Zwar

beschäftigen sich einige Forschungsarbeiten in der Arbeits- und Prozessplanung mit der Erzeugung der notwendigen Planungsdaten, jedoch sind die resultierenden Datenstrukturen hinsichtlich der Integration von Stamm- und Bewegungsdaten in die Produktionsplanung nur unzureichend dargelegt.

3.3.4 Ansätze zur Kapazitätsplanung und -steuerung

Im Allgemeinen werden in der Kapazitätsplanung die Kapazitätsbedarfe und das zur Verfügung stehende Kapazitätsangebot ermittelt und anschließend synchronisiert (SCHUH & STICH 2012). Im Rahmen der Synchronisation wird zwischen einer zeitlichen, intensitätsmäßigen und quantitativen Kapazitätsanpassung unterschieden (FANDEL ET AL. 1994, SCHUH ET AL. 2014). Beispielsweise können im Rahmen eines Kapazitätsabgleichs einzelne Aufträge verschoben oder zurückgestellt werden. Unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme besteht zudem die Möglichkeit, das Kapazitätsangebot durch die Änderung der Konfiguration anzupassen bzw. den Kapazitätsbedarf durch eine schnellere Konfiguration zu minimieren. Diese Möglichkeiten in der Kapazitätsplanung und -steuerung sind aktuell Gegenstand der wissenschaftlichen Literatur. In verschiedenen Forschungsarbeiten wurden in den vergangenen Jahren verstärkt Modellierungs- und Optimierungsansätze entwickelt. Die nachfolgenden Ansätze stehen exemplarisch für eine Vielzahl weiterer Forschungsarbeiten. Sie wurden systematisch ausgewählt, da sie repräsentativ für andere Arbeiten stehen oder auf diesen basieren.

SON ET AL. (2001) stellen einen Ansatz für die Skalierung und die Kapazitätsverteilung auf mehrere Linien für rekonfigurierbare Produktionssysteme dar. Ausgangspunkt der Untersuchungen sind mathematische Beschreibungsmodelle, die das Systemverhalten sowie die resultierenden Betriebskosten abbilden. Als Möglichkeit zur Umsetzung der Skalierbarkeit wird u. a. die Parallelisierung von Produktionsressourcen betrachtet. Die Autoren beschränken sich bei ihren Untersuchungen auf die Systemebene, einzelne Produktionsressourcen sind nicht Bestandteil des Ansatzes.

In ihrem Forschungsansatz betrachten ASL & ULSOY (2003) Methoden zur Kapazitätsanpassung unter Berücksichtigung stochastisch verteilter Nachfrageszenarien. Ziel dieses Ansatzes ist die Minimierung von Produktionskosten. Eine Rekonfiguration geht dabei in die Kosten für Kapazitätsanpassungsmaßnahmen ein, da hierdurch die Kapazität verändert wird. Für jede Planungsperiode gilt es folg-

3.3 Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme

lich, mögliche Rekonfigurationen abzuwägen. Eine Beschreibung der Skalierbarkeit von Kapazitäten sowie deren Nutzung in Planungsvorgehensweisen fehlt.

BRUCCOLERI ET AL. (2005) zeigen ein agentenbasiertes Modell zur Abstimmung von Kapazitäten in der Produktionsplanung multinationaler, rekonfigurierbarer Unternehmen. In Abhängigkeit der Rahmenbedingungen verhandeln Agenten als Vertreter der Unternehmensgruppen, Werke oder Produktionslinien, über die Zuteilung von Produktionskapazitäten. Es zeigt sich, dass eine dezentralisierte Entscheidungsfindung mit Agentensystemen Vorteile gegenüber einem zentralen Planungsansatz bietet. Beispielsweise kann die Auslastung der Produktionskapazitäten gesteigert werden. Dahingegen werden im vorliegenden Ansatz keine unterschiedlichen Planungsphasen betrachtet.

Aus dem Marktbedarf und dem daraus folgenden Kapazitätsbedarf ermitteln DEIF & ELMARAGHY (2006) die notwendige Funktionalität des Produktionssystems. Durch die Generierung möglicher Konfigurationen und die Durchführung der Rekonfiguration des Systems werden die notwendigen Funktionalitäten umgesetzt. Aufbauend hierzu untersuchen DEIF & ELMARAGHY (2007) die Auswahl von Konfigurationen mit dem Ziel der optimalen Skalierung der Kapazitäten unter Berücksichtigung der Betriebskosten. Als Ansatz dient ein Modell des Systems Dynamics. In die Betrachtungen fließen Rekonfigurationskosten sowie Kosten mit ein, die mit der Bereitstellung einer bestimmten Kapazität verbunden sind. Mittels eines genetischen Algorithmus wird anschließend ein kostenminimaler Zeitplan generiert, der die Zeitpunkte möglicher Rekonfigurationen beinhaltet. Technologische Auswahlkriterien und mögliche Berechnungsvorschriften für skalierbare Kapazitäten werden in den vorliegenden Forschungsansätzen nicht betrachtet. Zudem fehlt es an einer Integration der möglichen Konfigurationen in bestehende Planungsprozesse und an der Anpassung an die Rahmenbedingungen der PPS. Die Entscheidungsmodelle und Vorgehensweisen können zusammenfassend als grundlegende Ansätze betrachtet werden.

ELMASRY ET AL. (2014) zeigen einen dynamischen Modellierungsansatz, der auf den Prinzipien des Systems Dynamics basiert und der Analyse des Systemverhaltens dient. Für die Modellierung wird ein kostenbasierter Ansatz gewählt, der die Kosten für die Skalierung der Kapazitäten abbildet. Weiterhin finden saisonale Schwankungen Berücksichtigung. Mithilfe des dargestellten Modells werden anschließend fünf unterschiedliche Skalierungsstrategien experimentell in einer Simulation untersucht.

3 Stand der Technik und Forschung

Das Kapazitätsmanagement für Montagesysteme mit rekonfigurierbaren Ressourcen wird in den Forschungsarbeiten von GYULAI ET AL. (2014A) und GYULAI ET AL. (2014B) in den Fokus der Betrachtungen gestellt. Ausgangsbasis des Modells zur Kapazitätsplanung und -steuerung ist ein Kostenmodell. Des Weiteren werden unterschiedliche Systemkonfigurationen verwendet und Sequenzbildungen, z. B. als Travelling-Salesman-Problem, durchgeführt. Eine detaillierte Betrachtung der Fähigkeiten der einzelnen Ressourcen wird nicht dargestellt.

TOONEN ET AL. (2014) zeigen Möglichkeiten für die Kapazitätsanpassung mithilfe von rekonfigurierbaren Werkzeugmaschinen auf. Insbesondere die Beeinflussung der logistischen Zielgrößen durch die neue Anpassungsmöglichkeit wird hierbei adressiert. Des Weiteren stellen LAPPE ET AL. (2014) ausgehend von Möglichkeiten für die Kapazitätsanpassung eine durchlaufzeitharmonisierende Kapazitätssteuerung vor. Im Speziellen werden Maßnahmen der Arbeitszeitflexibilität sowie der Einsatz rekonfigurierbarer Werkzeugmaschinen berücksichtigt. Insbesondere die Beeinflussung der logistischen Zielgrößen durch die neue Anpassungsmöglichkeit steht im Mittelpunkt der Betrachtungen. Eine Einordnung der Vorgehensweise in weitere Phasen der PPS sowie eine Beschreibung von Konfigurationen erfolgt nicht.

In diesem Abschnitt wurde die Kapazitätsplanung und -steuerung als ein Schlüsselfaktor für die PPS für rekonfigurierbare Produktionssysteme herausgearbeitet. Für die mathematische Beschreibung der Problemstellungen existieren zahlreiche Forschungsansätze, die die Minimierung der Produktions- und Betriebskosten adressieren. Die Potenziale hinsichtlich der Skalierbarkeit von Kapazitäten einzelner Ressourcen im Kontext der Kapazitätsplanung und -steuerung werden jedoch nur vereinzelt untersucht. Die aufgezeigten Themen werden als Einzelbereiche behandelt, ihre Einbindung in Vorgehensweisen zur Produktionsplanung bleibt in vielen Fällen unklar. Weiterhin wurden die Beschreibung von skalierbaren Eigenschaften rekonfigurierbarer Ressourcen und die damit verbundene Bereitstellung für Planungsmethoden bislang noch in keinem Forschungsansatz umgesetzt.

3.3.5 Ansätze zur Optimierung der Maschinenbelegung

In diesem Abschnitt werden Forschungsansätze zur Optimierung der Maschinenbelegung hinsichtlich der logistischen Zielgrößen für rekonfigurierbare Produktionssysteme dargestellt und diskutiert. Während die Generierung und Auswahl von Konfigurationen Gegenstand zahlreicher Forschungsansätze ist, existieren

3.3 Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme

für die Optimierung der Maschinenbelegung für rekonfigurierbare Produktionssysteme nur wenige Forschungsansätze und Erkenntnisse (BENSMARINE ET AL. 2014). Als Grundlage der Optimierung werden unterschiedliche mathematische Modellierungsansätze angewandt. Die verwendeten Algorithmen zur Lösung der Optimierungsprobleme lassen sich überwiegend den Heuristiken zuordnen. Beispielsweise kommen Ansätze auf Basis von Tabu-Search (z. B. YOUSSEF & ELMARAGHY 2008), Simulated-Annealing (z. B. AZAB & NADERI 2015), Fuzzy-Logic (z. B. NEHZATI ET AL. 2012) und genetischen Algorithmen (z. B. LI & XIE 2006) zur Anwendung. Als Zielgrößen werden insbesondere die Minimierung der Produktions- bzw. Betriebskosten sowie die Verringerung der Durchlaufzeiten formuliert. Die nachfolgenden Ansätze stehen repräsentativ für die in der wissenschaftlichen Literatur diskutierten Themen im Bereich der Optimierung der Maschinenbelegung für rekonfigurierbare Produktionssysteme.

JAIN & PALEKAR (2005) untersuchen in ihrer Arbeit den Sonderfall eines rekonfigurierbaren Produktionssystems, in dem keine Zwischenlagerung halbfertiger Teile möglich ist. Mithilfe einer Heuristik werden die Systemkonfigurationen ausgewählt. Das Ziel ist hierbei die Minimierung der Produktionskosten und der Lagerbestände. Eine Maschinenbelegung auf Basis eines genetischen Algorithmus und einer Petri-Netz-Modellierung stellen LI & XIE (2006) dar. Im Speziellen sind die möglichen Konfigurationen für die Produktionsoperationen bereits vorgegeben und können nicht angepasst werden. Wesentliche Zielgröße ist die Minimierung der Rekonfigurationskosten unter Einhaltung der vorgegebenen Liefertermine.

Eine zweistufige Vorgehensweise für die Auswahl von Konfigurationen unter Berücksichtigung der Kosten und der Systemverfügbarkeit wird von YOUSSEF & ELMARAGHY (2007) vorgestellt. Die Erkenntnisse wurden im Rahmen einer Optimierungsmethode mittels genetischer Algorithmen und Tabu Search von YOUSSEF & ELMARAGHY (2008) weitergeführt und detailliert.

Eine Methode zur Erstellung und Sequenzierung von Produktfamilien in rekonfigurierbaren Demontagesystemen wird von EGUIA ET AL. (2011) vorgestellt. Hierbei erfolgt die Zusammenfassung von einzelnen Produkten zu Produktfamilien mithilfe einer hierarchischen Clusteranalyse. In einem zweiten Schritt wird die Reihenfolgenbestimmung anhand eines Mixed Integer Linear Programming (MILP) Modells durchgeführt, welches Rekonfigurationskosten sowie die mit geringen Auslastungen verbundenen Kosten minimiert. Weiter zeigen EGUIA ET AL. (2013) ein Modell zur gleichzeitigen Bildung von Teilefamilien, Maschinen-

3 Stand der Technik und Forschung

gruppierungen und Reihenfolgeplanung in rekonfigurierbaren, zellförmigen Produktionssystemen. Hierfür wird ebenfalls ein MILP-Modell mit dem Ziel der Minimierung der Rekonfigurationskosten und der Kosten für eine zu geringe Auslastung formuliert. Darüber hinaus wird eine approximierende Lösungsmethode, basierend auf dem metaheuristischen Verfahren Tabu-Search, vorgestellt.

Einen weiteren Ansatz mittels eines genetischen Algorithmus zeigen ABBASI & HOUSHMAND (2011). Das mathematische Modell zur Beschreibung eines rekonfigurierbaren Produktionssystems umfasst die Festlegung der Anzahl der Produktionsaufgaben innerhalb der Systemanordnung, die Reihenfolgebildung mittels eines genetischen Algorithmus sowie die Festlegung einer optimalen Losgröße. Die Durchführung der Planungsmethode resultiert in einer optimalen Anordnung des Systems. Eine Betrachtung unterschiedlicher Planungsphasen und -schritte findet nicht statt.

Eine Vorgehensweise für die Planung von Reihenfolgen wird in dem Ansatz von YU ET AL. (2013) demonstriert. Innerhalb des Forschungsansatzes wird die Sequenz der Bauteile, der Operationen und Maschinenpaarungen sowie die Sequenzen der zu den Maschinen zugeordneten Bauteile betrachtet. Weiterhin wurden 48 Prioritätsregeln hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit evaluiert. Eine Integration der Vorgehensweise in einen Planungsprozess wird nicht gezeigt.

Einen weiteren Forschungsansatz auf Basis einer Heuristik zeigen BENSMAINE ET AL. (2014). Im Speziellen wird eine integrierte Prozess- und Maschinenbelegungsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme im Rahmen der Forschungsarbeit entwickelt. Hierbei erfolgt die Maschinenbelegung regelbasiert mit dem Ziel der Minimierung der Durchlaufzeiten.

Im vorliegenden Abschnitt wurde auf die Ansätze zur Optimierung der Maschinenbelegung für rekonfigurierbare Produktionssysteme eingegangen. Es zeigt sich, dass die eingesetzten Verfahren zur Maschinenbelegung von essentieller Bedeutung für die Qualität und Aussagekraft des generierten Belegungsplans sind. In einer Vielzahl der Ansätze kommen überwiegend Heuristiken zum Einsatz. Die Auswahl und die Festlegung von Konfigurationen werden in vielen Fällen nach kostentechnischen Kriterien durchgeführt. Des Weiteren sind die dargestellten Forschungsarbeiten in vielen Fällen nicht Bestandteil einer durchgängigen Planungsmethode.

3.4 Ableitung des Handlungsbedarfs

In Kapitel 3 wurden die im Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit relevanten Forschungsvorhaben dargestellt und diskutiert. Schwerpunktmäßig wurde auf Ansätze zur Modellierung von Produktionssystemen und -ressourcen sowie auf Ansätze zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme eingegangen. Aus der beschriebenen Ausgangssituation in Kapitel 1, den in Kapitel 2 dargelegten Grundlagen sowie den Ausführungen im vorliegenden Kapitel wird deutlich, dass für die Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme erhöhte Anforderungen an die Planungsmethoden sowie die dafür notwendigen Daten gestellt werden. Im Speziellen bedarf es einer geeigneten Beschreibung der planungsrelevanten Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme, die im Rahmen der Produktionsplanung durchgängig zu berücksichtigen sind.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die wissenschaftliche Literatur unterschiedliche Bereiche der Produktionsplanung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen abdeckt. Jedoch wird häufig eine spezifische Betrachtung einzelner, losgelöster Teilbereiche vorgenommen. Durchgängige Lösungen für die Planung und Steuerung von Produktionsabläufen, welche die Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme in verschiedenen Planungsphasen berücksichtigen, wurden noch nicht entwickelt. Stattdessen beschränkt sich der Stand der Technik und Forschung auf spezielle Frage- und Themenstellungen. Der Großteil der Forschungsaktivitäten hat sich u. a. mit der der physischen Gestaltung von rekonfigurierbaren Systemen in verschiedenen Formen, wie z. B. der Standardisierung von Schnittstellen und der Anordnung von Maschinen, sowie der Arbeits- und Prozessplanung auseinandergesetzt. Eine Diskrepanz zwischen Forschungsstand und -bedarf besteht zudem bei der Betrachtung von Konfigurationen. Eine Vielzahl der Forschungsansätze definiert eine Konfiguration lediglich als eine Anordnung von Maschinen zu einem Layout. Technologische Fähigkeiten einzelner Produktionsressourcen werden hingegen in vorhandenen Methoden zur Produktionsplanung nicht berücksichtigt.

Infolgedessen besteht der Handlungsbedarf in der Entwicklung eines Systems, das die Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme durchgängig und in verschiedenen Planungsphasen ermöglicht. Um eine effiziente Planung von Produktionsabläufen für rekonfigurierbare Produktionssysteme gewährleisten zu können, müssen deren Eigenschaften in die Produktionsplanung integriert und zudem nutzbar gemacht werden. Insbesondere die Anpassungsfä-

3 Stand der Technik und Forschung

higkeit der technologischen Fähigkeiten, wie z. B. der verfügbaren Fertigungsverfahren, sowie die Skalierbarkeit der Kapazität müssen in die Planungsdaten und -methoden eingebunden werden. Um skalierbare und anpassbare Planungsdaten zu erhalten, müssen zunächst verschiedene Konfigurationen beschrieben und konfigurationsabhängige Fähigkeiten bestimmt werden. Zusätzlich soll die Zuordnung der Konfigurationen nicht nur auf Basis wirtschaftlicher Kriterien, sondern vor allem auch basierend auf technologischen Kriterien realisiert werden. Es sind folglich Modellierungs- und Beschreibungsansätze zu entwickeln, die diese Möglichkeiten bieten.

Des Weiteren müssen für die Realisierung der mit den angepassten Planungsdaten verbundenen Potenziale neue Planungsmethoden entwickelt werden. Um im Rahmen der Sukzessivplanung die Skalierbarkeit für die exakte Bereitstellung der geforderten Kapazitäten nutzen zu können, muss eine geeignete Vorgehensweise für die Berechnung einer skalierbaren Kapazität bereitgestellt werden. Ein bisher in der Literatur nicht betrachteter Aspekt ist zudem die Anpassbarkeit der technologischen Funktionalitäten in der Produktionsplanung. In der Planung muss der notwendige Funktionsumfang mit geeigneten Hilfsmitteln, wie z. B. mit angepassten Arbeitsplänen, abgebildet werden können. Weiterhin ist es notwendig, die begrenzten Verfügbarkeiten einzelner Konfigurationen planungsseitig zu berücksichtigen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für die Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme die aufgezeigten Informationen in geeigneter Weise bereitgestellt werden und anpassbar sein müssen.

Im Folgenden werden die notwendigen Anforderungen an das zu entwickelnde System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme definiert, die sich aus den in diesem Abschnitt angestellten Betrachtungen sowie den grundlegenden Darstellung in Kapitel 2 ergeben.

4 Anforderungen

4.1 Allgemeines

Im Rahmen dieses Kapitels werden die Anforderungen an ein System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme definiert. In Kapitel 2 wurden vor dem Hintergrund der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit insbesondere die Eigenschaften rekonfigurierbarer Systeme sowie deren Potenziale zur Steigerung der Anpassungsfähigkeit produzierender Unternehmen herausgearbeitet. Der zielgerichtete Einsatz dieser Systeme kann zusammenfassend einen deutlichen Wettbewerbsvorteil für produzierende Unternehmen eröffnen. In Kapitel 3 hat sich jedoch gezeigt, dass bisher nur sehr wenige Forschungsarbeiten ein gesamtheitliches Vorgehen für die PPS für rekonfigurierbare Produktionssysteme bieten. Zwar werden viele Bereiche isoliert betrachtet, der Gesamtzusammenhang findet jedoch keine Beachtung. Folglich gilt es, Anforderungen zu definieren, die das Planungssystem erfüllen muss, um die Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme in der Produktionsplanung durchgängig zu berücksichtigen zu können.

4.2 Adaptionfähigkeit und Übertragbarkeit

Ein System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme muss adaptierbar und auf andere Anwendungsfälle übertragbar sein. Durch die Modellierung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen mit einer generischen Beschreibungsform soll eine adaptierbare Struktur dargelegt werden, die kontextspezifisch angepasst werden kann und somit die Erweiterbarkeit des Planungssystems sicherstellt. Weiterhin muss für eine Anpassung ersichtlich sein, wie die einzelnen Planungselemente und Funktionen zusammenhängen. Darüber hinaus soll das Planungssystem um neue Funktionalitäten und Planungselemente erweitert werden können. Dabei muss sichergestellt werden, dass das System auch unter veränderten, unternehmensspezifischen Randbedingungen anwendbar ist. Der Einsatz des Planungssystems soll insbesondere branchen- und unternehmensunabhängig sein. Die Übertragbarkeit soll daher durch minimale Adaptionaufwände sowohl bei den Modellierungs- und Beschreibungsansätzen als auch bei den Planungsmethoden sichergestellt werden. Des Weiteren sollen vorhandene Softwaresysteme bei der Integration in betriebliche Planungsabläufe beachtet werden.

4.3 Konfigurationsabhängige Beschreibung von Produktionssystemen

Die Analyse bisheriger Ansätze der Produktionsplanung zeigt, dass noch keine allgemeingültige Lösung zur Beschreibung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen für eine durchgängige Produktionsplanung existiert. Eine wesentliche Voraussetzung für die Realisierung eines Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme ist die Strukturierung und Bereitstellung konfigurationsabhängiger Planungsdaten. Für die Abbildung konfigurationsabhängiger Eigenschaften müssen an erster Stelle die möglichen Konfigurationen strukturiert und hinsichtlich ihrer Fähigkeiten (z. B. Fertigungs- und Montageverfahren) beschrieben werden. In diesem Zusammenhang sollen die Modellierungsansätze einen modularen Aufbau aufweisen. Damit kann sichergestellt werden, dass bei Änderung der Zusammensetzung einzelner Konfigurationen, wie z. B. durch den Austausch von Hard- und Softwaremodulen, die Eigenschaften der Konfigurationen ebenfalls adaptiert werden. Darüber hinaus ist die Änderung von Planungsparametern, wie z. B. Bearbeitungszeiten, aufzuzeigen und in die Modellierung zu integrieren. Um eine Integration von Rekonfigurationsvorgängen in den Produktionsabläufen zu ermöglichen, ist hierfür eine geeignete Abbildungsvorschrift zu entwickeln. Dadurch sollen die Wechsel zwischen den Konfigurationen in den Planungsschritten beschreibbar und für die Produktionsplanung nutzbar gemacht werden. Beispielsweise können so Veränderungen der Kapazitäten bei Änderung der Konfiguration abgebildet werden. Bei der Modellierung sollen gängige Normen und Standards, wie z. B. für die Klassifikation von Fertigungsverfahren, berücksichtigt werden, um eine breite, industrielle Akzeptanz zu schaffen.

4.4 Zuordnung und Auswahl von Konfigurationen

Die wesentliche Aufgabe, die es als Vorbereitung für die Produktionsplanung zu erfüllen gilt, ist die Auswahl geeigneter Konfigurationen für die durchzuführenden Produktionsoperationen. Für eine Zuordnung von einzelnen Konfigurationen zu Arbeitsvorgängen müssen folglich Auswahlkriterien für die Konfigurationszuordnung definiert werden. Die Auswahl der Konfiguration soll insbesondere unter technologischen Gesichtspunkten realisiert werden können. Für die Auswahl und Festlegung geeigneter Konfigurationen muss zudem eine Beschreibung des Rekonfigurationsaufwandes abgebildet sein, d. h. des finanziellen und zeitlichen Aufwandes für den Wechsel von einer Konfiguration zur anderen (HEES &

REINHART 2015). Hierfür sollen geeignete Beschreibungsgrößen, wie z. B. Rekonfigurationsindizes, adaptiert und weiterentwickelt werden. Darauf aufbauend soll unter den technisch möglichen Konfigurationen in der Planungsmethode diejenige Konfiguration ausgewählt werden, mit der die vorgegebene Zielgröße am besten erfüllt werden kann. Hierfür ist eine Möglichkeit zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der Konfigurationen vorzusehen, beispielsweise mithilfe von konfigurationsabhängigen Kennzahlen. Darüber hinaus ist für die schnelle und einfache Anpassung des Produktionssystems die Definition von Maßnahmen für Rekonfigurationen über die bekannten Konfigurationsmöglichkeiten hinaus notwendig. Im Falle einer zusätzlichen Rekonfiguration sollen diese als kontextspezifische Anpassungsmaßnahmen zur Adaption des Produktionssystems durch die Produktionsplanung vorgegeben werden können.

4.5 Integration der Skalierbarkeit in die Produktionsplanung

Auf Grundlage der Modellierung und Beschreibung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen für die Produktionsplanung kommt dem Planungssystem die Aufgabe zu, die Skalierbarkeit der Kapazität sowie die Anpassung von Funktionsänderungen in Methoden der Produktionsplanung zu integrieren. Als wesentliche Grundlage für die Planungsmethoden müssen rekonfigurierbare Produktionssysteme für die Produktionsplanung beschreibbar gemacht werden. Beispielsweise können vor allem konfigurationsabhängige Planungsdaten als adäquates Beschreibungsmittel betrachtet werden. Des Weiteren sollen planungsspezifische Dokumente, wie z. B. Arbeitspläne, hinsichtlich ihrer Struktur und Inhalte in Bezug auf die Anforderungen rekonfigurierbarer Systeme weiterentwickelt werden. Diese dienen als Grundlage für die Planung und bieten die Möglichkeit, konfigurationsseitige Anforderungen, wie z. B. das notwendige Fertigungsverfahren, aufzunehmen. Die rechtzeitige Identifikation der Notwendigkeit von Rekonfigurationen soll durch eine hohe Transparenz hinsichtlich der Produktionaufträge, der Ressourcen und deren vorliegenden Konfigurationen sichergestellt werden. Daraus leitet sich die Anforderung ab, dass das Planungssystem sowohl den aktuellen Konfigurationszustand als auch die produktseitigen Anforderungen berücksichtigt. Darüber hinaus muss für eine rekonfigurationsorientierte Produktionsplanung das System in die Lage versetzt werden, die spezifischen Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme durchgängig zu berücksichtigen. Für die Realisierung der mit den angepassten Planungsdaten verbundenen Potenziale müssen insbesondere neue Planungsmethoden entwickelt werden. Hierfür muss eine Beschreibung für die Skalierbarkeit der Kapazi-

4 Anforderungen

tät (z. B. mittels Skalierungsfaktoren) als Basis für die Produktionsplanung erarbeitet und damit die Anpassungsfähigkeit im Kontext der Kapazitätsplanung beschreibbar gemacht werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden als Eingangsgrößen Produktionsprogramme (Produkte, Nachfrageszenarien, etc.) und Produktspezifikationen (Fertigungsverfahren, etc.) betrachtet. Die eigentliche Festlegung der notwendigen System- und Ressourcenkonfigurationen muss aufgrund der Vielzahl an Entscheidungsalternativen sukzessive in definierten Planungsschritten erfolgen. Hierfür ist eine geeignete Methode zur Produktionsplanung zu entwickeln.

Basierend auf den definierten Anforderungen an ein System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme, die in Tabelle 2 zusammenfassend dargestellt sind, werden im nachfolgenden Kapitel eine Systemübersicht, die einzelnen Elemente des Planungssystems sowie deren Funktionen vorgestellt.

Anforderungen
Adaptionsfähigkeit und Übertragbarkeit
Konfigurationsabhängige Beschreibung von Produktionssystemen
Zuordnung und Auswahl von Konfigurationen
Integration der Skalierbarkeit in die Produktionsplanung

Tabelle 2: Anforderungen an ein System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme

5 Systemübersicht

5.1 Überblick

In Kapitel 5 wird ein Überblick über das System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme gegeben. Die Elemente des Planungssystems sind in Abbildung 16 dargestellt. Auf Basis der Ausgangssituation und des in Kapitel 3 identifizierten Handlungsbedarfs, verfolgt das System zur Produktionsplanung das Ziel, die Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme im Kontext der Produktionsplanung nutzbar zu machen und diese durchgängig in die Planungsabläufe zu integrieren.

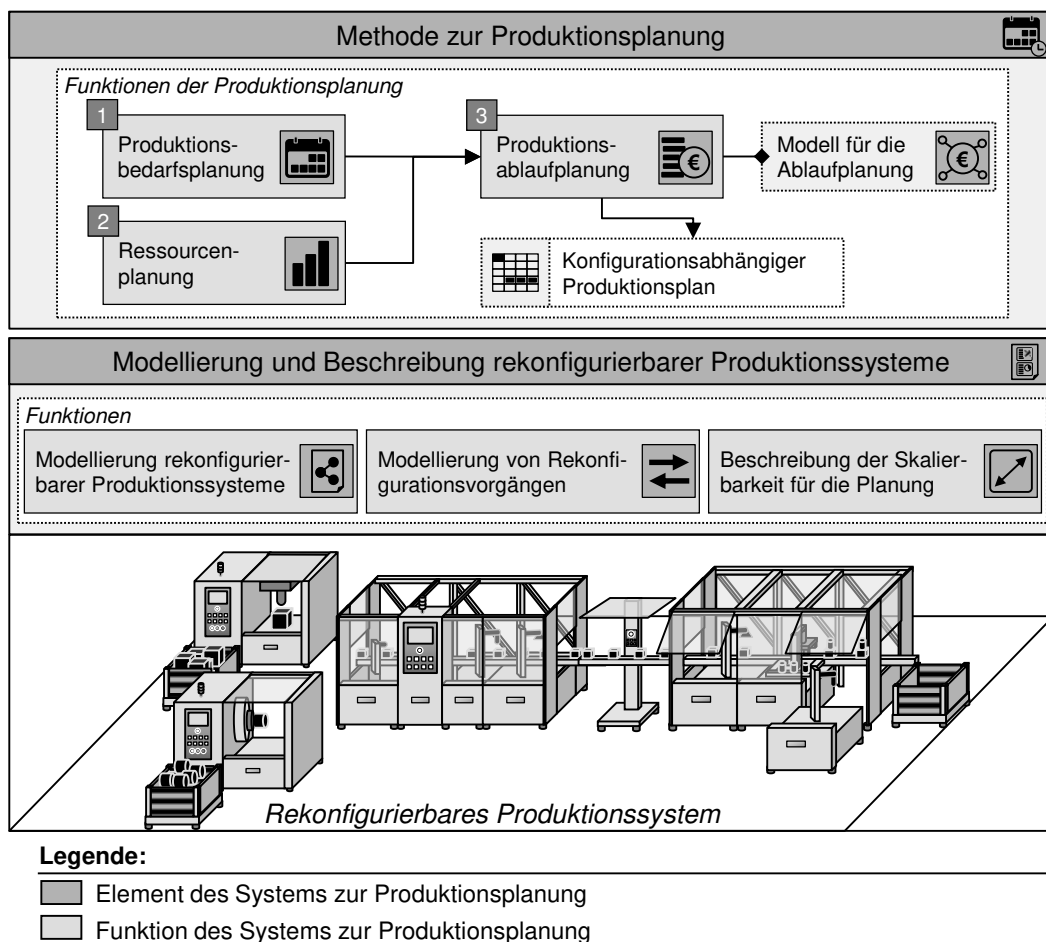


Abbildung 16: Überblick über das System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme

Das System zur Produktionsplanung besteht aus den Systemelementen der Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme sowie der

Methode zur Produktionsplanung. Die Systemelemente setzen sich zudem aus einzelnen Funktionen zusammen. Im nachfolgenden Abschnitt werden die jeweiligen Elemente des Systems sowie die Zusammenhänge im Groben beschrieben und in den weiterführenden Kapiteln 6 und 7 im Detail erläutert.

5.2 Systemelemente

Das Gesamtziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme. Dieses System soll die Produktionsplanung zum Umgang mit den spezifischen Eigenschaften rekonfigurierbarer Systeme befähigen. Dabei gilt es, die aktuellen Konfigurationen sowie notwendige Rekonfigurationen durchgehend in die Produktionsplanung zu integrieren und in den Planungsschritten der entsprechenden Funktionen zu berücksichtigen.

Das Systemelement der *Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme* hat die Aufgabe, die Eigenschaften dieser Systeme für die Produktionsplanung abzubilden. Um die Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme zu beschreiben und zu bewerten, werden zum einen eine hierarchische Strukturierung und zum anderen ein geeigneter Ansatz zur Modellierung des Systemverhaltens erarbeitet. Weiterhin wird bei der Modellierung die allgemeingültige Beschreibung von Ressourcenfähigkeiten und Produkthanforderungen in den Fokus der Betrachtungen gestellt. Eine wesentliche Aufgabe des ersten Systemelements ist zudem die Modellierung von Rekonfigurationsvorgängen. Hier gilt es, auf Basis eines Petri-Netz-basierten Modellierungsansatzes eine Beschreibung des Wechsels zwischen einzelnen Konfigurationen sowohl für die System- als auch für die Ressourcenebene zu entwickeln. Darüber hinaus sollen im Rahmen dieser Funktion die Änderungen der für die Produktionsplanung relevanten Informationen bei Durchführung einer Rekonfiguration aufgezeigt werden. Eine wesentliche Eigenschaft rekonfigurierbarer Produktionssysteme ist die anwendungsfallspezifische Skalierbarkeit ihrer Kapazität (vgl. Abschnitt 2.3.1). Die Beschreibung der Skalierbarkeit hat daher die Aufgabe, planungsspezifische Parameter für die Integration der Skalierbarkeit in die Produktionsplanung abzuleiten. Hier werden u. a. konfigurationsabhängige Bearbeitungs- und Durchlaufzeiten sowie deren Anwendung bei der Abbildung konfigurationsspezifischer Kapazitätsbelastungsprofile entwickelt.

Das zentrale Systemelement des Planungssystems bildet die *Methode zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme*, die auf den Funktionen der Modellierungs- und Beschreibungsansätze aufbaut. Die Methode zur Produktionsplanung unterteilt sich in die Produktionsbedarfs-, die Ressourcen- und die Produktionsablaufplanung, die die essentielle Funktion der Methode bildet. Die wesentlichen Parameter der Methode sind dabei die Konfigurationsalternativen des Produktionssystems, die produktseitigen Anforderungen sowie das periodenspezifische Produktionsprogramm.

In der *Produktionsbedarfsplanung* werden u. a. die Rahmenbedingungen, wie z. B. die Absatzplanung und die produktspezifischen Auftragsdaten adäquat aufgenommen. Damit wird die Grundlage zur nachfolgenden Generierung einer geeigneten Systemkonfiguration geschaffen. Weiterhin ist für die Auswahl der möglichen Konfigurationen zunächst eine Vorauswahl darüber zu treffen, welche Konfigurationen technologisch geeignet sind, die notwendigen Produktionsoperationen, die von den zu produzierenden Produkten gefordert werden, auszuführen. Hierfür wird eine Zuordnung von Ressourcenfähigkeiten und Auftragsanforderungen durch einen Technologieabgleich entwickelt, mit dem die möglichen und notwendigen Fertigungsverfahren abgeglichen werden. Für den Fall, dass keine Konfigurationen aus den Konfigurationsmöglichkeiten zur Erfüllung der technologischen Anforderungen geeignet sind, muss ein Verfahren zur Ermittlung des Rekonfigurationsbedarfs erarbeitet werden. Hierfür gilt es zudem, mögliche Maßnahmen zur Anpassung und Erweiterung der Konfigurationsmöglichkeiten bereitzustellen. Auf Basis der produktspezifischen Auftragsdaten sowie der möglichen Ressourcenkonfigurationen wird abschließend eine Darstellung der konfigurationsabhängigen Herstellungsprozesse generiert. Damit wird die Grundlage für die nachfolgenden Planungsschritte geschaffen.

Die Generierung der systemseitigen Konfigurationsalternativen steht in der *Ressourcenplanung* im Fokus der Betrachtungen. In einem ersten Schritt müssen hierfür die Produktionsressourcen mit den Ergebnissen der Produktionsbedarfsplanung spezifiziert werden. Darauf aufbauend gilt es, die systemseitigen und für die Ablaufplanung relevanten Konfigurationsalternativen mithilfe eines geeigneten Vorgehens zu generieren. Hier sollen insbesondere die Restriktionen des Produktionssystems in Bezug auf die Kombination unterschiedlicher Ressourcenkonfigurationen berücksichtigt werden. Abschließend sollen zudem Möglichkeiten für eine Kapazitätsabstimmung, die die Eigenschaft der Skalierbarkeit berücksichtigen kann, entwickelt werden.

5 Systemübersicht

Die *Produktionsablaufplanung* hat die Aufgabe, die Planungsergebnisse der vorherigen Planungsfunktionen zu detaillieren und aus allen verfügbaren die kostenminimale Konfiguration unter Beachtung der Restriktionen und dem zur Verfügung gestellten Produktionsprogramm für die jeweilige Planungsphase auszuwählen. Aufgrund der Vielzahl an Entscheidungsvariablen erfolgt für die Produktionsablaufplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme die Formulierung eines mathematischen Modells, das anschließend mit einem geeigneten Verfahren gelöst werden kann. Die Planungsergebnisse werden abschließend in einen Produktionsplan überführt.

6 Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme

6.1 Übersicht

Im vorliegenden Kapitel wird die Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme entwickelt, die die Abbildung konfigurationsabhängiger Eigenschaften dieser Systeme für die Produktionsplanung ermöglicht. Die Konfigurationen stellen Zustände des Systems bzw. der Produktionsressourcen dar, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Basis für die Planungsmethode zu verstehen sind. Auf den hierfür vorgesehenen Ansatz für die Modellierung wird in Abschnitt 6.2 eingegangen. Neben der generellen Strukturierung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen, ist in diesem Zusammenhang die Klassifikation der konfigurationsspezifischen Fähigkeiten relevant. In Abschnitt 6.3 erfolgt die Beschreibung von Rekonfigurationsvorgängen. Die für die Beschreibung der Skalierbarkeit notwendigen Mechanismen werden in Abschnitt 6.4 erläutert. Den Abschluss des Kapitels bildet ein Fazit in Abschnitt 6.5.

6.2 Modellierung rekonfigurierbarer Produktionssysteme

6.2.1 Allgemeines

Im Bereich der Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme wird in vielen Forschungsarbeiten die Berücksichtigung unterschiedlicher Konfigurationen vorgeschlagen (vgl. Abschnitt 3.2.2). Es hat sich gezeigt, dass sich unterschiedliche Modellierungs- und Strukturierungsansätze für unterschiedliche Anwendungsfälle eignen, bisher aber noch kein Ansatz für die Strukturierung nach technischen Gesichtspunkten (z. B. mögliche Fertigungsverfahren) und für eine durchgängige Produktionsplanung existieren. Die Abbildung und die Modellierung von Konfigurationen sowie Rekonfigurationen (vgl. Definition in Abschnitt 2.2.3) stellen somit den Ausgangspunkt für die konfigurationsabhängige Beschreibung von Produktionssystemen dar. Ausgehend von den dargestellten Potenzialen von Petri-Netzen zur Modellierung rekonfigurierbarer Produktionssysteme (vgl. Abschnitte 3.2.2 und 3.3.2) werden im nachfolgenden Abschnitt ein Petri-Netz-basierter Modellierungsansatz und eine Spezifikation der jeweiligen Ressourcenfähigkeiten entwickelt.

6.2.2 Grundlagen von Petri-Netzen

Petri-Netze sind Graphen, die aus Stellen, Transitionen, Kanten und Marken bestehen (PRIESE & WIMMER 2008). Die Grundelemente sind in Abbildung 17 dargestellt. Die *Stellen bzw. Zustände* (Z) eines Petri-Netzes repräsentieren passive Komponenten und stellen zusammen mit den Marken den aktuellen Zustand des Netzes dar. Weiterhin können sie durch ihre Kapazität die maximale Anzahl an Marken in der jeweiligen Stelle begrenzen. Dahingegen stellen *Transitionen* (T_R) die aktiven Komponenten dar, d. h. Ereignisse bzw. Aktivitäten. Grundsätzlich kann eine Transition geschaltet werden, wenn mindestens eine Marke in der davorliegenden Stelle vorhanden ist.

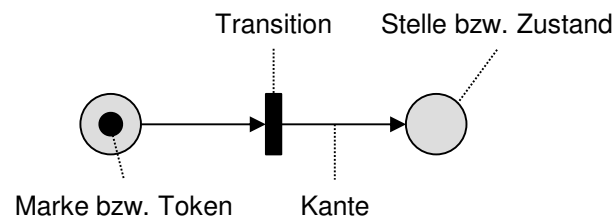


Abbildung 17: Elemente und Symbole eines Petri-Netzes

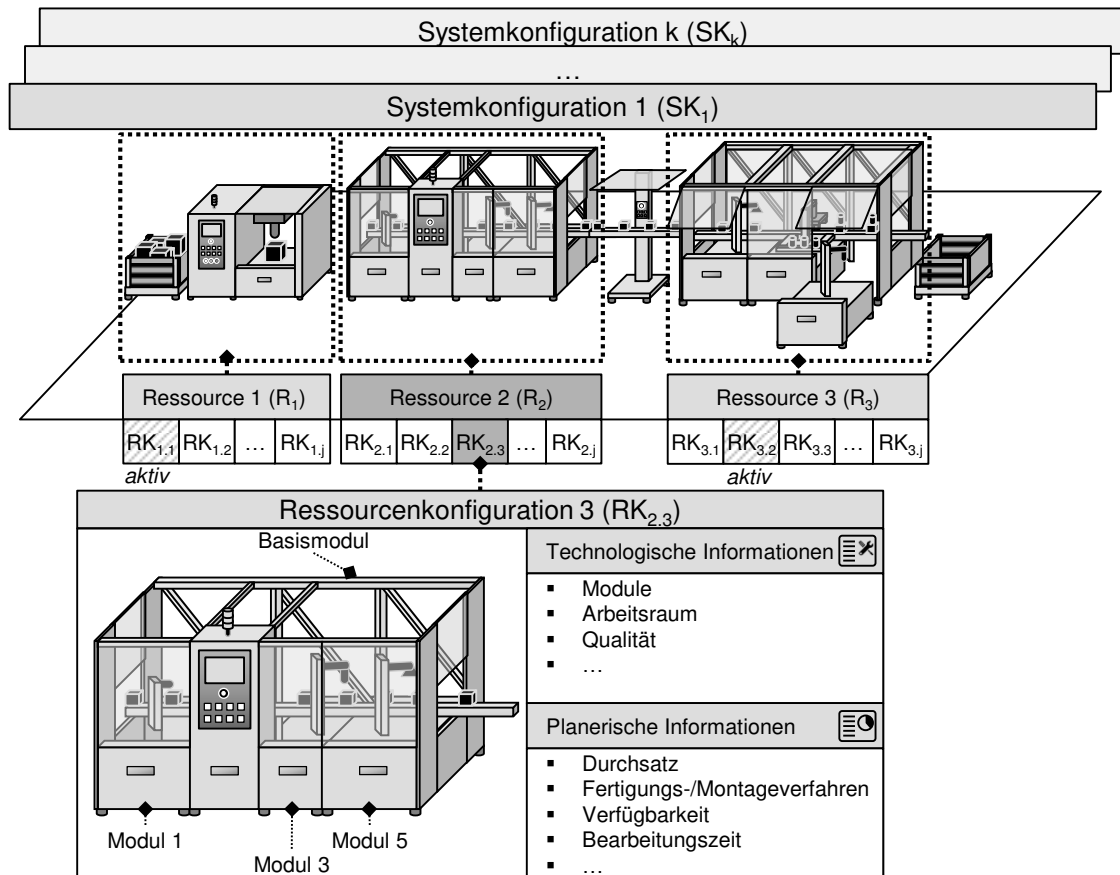
Die Verbindung zwischen Transitionen und Stellen wird durch *Kanten* (o, q) realisiert. Diese können mit einer Gewichtung versehen werden und visualisieren durch die Pfeilrichtung die Abfolge des Netzes. Sollte die *Gewichtung der Kante* (W) größer als eins sein, so müssen zur Schaltung der Transition die dem Kantengewicht entsprechenden Marken vorhanden sein (PRIESE & WIMMER 2008). Die Marken befinden sich bei Petri-Netzen auf den Stellen und ordnen diesen eine Menge an Eigenschaften zu. Gleichzeitig symbolisieren sie den Zustand des Systems (REISIG 2010). Zusammenfassend lässt sich ein Petri-Netz (PN) in Anlehnung an PRIESE & WIMMER (2008) wie folgt in Formel (1) beschreiben:

$$PN = (Z, T_R, o, q, W, s_0) \quad (1)$$

mit	Z	Menge der Stellen bzw. Zustände
	T_R	Menge der Transitionen
	o	Menge der Kanten von Stellen zu Transitionen
	q	Menge der Kanten von Transitionen zu Stellen
	W	Menge der Kantengewichte
	s_0	Anfangsbelegung des Netzes mit Marken

6.2.3 Strukturierung rekonfigurierbarer Produktionssysteme

Eine wichtige Voraussetzung für die Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme ist die Abbildung der Eigenschaften und des Verhaltens des Systems. Eine mögliche Strukturierung eines rekonfigurierbaren Produktionssystems, als Grundlage für die Produktionsplanung, ist in Abbildung 18 dargestellt.



Legende:

- SK_k : Systemkonfiguration k
 R_i : Produktionsressource i
 $RK_{i,j}$: Ressourcenkonfiguration j von Ressource i

Abbildung 18: Strukturierung eines rekonfigurierbaren Produktionssystems mithilfe von System- und Ressourcenkonfigurationen

Für eine konfigurationsabhängige Beschreibung von Produktionssystemen und -ressourcen wird eine Unterscheidung zwischen einer *Systemkonfiguration k* (SK_k) und einer *Ressourcenkonfiguration j der Ressource i* ($RK_{i,j}$) vorgenommen. Die Menge der bekannten System- und Ressourcenkonfigurationen wird in der vorliegenden Arbeit als *Konfigurationsbereich* (vgl. Abbildung 19) definiert.

6 Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme

Durch eine Rekonfiguration können sowohl der Wechsel zwischen den Konfigurationen als auch die Anpassung des Konfigurationsbereichs, z. B. durch Generierung einer neuen Konfiguration, erfolgen. Die physische *Systemkonfiguration* beinhaltet in Anlehnung an KOREN ET AL. (1999) die Verbindung einzelner Ressourcen zu einem Layout. Die Eigenschaften, die für die Produktionsplanung essentiell sind, werden durch die Eigenschaften der einzelnen Ressourcenkonfigurationen definiert. Beispielsweise bestimmt der Engpass den Produktionstakt des kompletten Produktionssystems.

Ferner stellt eine *Ressourcenkonfiguration* die Zusammensetzung einer Produktionsressource aus einem Basismodul und Produktionsmodulen dar. Durch Austauschen, Hinzufügen oder Entfernen einzelner Module kann die Ressource rekonfiguriert werden. Aus informationstechnischer Sicht werden die einzelnen Konfigurationen mit technologischen und planerischen Fähigkeiten beschrieben. Als *technologische Informationen* werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Struktur (z. B. mögliche Module) sowie die grundlegenden Eigenschaften der Ressource (z. B. Arbeitsraum, Qualität) verstanden. Die *planerischen Informationen* fassen die planungsrelevanten Parameter zusammen. Beispielsweise sind dies die Fertigungsverfahren auf Basis der DIN 8580 sowie die Montage- und Handhabungsprozesse nach der VDI-RICHTLINIE 2860. Darüber hinaus können z. B. konfigurationsabhängige Bearbeitungszeiten für die Produktionsplanung bereitgestellt werden. Mit der Abbildung von konfigurationsabhängigen Bearbeitungszeiten kann im Rahmen der Kapazitätsplanung neben den bisher bekannten Anpassungsmaßnahmen (vgl. Abschnitt 2.4.2) die Anpassung des Leistungspotenzials einer Produktionsressource berücksichtigt werden. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der einzelnen Ressourcenkonfigurationen beinhalten die planerischen Informationen des Weiteren Kennzahlen, wie beispielsweise den maximalen Durchsatz oder die Verfügbarkeit. Die Kennzahlen basieren vor dem Hintergrund einer breiten Akzeptanz auf dem VDMA-EINHEITSBLATT 66412-1. Durch dieses Vorgehen werden konfigurationsabhängige Beschreibungen einzelner Produktionsressourcen und damit auch von Produktionssystemen ermöglicht. Die planerischen Informationen ergeben sich auf der Systemebene durch die Aggregation der ressourcenspezifischen Eigenschaften. Beispielsweise kann aus den Bearbeitungszeiten und mithilfe einer Engpassanalyse die mögliche Ausbringungsmenge einer Systemkonfiguration berechnet werden.

Nachfolgend wird auf Basis der grundlegenden Strukturierung mithilfe von System- und Ressourcenkonfigurationen die konkrete Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme für die Produktionsplanung dargestellt.

6.2.4 Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme

Auf Basis des in HEES ET AL. (2016B) dargestellten Konzepts zur Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme wird in diesem Abschnitt ein geeigneter Modellierungs- und Beschreibungsansatz entwickelt. Hierfür kommt ein hierarchisches Petri-Netz für die Abbildung der Eigenschaften und des Systemverhaltens zur Anwendung (vgl. Abbildung 19).

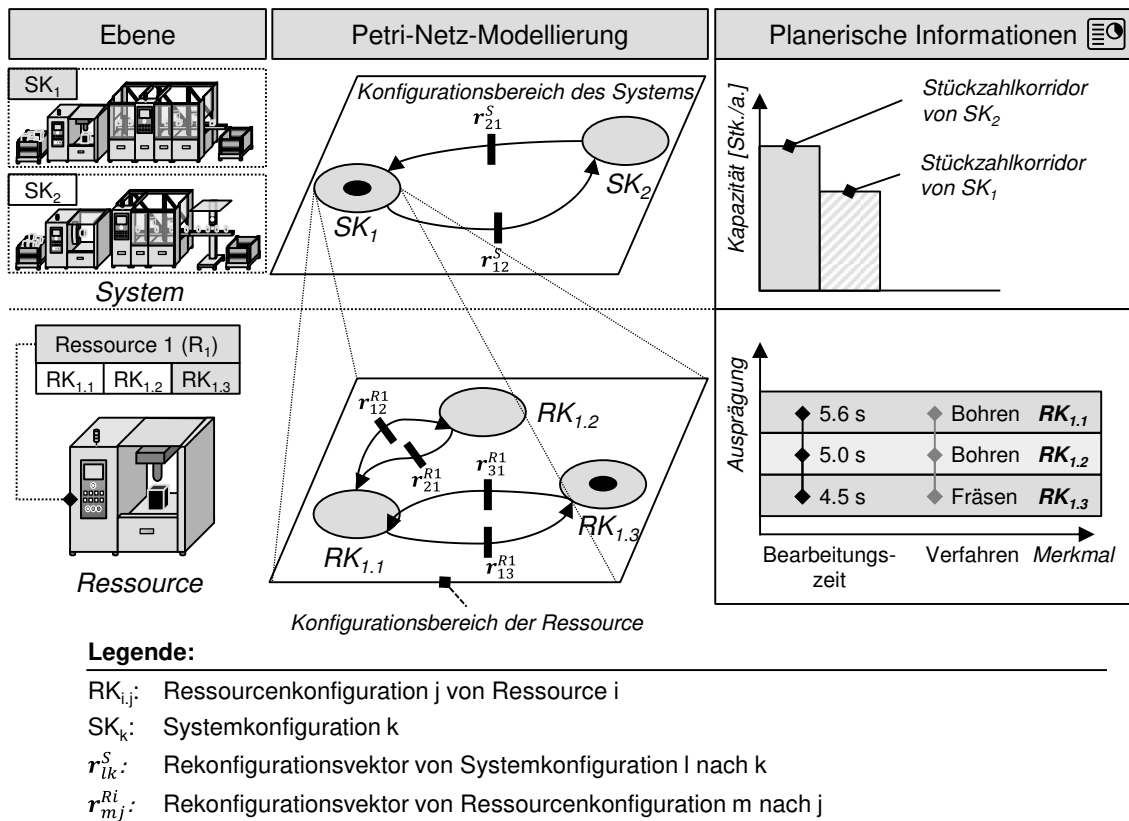


Abbildung 19: Beschreibung eines rekonfigurierbaren Produktionssystems mithilfe von Petri-Netzen

Für die Darstellung eines rekonfigurierbaren Produktionssystems lässt sich ein System-Konfigurationsnetz (KN^S) bestehend aus Systemkonfigurationen (SK_k), den Rekonfigurationsvektoren (r_{lk}^S) und dem aktuellen Zustand (Z^S) als Petri-Netz formulieren. Die mathematische Beschreibung findet sich in Formel (2). Hierbei repräsentiert K die Menge der möglichen Systemkonfigurationen und beinhaltet diese in einer vektoriiellen Darstellung. Für die Beschreibung einer Rekonfiguration von einer Systemkonfiguration l zu k wird der System-Rekonfigurationsvektor r_{lk}^S verwendet. Jede Systemkonfiguration, die im Zustandsvektor dargestellt ist, wird weiter als Stelle eines Petri-Netzes modelliert und repräsentiert einen definierten Zustand des System-Konfigurationsnetzes.

$$KN^S = (K, \mathbf{r}_{lk}^S, \mathbf{z}^S) \quad (2)$$

mit K Menge aller möglichen Systemkonfigurationen
 \mathbf{r}_{lk}^S Rekonfigurationsvektor von Systemkonfiguration l nach k
 \mathbf{z}^S Zustandsvektor des Systems

Der Zustandsvektor ermöglicht die Darstellung der aktiven Konfiguration aus dem Konfigurationsbereich. Liegt an der n -ten Stelle des Vektors eine eins vor, so ist die n -te Systemkonfiguration aktiv. Ein beispielhafter Zustandsvektor für das in Abbildung 19 dargestellte Beispiel mit zwei möglichen Systemkonfigurationen und der aktiven Konfiguration SK_1 ist in Formel (3) zu finden.

$$\mathbf{z}^S = \begin{pmatrix} SK_1 \\ SK_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Analog zu dem Vorgehen zur Formulierung eines System-Konfigurationsnetzes kann für eine Produktionsressource i ein *Ressourcen-Konfigurationsnetz* (KN_i^R) formuliert werden. Eine Darstellung in den Notationen von Petri-Netzen findet sich in Formel (4).

$$KN_i^R = (\mathbf{RK}_i, \mathbf{r}_{mj}^{Ri}, \mathbf{z}_i^R) \quad (4)$$

mit \mathbf{RK}_i Menge aller Ressourcenkonfigurationen von Ressource i
 \mathbf{r}_{mj}^{Ri} Rekonfigurationsvektor von Ressourcenkonfiguration m nach j
 \mathbf{z}_i^R Zustandsvektor der Produktionsressource i

Die Ressourcenkonfigurationen werden im Ressourcenkonfigurationsvektor (\mathbf{RK}_i) der Ressource i zusammengefasst. Des Weiteren zeigt der Zustandsvektor der Produktionsressource (\mathbf{z}_i^R) die aktuell vorliegende Ressourcenkonfiguration aus dem Konfigurationsbereich an. Für die Beschreibung der Rekonfigurationsvorgänge wird der ressourcenspezifische Rekonfigurationsvektor (\mathbf{r}_{mj}^{Ri}) herangezogen. Im Speziellen beschreiben die Vektoren den Übergang von einer Konfiguration zu einer anderen durch Verschiebung der Marke im Petri-Netz. Eine allgemeingültige Darstellung ist in Formel (5) dargestellt. Die Werte $r_{mj,n}^{Ri}$ der Vektoreinträge ergeben sich in Abhängigkeit der Gewichtung W der ein- bzw. abgehenden Kanten. Für die vorliegende Arbeit wird die Gewichtung auf eins festgelegt, da die Modellierung der Konfigurationszustände im Fokus der Betrachtungen steht. Sollte beispielsweise für eine aus drei Ressourcenkonfigurationen bestehende Ressource R_1 ein Wechsel von Konfiguration $RK_{1,1}$ nach $RK_{1,2}$ durchgeführt werden, so kann der Vektor \mathbf{r}_{12}^{R1} für das in Abbildung 20 dargestellte Beispiel formuliert werden. Die Ressource R_1 kann die Konfigurationen $RK_{1,1}$,

6.2 Modellierung rekonfigurierbarer Produktionssysteme

$RK_{1,2}$ und $RK_{1,3}$ annehmen. Des Weiteren zeigt der Zustandsvektor (\mathbf{Z}_1^R) von Ressource R_1 an, dass die Ressourcenkonfiguration $RK_{1,3}$ zum Betrachtungszeitpunkt vorliegt. Im beispielhaften Rekonfigurationsvektor \mathbf{r}_{12}^{R1} wird deutlich, dass bei einem Wechsel von Konfiguration $RK_{1,1}$ nach $RK_{1,2}$ die Marke an der Stelle $RK_{1,1}$ entfernt (dargestellt durch -1) und bei $RK_{1,2}$ hinzugefügt wird (symbolisiert durch 1), die Stelle $RK_{1,3}$ bleibt dabei unverändert (symbolisiert durch 0).

$$\mathbf{r}_{mj}^{Ri} = \begin{pmatrix} r_{mj,1}^{Ri} \\ \vdots \\ r_{mj,n}^{Ri} \end{pmatrix} \quad (5)$$

mit \mathbf{r}_{mj}^{Ri} Rekonfigurationsvektor von Ressourcenkonfiguration m nach j
 $r_{mj,n}^{Ri}$ Element des Rekonfigurationsvektors \mathbf{r}_{mj}^{Ri}

Das dargestellte Produktionssystem besteht zudem aus den zwei Systemkonfigurationen SK_1 und SK_2 . Die Position der Marke im Beispiel gibt an, dass sich das System zum Betrachtungszeitpunkt in SK_1 befindet. Mithilfe des entwickelten Modellierungsansatzes ist es möglich, das Verhalten eines rekonfigurierbaren Produktionssystems abzubilden. Sollten Rekonfigurationen durchgeführt werden, so sind die Änderungen der jeweiligen Zustände schnell und einfach abbildbar.

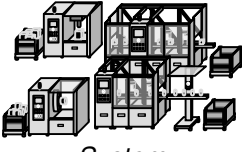
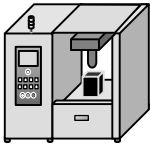
Petri-Netz-Notationen			
	System- bzw. Ressourcenvektoren	Zustandsvektoren	Rekonfigurationsvektoren
 System	$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} SK_1 \\ SK_2 \end{pmatrix}$	$\mathbf{z}^S = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\mathbf{r}_{12}^S = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$ $\mathbf{r}_{21}^S = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$
 Ressource 1	$\mathbf{RK}_1 = \begin{pmatrix} RK_{1,1} \\ RK_{1,2} \\ RK_{1,3} \end{pmatrix}$	$\mathbf{z}_1^R = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\mathbf{r}_{12}^{R1} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ $\mathbf{r}_{13}^{R1} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ \vdots
Legende:			
\mathbf{K} :	Menge aller Systemkonfigurationen	\mathbf{RK}_r :	Ressourcenkonfigurationsvektor
\mathbf{z}^S :	Zustandsvektor des Systems	\mathbf{z}_i^R :	Zustandsvektor der Ressource
\mathbf{r}_{ik}^S :	Rekonfigurationsvektor von Systemkonfiguration i nach k		
\mathbf{r}_{mj}^{Ri} :	Rekonfigurationsvektor von Ressourcenkonfiguration m nach j		

Abbildung 20: Darstellung der System- bzw. Ressourcenkonfigurationsvektoren, Zustandsvektoren und Rekonfigurationsvektoren

6.2.5 Abbildung und Klassifizierung von Auftragsanforderungen und Ressourcenfähigkeiten

Für die Abbildung und Klassifizierung der technologischen Anforderungen einzelner Arbeitsvorgänge und die Fähigkeiten der Ressourcenkonfigurationen wird nachfolgend ein Klassifikationsschema entwickelt. Systeme zur Klassifikation bieten den wesentlichen Vorteil der rechnergestützten Beschreibung und Darstellung der Eigenschaften einzelner Vorgänge (EVERSHEIM 2002). Des Weiteren ermöglichen sie einen großen Anwendungsbereich, gute Zugriffsmöglichkeiten und sind mit moderatem Beschreibungsaufwand realisierbar (EVERSHEIM 2002). Die Klassifikation von Auftragsanforderungen und Ressourcenfähigkeiten erfolgt für Arbeitsvorgänge und Ressourcenkonfigurationen auf Basis des von HEES ET AL. (2016A) vorgestellten Ansatzes. Ausgangsbasis des im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Klassifikationsschemas sind die Fertigungsverfahren nach der DIN 8580 sowie die Montage- und Handhabungsprozesse nach der VDI-RICHTLINIE 2860. Ein Auszug der Aufteilung von Fertigungsverfahren in Hauptgruppen, Gruppen und Untergruppen ist in Abbildung 21 exemplarisch anhand der Hauptgruppe 3 Trennen dargestellt.

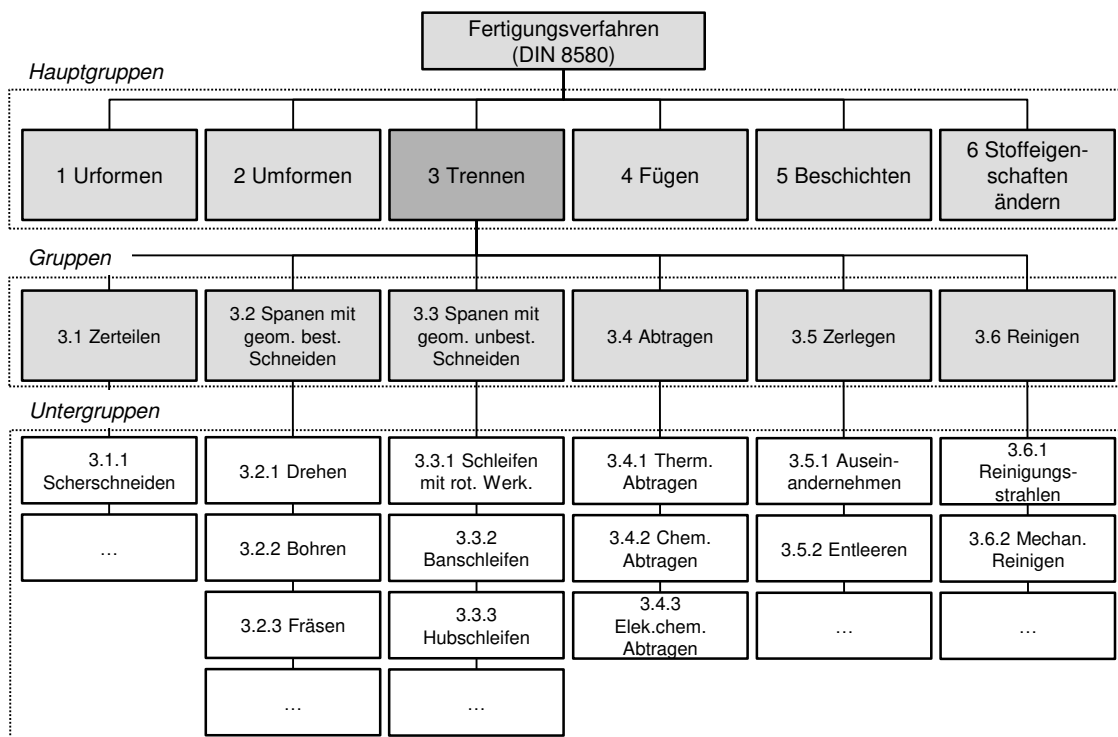


Abbildung 21: Einteilung von Fertigungsverfahren nach DIN 8580

Für die Handhabungs- und Montageprozesse wird eine eigene Nummerierung basierend auf der VDI-RICHTLINIE 2860 eingeführt (vgl. Abbildung 22). Die

Nummerierung unterteilt sich hierbei in die Montage- und Handhabungsprozesse Speichern, Mengen verändern, Bewegen, Sichern und Kontrollieren. Darüber hinaus sind weitere Unterteilungen der einzelnen Montageprozesse, wie z. B. in den Prozess Prüfen der Hauptgruppe Kontrollieren, möglich.

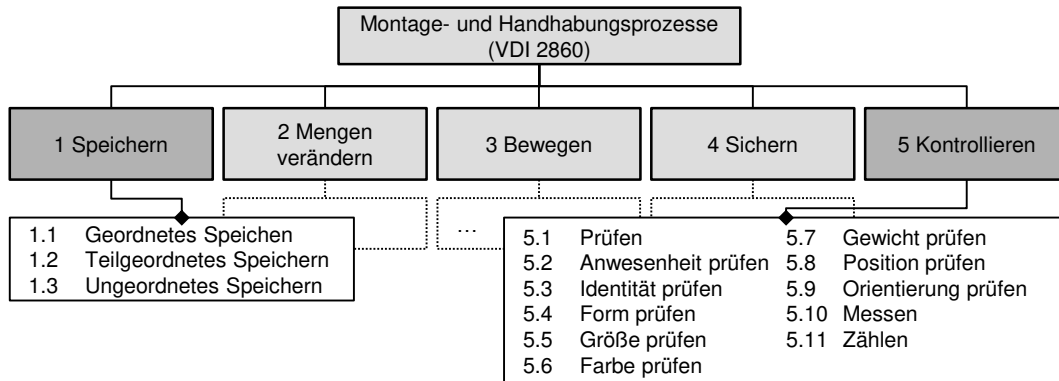


Abbildung 22: Nummerierung von Montage- und Handhabungsprozessen am Beispiel der Prozesse Speichern und Kontrollieren

Mithilfe der Einteilung und Beschreibung der Fertigungsverfahren und der Montageprozesse kann ein wesentlicher, für die Beschreibung von Fähigkeiten und Anforderungen produktionstechnisch relevanter Teil des Klassifikationsschemas abgedeckt werden. Die Nummerierungen der einzelnen Hauptgruppen, Gruppen, Untergruppen sowie Montageprozesse werden hierfür in das Klassifikationsschema überführt und ermöglichen den technologischen Abgleich von Anforderungen und Fähigkeiten. Abbildung 23 stellt das entwickelte Klassifikationsschema dar. Die *Klassifikationsnummer* setzt sich hierbei aus dem *Verfahren* und den *Technologiefaktoren* zusammen. Das *Verfahren* ermöglicht die Unterscheidung zwischen einem Fertigungs- (F) und einem Montageprozess (M). Als Kern des Klassifikationsschemas dient die Beschreibung der technologischen Informationen mit den sogenannten *Technologiefaktoren* ($TF_{j,n}^{Ri}$ bzw. $TF_{v,n}^{Aw}$). Diese basieren auf der Nummerierung der Fertigungs- und Montageprozesse. Mithilfe der ersten drei bzw. vier Ziffern kann der notwendige oder mögliche Prozess exakt über die Beschreibung in den korrespondierenden Normen definiert werden. Für die Beschreibung der Fähigkeiten bzw. Anforderungen in Bezug auf die Montageprozesse reichen für die genaue Beschreibung drei Stellen aus. Für die Fertigungsverfahren hingegen kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Unterteilung bis auf die vierte Untergruppe vorgenommen werden. Die Länge der maximal möglichen Nummerierung kann dabei durch die vorausgehende Klassifizierung der Art des Verfahrens indiziert werden. Um die Anforderungen an den Herstellungsprozess weiter spezifizieren zu können, besteht zudem die Möglich-

6 Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme

keit, an den nachfolgenden Stellen Informationen zur Gestalt des Werkstücks anzugeben. Mit dieser Spezifikation können im Planungsprozess z. B. die benötigten Werkzeuge und Arbeitsräume der Produktionsressourcen abgeleitet werden. Für das in Abbildung 23 dargestellte Beispiel ergibt sich für den Arbeitsvorgang das notwendige Fertigungsverfahren Formdrehen. Hierbei sind ein Durchmesser kleiner als 200 mm, eine Länge zwischen 400 mm und 600 mm sowie eine Rauigkeit kleiner gleich 50 μm gefordert.

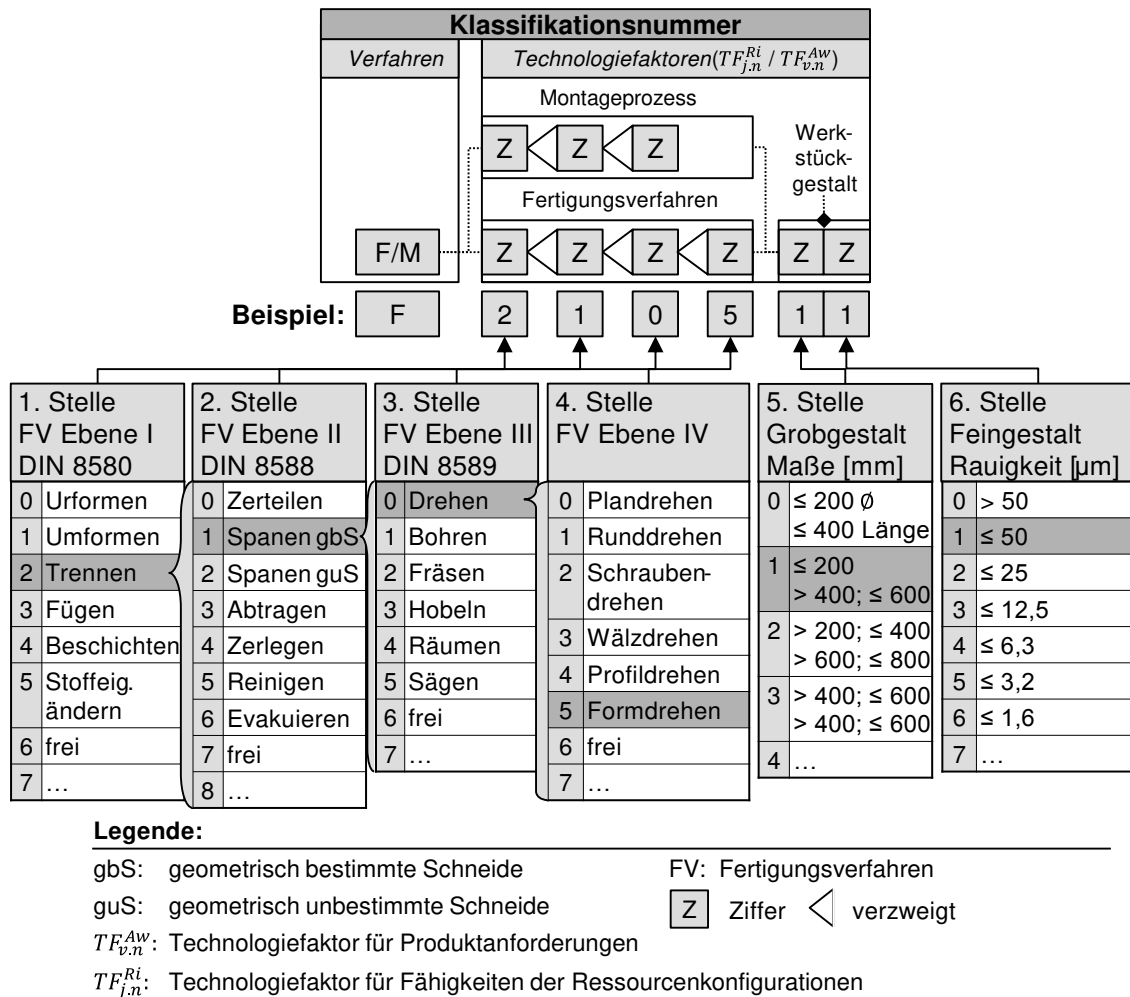


Abbildung 23: Klassifikationsschema zur Beschreibung von Arbeitsvorgängen und Ressourcenfähigkeiten (in Anlehnung an HEES ET AL. 2016A)

Mithilfe der im Klassifikationsschema abgebildeten Informationen ist es möglich, die Anforderungen von Arbeitsvorgängen an den Herstellungsprozess sowie die Fähigkeiten einzelner Ressourcenkonfigurationen hinsichtlich der technologischen Eigenschaften beschreibbar zu machen. Das Klassifikationsschema kann zudem anwendungsfallsspezifisch, beispielsweise um zusätzliche produktionssys-

temspezifische Faktoren, erweitert werden. Denkbar ist hier die Erweiterung der Anzahl an möglichen Stellen oder der Austausch einzelner Informationen an den definierten Stellen. Weiterhin können Bauteile, die in Bezug auf ihre Abmaße, Form oder Funktion ähnlich sind, mit diesem Schema zu Teilefamilien zusammengefasst werden. Darüber hinaus ist beispielsweise die Erstellung von Standardarbeitsplänen für eine schnelle und einfache Arbeitsplanung als Basis für die Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme anzudenken. Auf Basis der grundlegenden Strukturierung und Modellierung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen und -ressourcen mittels Konfigurationen erfolgt im nachfolgenden Abschnitt die Modellierung von Rekonfigurationsvorgängen.

6.3 Modellierung von Rekonfigurationsvorgängen

6.3.1 Allgemeines

Das Ziel der Modellierung von Rekonfigurationsvorgängen ist die Beschreibung und Abbildung des Wechsels zwischen den einzelnen Konfigurationen auf System- und Ressourcenebene. Die Konfigurationen befinden sich dabei innerhalb des bekannten Konfigurationsbereichs. Grundlegend wird eine Rekonfiguration als die Fähigkeit eines Systems oder einer Ressource verstanden, eine Änderung seiner Konfiguration vornehmen zu können (vgl. Abschnitt 2.2.3). Im Rahmen dieses Abschnitts werden die Rekonfigurationsvorgänge aufbauend auf dem in Abschnitt 6.2.4 dargestellten Petri-Netz-Ansatz in Abschnitt 6.3.2 detailliert beschrieben. Darüber hinaus werden die Bewertung des Rekonfigurationsaufwandes in Abschnitt 6.3.3 sowie die Abbildung der Aufwände in einer Rekonfigurationsmatrix in Abschnitt 6.3.4 in den Fokus der Betrachtungen gerückt.

6.3.2 Beschreibung von Rekonfigurationen

Im Allgemeinen wechselt bei Petri-Netzen die Marke bei Aktivierung einer Transition in die benachbarte Stelle. Bei rekonfigurierbaren Produktionssystemen erfolgt bei einem Rekonfigurationsvorgang die Übertragung der Marke von der vorherigen in die nachfolgende Konfiguration. Dabei wird die Transition zwischen beiden Konfigurationen aktiv und ändert den Zustandsvektor des Systems bzw. der Ressource durch Anwendung des entsprechenden Rekonfigurationsvektors (vgl. Abbildung 24). Mit dem Übergang der Marke in den neuen Zustand ändern sich die Eigenschaften des Systems bzw. der Ressource. Ausgehend von

6 Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme

einem initialen Zustandsvektor einer Ressource i ($\mathbf{Z}_{i,0}^R$) wird der Rekonfigurationsvorgang, d. h. der Übergang auf den Zustandsvektor nach der Rekonfiguration (\mathbf{Z}_i^R), durch den Rekonfigurationsvektor (\mathbf{r}_{mj}^{Ri}) in Formel (6) beschrieben. Der vorgestellte Beschreibungsansatz kann sowohl für die System- als auch für die Ressourcenebene angewandt werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die entsprechenden Rekonfigurationsvektoren eingesetzt werden.

$$\mathbf{Z}_i^R = \mathbf{Z}_{i,0}^R + \mathbf{r}_{mj}^{Ri} \quad (6)$$

mit \mathbf{Z}_i^R Zustandsvektor nach dem Rekonfigurationsvorgang
 $\mathbf{Z}_{i,0}^R$ Initialer Zustandsvektor vor dem Rekonfigurationsvorgang
 \mathbf{r}_{mj}^{Ri} Rekonfigurationsvektor von Ressourcenkonfiguration m nach j

Im dargestellten Beispiel befindet sich die Ressource R_1 vor dem Rekonfigurationsvorgang in der Ressourcenkonfiguration $RK_{1,3}$ und kann mit einer Bearbeitungszeit von 4,5 s und einer Verfügbarkeit von 99 % einen Durchsatz von 250 Stück pro Tag realisieren. Der initiale Konfigurationszustand der Ressource vor dem Rekonfigurationsvorgang wird durch den Vektor ($\mathbf{Z}_{1,0}^R$) beschrieben.

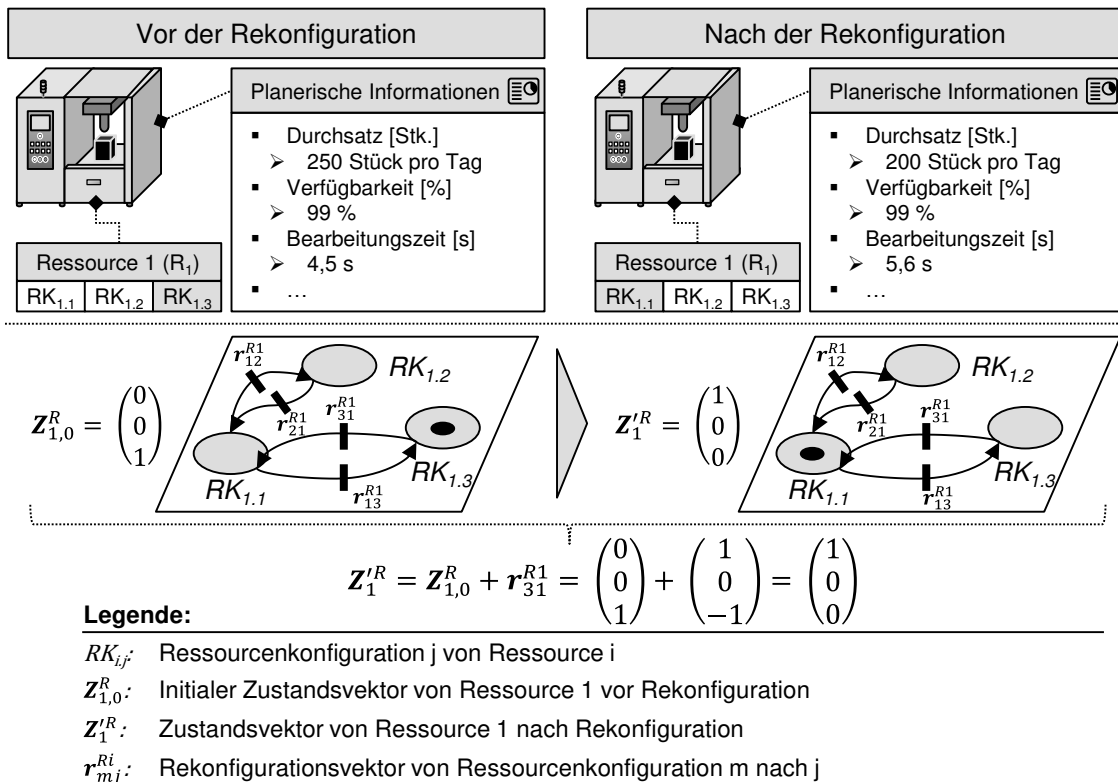


Abbildung 24: Beispielhafte Modellierung eines Rekonfigurationsvorgangs

Wird eine Rekonfiguration, z. B. aufgrund einer geringeren Nachfrage, von $RK_{1,3}$ zu $RK_{1,1}$ durchgeführt, wandert die Marke in die entsprechende Konfiguration. Beim dargestellten Rekonfigurationsvorgang wird der Rekonfigurationsvektor r_{31}^{R1} aktiv und überführt den Zustandsvektor der Anfangskonfiguration $Z_{1,0}^R$ in den Zustandsvektor Z_1^R . Auf der informationstechnischen Sicht findet des Weiteren eine Anpassung der planerischen Informationen statt. Beispielsweise wird die Bearbeitungszeit einer einzelnen Ressource von 4,5 s auf 5,6 s angepasst und der Durchsatz auf 200 Stück pro Tag reduziert. Das Ergebnis des Modellierungsansatzes ist die Abbildung und mathematische Beschreibung von Rekonfigurationsvorgängen sowohl auf System- als auch auf Ressourcenebene. Dieser Ansatz wird nachfolgend um eine Bewertung des Rekonfigurationsaufwandes, welche in Abschnitt 6.3.3 dargestellt ist, erweitert.

6.3.3 Bewertung von Rekonfigurationsaufwänden

Rekonfigurationen können sowohl auf System- als auch Ressourcenebene vorgenommen werden und sind mit einem zeitlichen und kostentechnischen Aufwand verbunden. Für die Bewertung des Rekonfigurationsaufwandes, aus dem für die Produktionsplanung Rekonfigurationskosten und -zeiten abgeleitet werden, wird der von YOUSSEF & ELMARAGHY (2006A) beschriebene Index „reconfiguration smoothness“ adaptiert. Der Index ermöglicht die Beschreibung einer Rekonfiguration mithilfe von gewichteten Verhältnissen von hinzugefügten sowie entfernten Elementen eines rekonfigurierbaren Produktionssystems. Betrachtungsfokus sind dabei die Markt-, die System- und die Ressourcenebene. Des Weiteren ist der Beschreibungsindex auf einen Bereich von 0 bis 1 festgelegt. Je höher der Smoothness-Index einer Konfiguration ist, desto höher ist der Aufwand diese ausgehend von der vorliegenden Konfiguration umzusetzen (YOUSSEF & ELMARAGHY 2006A). Der Vorteil des Index besteht vor allem darin, dass er unterschiedliche Bewertungsgrößen zusammenfasst und damit die Rekonfigurationsaufwände vergleichbar macht.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Rekonfigurationsaufwände sowohl für die System- als auch für die Ressourcenebene betrachtet. Des Weiteren werden die jeweiligen Berechnungen von YOUSSEF & ELMARAGHY (2006A) vereinfacht. Ausgangsbasis der Betrachtungen ist ein bestehendes Produktionssystem. Die Berechnung des Rekonfigurationsaufwandes für ein Produktionssystem (A^S) ist in Formel (7) dargestellt und ergibt sich aus der Summe der einzelnen Rekonfigurationsaufwände für die vorhandenen Produktionsressourcen (A_{mj}^{Ri}). Im Speziellen werden hierbei die Aufwände der Ressourcen für die Anpassung der je-

6 Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme

weiligen Module, d. h. die Rekonfigurationsvorgänge von Ressourcenkonfiguration m nach j , betrachtet.

$$A^S = \sum_{i=1}^{i^{max}} A_{mj}^{Ri} \quad (7)$$

mit A^S Rekonfigurationsaufwand auf der Systemebene
 A_{mj}^{Ri} Rekonfigurationsaufwand für den Wechsel von Konfiguration m nach j bei Produktionsressource i
 i Laufvariable für die Produktionsressourcen

Die Berechnung des Rekonfigurationsaufwandes für den Wechsel von einer Ressourcenkonfiguration m nach j für die Produktionsressource i (A_{mj}^{Ri}) ist in Formel (8) im Detail dargestellt. Der Wertebereich erstreckt sich von null bis eins. Bei der Berechnung fließen die hinzugefügten und entfernten Produktionsmodule der Produktionsressource ein. Als Bemessungsgrundlage gilt die maximale Anzahl an möglichen Modulen in der jeweiligen Ressource. Grundsätzlich ist der Anpassungsaufwand für das Hinzufügen von einzelnen Modulen aufwändiger als das Entfernen dieser. Dieser Zusammenhang wird durch einen entsprechenden Gewichtungsfaktor (σ_{RK}) in der Berechnungsvorschrift abgebildet. Für diesen Faktor werden infolgedessen Werte größer als 0,5 empfohlen (vgl. YOUSSEF & ELMARAGHY 2006A).

$$A_{mj}^{Ri} = \sigma_{RK} \cdot \frac{n_i^{M,hin}}{n_i^{M,ges}} + (1 - \sigma_{RK}) \cdot \frac{n_i^{M,ent}}{n_i^{M,ges}} \quad (8)$$

mit A_{mj}^{Ri} Aufwand für den Wechsel von Konfiguration m nach j
 $n_i^{M,ges}$ max. Gesamtzahl an Modulen in der Ressource i
 $n_i^{M,hin}$ Anzahl an hinzugefügten Modulen in der Ressource i
 $n_i^{M,ent}$ Anzahl an entfernten Modulen in der Ressource i
 σ_{RK} Gewichtungsfaktor mit $0,5 > \sigma_{RK} < 1$
 i Laufvariable für die Produktionsressourcen

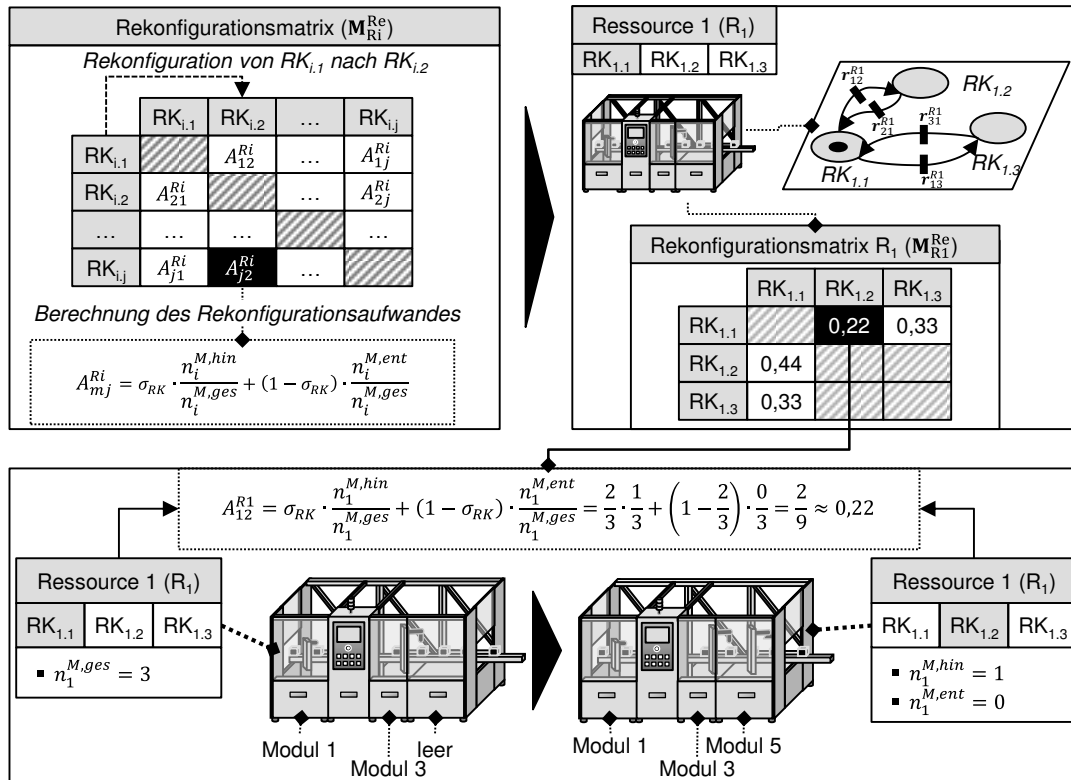
Die Berechnung der Rekonfigurationsaufwände für ein Produktionssystem mithilfe der einzelnen Rekonfigurationsvorgänge der Produktionsressourcen dient als essentielle Basis für die Berücksichtigung von Rekonfigurationen in der Produktionsplanung. Im nachfolgenden Abschnitt werden die Abbildung der einzelnen Aufwände in einer Matrix sowie die daraus resultierende Integration in eine geeignete Methode zur Produktionsplanung aufgezeigt.

6.3.4 Abbildung der Rekonfigurationsaufwände in einer Rekonfigurationsmatrix

Um das Ziel einer Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme zu erreichen, wird auf Basis der dargestellten Vorgehensweise zur Bewertung des Rekonfigurationsaufwandes eine Rekonfigurationsmatrix (M_{Ri}^{Re}) eingeführt. In dieser Matrix können die Aufwände für Rekonfigurationen der jeweiligen Produktionsressourcen abgebildet und somit im Rahmen der Methode zur Produktionsplanung berücksichtigt werden. Voraussetzung für den Einsatz der Matrix im Rahmen der Produktionsplanung ist die Bewertung des Rekonfigurationsaufwandes der möglichen Konfigurationsalternativen auf der Ressourcenebene. Der Aufbau der Rekonfigurationsmatrix sowie eine beispielhafte Anwendung auf Basis der Petri-Netz-Modellierung (vgl. Abschnitt 6.2.4) ist in Abbildung 25 aufgezeigt. Da die Aufwände für hinzugefügte und entfernte Module differenziert bewertet werden, ist die Matrix nicht symmetrisch. Die Abbildung der Rekonfigurationsaufwände erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit primär auf der Ressourcenebene. Die einzelnen Zellen der Matrix enthalten den mit Formel (8) berechneten Rekonfigurationsaufwand auf der Ressourcenebene, der für einen Rekonfigurationsvorgang von einer Konfiguration m nach j notwendig ist.

Das Beispiel in Abbildung 25 zeigt die Ressourcenkonfigurationen $RK_{1,1}$, $RK_{1,2}$ und $RK_{1,3}$ als mögliche Zustände für die Ressource R_1 . Ein direkter Übergang zwischen den Konfigurationen $RK_{1,2}$ und $RK_{1,3}$ ist nicht vorgesehen. Die jeweiligen Zellen der Rekonfigurationsmatrix enthalten dementsprechend keinen Eintrag. Für die weiteren Werte der Zellen wurde jeweils der entsprechende Rekonfigurationsaufwand berechnet. Im Beispiel wird ein Rekonfigurationsvorgang von Ressourcenkonfiguration $RK_{1,1}$ nach $RK_{1,2}$ von Ressource 1 durchgeführt. Für diesen Vorgang wird der Produktionsressource ein Produktionsmodul hinzugefügt. Die Gesamtanzahl an maximal möglichen Produktionsmodulen beträgt drei. Infolgedessen beträgt der Rekonfigurationsaufwand A_{12}^{R1} für diesen Rekonfigurationsvorgang etwa 0,22. Die Zusammenfassung der Rekonfigurationsaufwände in einer Matrix bildet die Grundlage für die Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme, da somit unterschiedliche Zustände des Produktionssystems und der -ressourcen abgebildet werden können. Im Rahmen der Methode zur Produktionsplanung kann die hier aufgezeigte Rekonfigurationsmatrix des Weiteren für die Ableitung von Rekonfigurationskosten und -zeiten verwendet werden (vgl. HEES ET AL. 2015).

6 Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme



Legende:

- M_{Ri}^{Re} : Rekonfigurationsmatrix von Ressource i
- $RK_{i,j}$: Ressourcenkonfiguration j von Ressource i
- A_{mj}^{Ri} : Aufwand für den Wechsel von Konfiguration m nach j bei Ressource i
- $n_i^{M,ges}$: max. Gesamtzahl an möglichen Modulen in der Ressource i
- $n_i^{M,hin}$: Anzahl an hinzugefügten Modulen in der Ressource i
- $n_i^{M,ent}$: Anzahl an entfernten Modulen in der Ressource i
- i: Laufvariable für die Produktionsressourcen

Abbildung 25: Darstellung des Rekonfigurationsaufwandes für eine Produktionsressource mithilfe der Rekonfigurationsmatrix

Die in diesem Abschnitt entwickelten Ansätze zur Abbildung und Beschreibung von Rekonfigurationsvorgängen mithilfe von Petri-Netzen, der Berechnung von Rekonfigurationsaufwänden sowie der Rekonfigurationsmatrix stellen eine adäquate Grundlage für die Anwendung der Konzepte und Prinzipien im Rahmen der Methode zur Produktionsplanung dar.

6.4 Beschreibung der Skalierbarkeit für die Produktionsplanung

6.4.1 Allgemeines

Eine wesentliche Eigenschaft, die es insbesondere im Rahmen der Produktionsplanung zu nutzen gilt, ist die Skalierbarkeit der Kapazität rekonfigurierbarer Produktionssysteme. In den nachfolgenden Abschnitten werden auf Basis einer konfigurationsabhängigen Berechnung von Ausführungszeiten sowie den daraus resultierenden Durchlaufzeiten adäquate Möglichkeiten zur Beschreibung der Skalierung von Produktionskapazitäten entwickelt. Des Weiteren werden die hierfür notwendigen Skalierungsfaktoren abgeleitet. Auf dieser Basis lässt sich die beschriebene Skalierbarkeit der Kapazität von rekonfigurierbaren Produktionssystemen in die Produktionsplanung integrieren.

6.4.2 Beschreibung konfigurationsabhängiger Bearbeitungszeiten

Im Allgemeinen werden für die Aufgaben der Produktionsplanung, z. B. für die Termin- und Kapazitätsplanung, Vorgabezeiten verwendet. Diese beinhalten den zeitlichen Aufwand zur Ausführung einer Tätigkeit entweder durch den Menschen oder durch ein Betriebsmittel (WIENDAHL 2010). Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit insbesondere Produktionssysteme sowie die hierfür notwendige Produktionsplanung im Fokus der Betrachtungen stehen, werden lediglich Belegungs- bzw. Bearbeitungszeiten betrachtet. Die Zusammensetzung und die Bestandteile der *konfigurationsabhängigen Bearbeitungszeit* (t_{ij}^b) sind in Abbildung 26 dargestellt. Sollte es sich bei der Produktionsressource um den Engpass des Systems handeln, so ist die konfigurationsabhängige Bearbeitungszeit gleich der *systemspezifischen Taktzeit* (t_k) in der jeweiligen Systemkonfiguration k . Für die Beschreibung der Ressourcenkonfigurationen werden die von Produktionsmengen unabhängigen Bestandteile der Belegungszeit genauer betrachtet. Die *Rüstzeit* (t_r) wird für die vorliegende Arbeit als konfigurationsunabhängig angesehen, da sie generelle Tätigkeiten zur Vorbereitung der Durchführung einer Arbeitstätigkeit beinhalten, wie z. B. die Einstellung eines Werkzeugs (WIENDAHL 2010). Des Weiteren umfasst die *Grundzeit* (t_g) alle zeitlichen Aufwände zur Ausführung der Arbeitsaufgabe (WIENDAHL 2010). Hierbei zeigt sich, dass die *Hauptzeit* (t_h) den wesentlichen konfigurationsabhängigen Bestandteil bildet. Dieser Anteil an der Grundzeit wird maßgeblich durch das von den Ressourcenkonfigurationen bereitgestellte Leistungspotenzial beeinflusst.

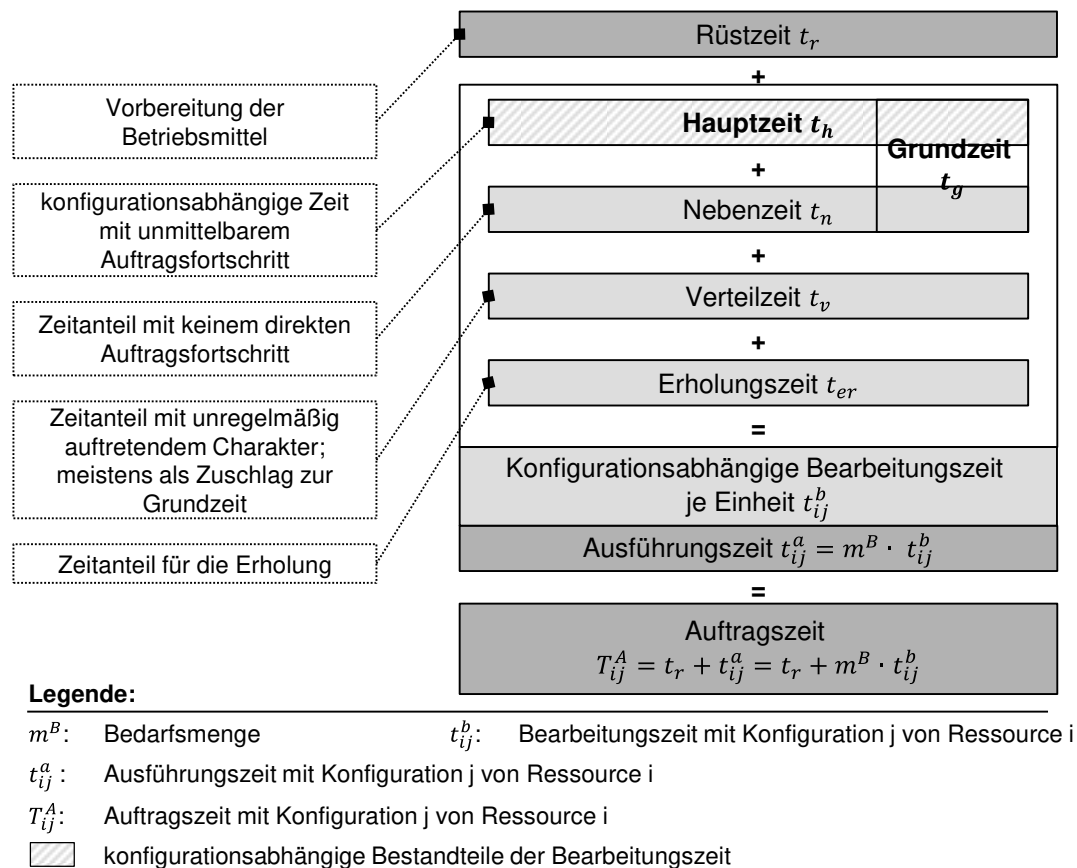


Abbildung 26: Bestandteile der konfigurationsabhängigen Bearbeitungszeit (in Anlehnung an WIENDAHL 2010)

Als weiterer konfigurationsunabhängiger Bestandteil der Bearbeitungszeit stellt die *Verteilzeit* (t_v) Zeitanteile dar, bestehend aus allgemeinen Zuschlägen zur Grundzeit (WIENDAHL 2010). Darüber hinaus kann zur Berechnung der Bearbeitungszeit noch eine sogenannte *Erholzeit* (t_{er}) berücksichtigt werden. Für die Berechnung der *Ausführungszeit* (t_{ij}^a) eines Arbeitsvorgangs wird anschließend die zu produzierende Menge mit der konfigurationsabhängigen Bearbeitungszeit multipliziert. Die Summe aus der Rüst- und Ausführungszeit ergibt die komplette *Auftragszeit* (T_{ij}^A). Da insbesondere die Bearbeitungszeiten durch technologische Anpassungen beeinflusst werden können (WIENDAHL 2010), sind diese Bearbeitungszeiten konfigurationsabhängig in der Produktionsplanung zu integrieren. Des Weiteren können mithilfe der konfigurationsabhängigen Bearbeitungszeiten als zusätzliche Planungsinformationen die Durchlaufzeiten skaliert werden (vgl. Abbildung 27). Als Durchlaufzeit (DLZ) wird die Zeitdauer von der Auftragsfreigabe bis zum Bearbeitungsende verstanden (WIENDAHL 2010). Die Bestandteile der Durchlaufzeit sind hierbei: Liegen vor und nach der Bearbeitung, Transport, Rüsten und Bearbeiten (WIENDAHL 2010). In der vorliegenden Arbeit erge-

6.4 Beschreibung der Skalierbarkeit für die Produktionsplanung

ben sich die Durchlaufzeit-Anteile für einzelne Arbeitsvorgänge in Abhängigkeit der vorliegenden Konfiguration aus dem Konfigurationsbereich der Produktionsressource. Des Weiteren sind lediglich die Skalierungsmöglichkeiten der Bearbeitungszeit für den Anteil der Durchführungszeit (ZDF) relevant, die sich auf die Enden der Bearbeitung und somit auf die gesamte Durchlaufzeit auswirken. Diese konfigurationsabhängigen Bearbeitungszeiten resultieren schließlich in unterschiedlichen Durchlaufzeiten ($DLZ_{RK_{i,j}}$). Die weiteren Zeitanteile werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet.

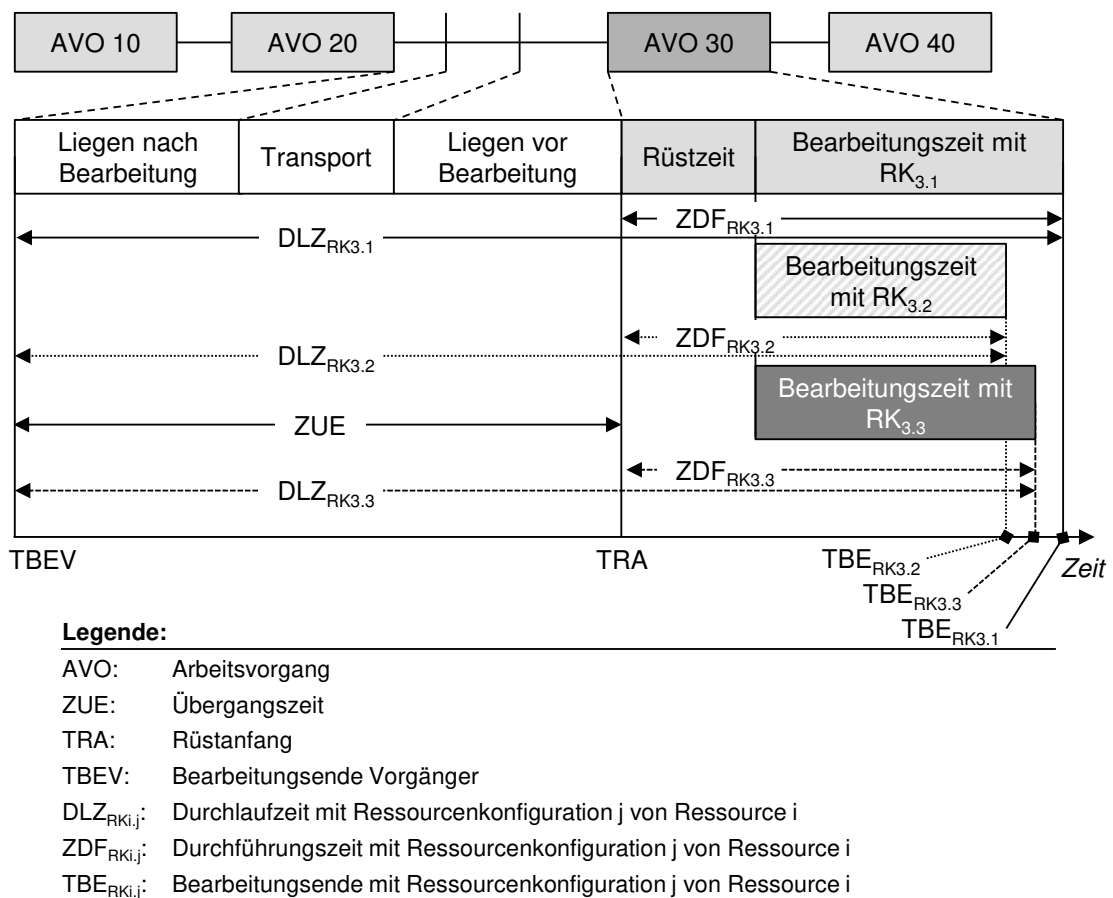
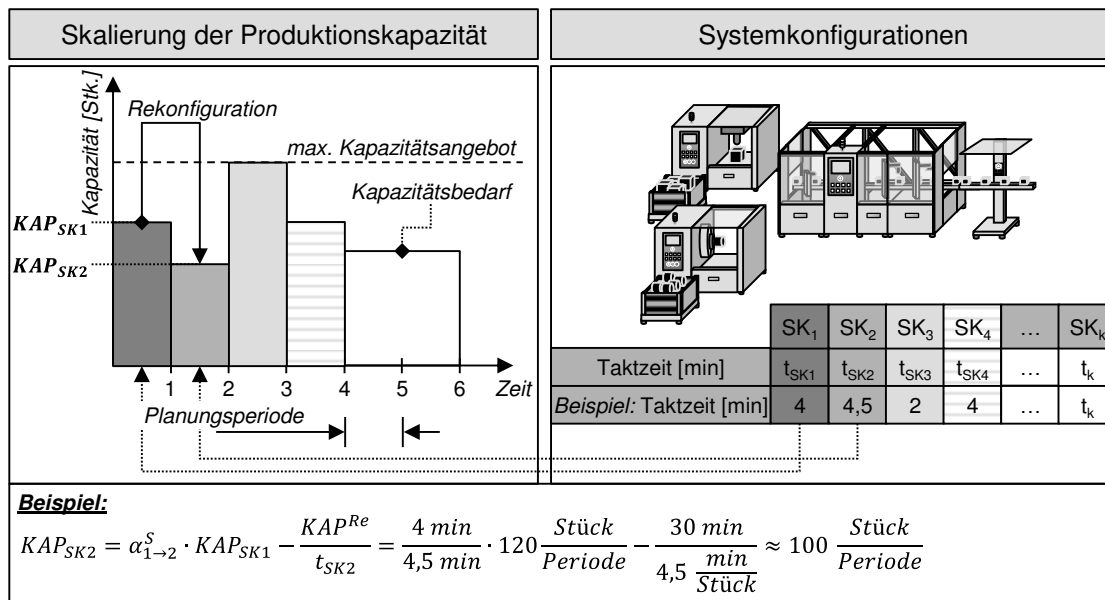


Abbildung 27: DLZ-Anteile in Abhängigkeit der vorliegenden Ressourcenkonfiguration (in Anlehnung an WIENDAHL 2010)

Im vorliegenden Abschnitt ist die Zusammensetzung einer konfigurationsabhängigen Bearbeitungszeit aufgezeigt, die die Grundlage für die Methode zur Produktionsplanung und die Integration der Skalierbarkeit in diese bildet. Des Weiteren wird der Einfluss konfigurationsabhängiger Zeiten auf die Durchlaufzeit-Anteile sowie auf das Ende der Bearbeitungsvorgänge ersichtlich. Diese Grundlagen werden im Rahmen des nachfolgenden Abschnitts zur Beschreibung der Skalierbarkeit der Kapazitäten verwendet.

6.4.3 Beschreibung skalierbarer Produktionskapazitäten

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird für die Skalierbarkeit rekonfigurierbarer Produktionssysteme die Produktionskapazität in den Fokus gestellt. Das mengenmäßige Kapazitätsangebot, das vom Produktionssystem bereitgestellt werden kann, ist dabei von der Taktzeit der Systemkonfiguration abhängig. Durch Rekonfigurationsvorgänge kann eine Anpassung der Taktzeiten und somit auch eine Skalierung der Kapazitätsangebote vorgenommen werden. Das maximale Kapazitätsangebot definiert sich dabei durch die schnellste Konfiguration und die zur Verfügung stehende Arbeitszeit. Mithilfe der Skalierung kann eine Synchronisation zwischen Kapazitätsangebot und -bedarf realisiert werden. Abbildung 28 veranschaulicht diesen Zusammenhang und zeigt zudem beispielhaft die Berechnung des Kapazitätsangebots nach einer Rekonfiguration auf.



Legende:

- SK_k: Systemkonfiguration k
- t_k: Taktzeit mit Systemkonfiguration k
- KAP_{SK1/2}: Kapazitätsangebot (Menge) mit Systemkonfiguration 1 bzw. 2
- α_{1→2}^S: Skalierungsfaktor für den Wechsel von Systemkonfiguration 1 nach 2
- KAP^{Re}: Kapazitätsbedarf (Zeit) für die Rekonfigurationsvorgänge

Abbildung 28: Skalierung der Produktionskapazitäten mithilfe von konfigurationsspezifischen Taktzeiten

Für eine mathematische Beschreibung des Skalierungsvorgangs hinsichtlich der Kapazität wird ein konfigurationsspezifischer Skalierungsfaktor ($\alpha_{l \rightarrow k}^S$) eingeführt. Dieser Faktor berechnet sich aus dem Verhältnis der konfigurationsspezifischen Systemtaktzeit vor und nach einer Rekonfiguration (vgl. Formel (9)).

$$\alpha_{l \rightarrow k}^S = \frac{t_l}{t_k} \quad (9)$$

mit	$\alpha_{l \rightarrow k}^S$	konfigurationsspezifischer Skalierungsfaktor
	t_l	Taktzeit mit Systemkonfiguration l vor Rekonfiguration
	t_k	Taktzeit mit Systemkonfiguration k nach Rekonfiguration

Ausgehend von einem konfigurationsspezifischen Kapazitätsangebot (KAP_l) und dem zeitlichen Kapazitätsbedarf für die Rekonfigurationsvorgänge (KAP^{Re}) lässt sich das resultierende Kapazitätsangebot mit der Systemkonfiguration k (KAP_k) anhand der Formel (10) beschreiben. Im Speziellen wird die Veränderung der Produktionskapazität durch eine Rekonfiguration mithilfe des oben genannten Skalierungsfaktors beschrieben. Des Weiteren ist die Berechnung des Kapazitätsverlusts durch den Rekonfigurationsvorgang in Formel (11) dargestellt.

$$KAP_k = \alpha_{l \rightarrow k}^S \cdot KAP_l - \frac{KAP^{Re}}{t_k} \quad (10)$$

mit	KAP_k	Kapazitätsangebot (Menge) mit Systemkonfiguration k
	KAP_l	Kapazitätsangebot (Menge) mit Systemkonfiguration l
	KAP^{Re}	Kapazitätsbedarf (Zeit) für die Rekonfigurationsvorgänge
	$\alpha_{l \rightarrow k}^S$	konfigurationsspezifischer Skalierungsfaktor
	t_k	Taktzeit mit Systemkonfiguration k nach Rekonfiguration

$$KAP^{Re} = t_{kl}^{Re} = \sum_{i=1}^{i^{max}} \alpha_t \cdot A_{mj}^{Ri} \quad (11)$$

mit	KAP^{Re}	Kapazitätsbedarf (Zeit) für die Rekonfigurationsvorgänge
	t_{kl}^{Re}	Rekonfigurationszeit von Systemkonfiguration k nach l
	A_{mj}^{Ri}	Rekonfigurationsaufwand für den Wechsel von Ressourcenkonfiguration m nach j von Ressource i
	α_t	erfahrungswertbasierter Zeitfaktor

Der zeitliche Kapazitätsbedarf für die Rekonfigurationsvorgänge wird mithilfe der Rekonfigurationsaufwände für die einzelnen Produktionsressourcen berechnet. Hierbei werden die Aufwände für die Rekonfigurationsvorgänge (A_{mj}^{Ri}) aus der Rekonfigurationsmatrix (vgl. Abschnitt 6.3.4) mit einem erfahrungswertbasierten Zeitfaktor (α_t) ressourcenspezifisch multipliziert. Dieser Anteil repräsentiert die notwendige Rekonfigurationszeit einer Produktionsressource. Die Summe aus den ressourcenspezifischen Rekonfigurationszeiten entspricht der Systemrekonfigurationszeit (t_{kl}^{Re}) und somit dem zeitlichen Kapazitätsbedarf für den Rekonfigurationsvorgang des Systems. Wird die Systemrekonfigurationszeit

anschließend durch die geänderte Taktzeit nach der Rekonfiguration (t_k) dividiert, so ergibt sich die eingebüßte Ausbringungsmenge.

Zusammenfassend ist im vorliegenden Abschnitt die mathematische Beschreibung der Skalierbarkeit der Produktionskapazitäten in Abhängigkeit der Konfigurationen beschrieben. Mithilfe dieser Beschreibung ist es möglich, diese charakteristische Eigenschaft rekonfigurierbarer Produktionssysteme in die Produktionsplanung zu integrieren und für die Synchronisation von Kapazitätsangebot und -nachfrage zu nutzen.

6.5 Fazit

In dem vorliegenden Kapitel wurden Ansätze für die Modellierung und Spezifikation rekonfigurierbarer Produktionssysteme entwickelt, die die Abbildung konfigurationsabhängiger Eigenschaften für die Produktionsplanung ermöglichen. Hierfür wurde zunächst die Strukturierung und Modellierung mithilfe von Petri-Netzen eingeführt. Des Weiteren wurde eine Unterteilung in technologische und planerische Informationen, die für die Methode zur Produktionsplanung notwendig sind, vorgenommen. Die Fähigkeiten einzelner Konfigurationen können dabei mithilfe des entwickelten Klassifikationsschemas spezifiziert werden. Darüber hinaus wurden eine Möglichkeit zur Bewertung des Aufwandes für Rekonfigurationsvorgänge sowie die Abbildung des Wechsels zwischen den Konfigurationen innerhalb des Konfigurationsbereichs in einer Rekonfigurationsmatrix dargelegt. Ferner wurde die Modellierung der Skalierbarkeit rekonfigurierbarer Produktionssysteme aus Sicht der Produktionsplanung mithilfe von konfigurationsabhängigen Bearbeitungszeiten bzw. systemspezifischen Taktzeiten beschrieben. Diese finden bei der Beschreibung der Skalierbarkeit der Produktionskapazitäten Anwendung und ermöglichen somit die adäquate Nutzung in der Produktionsplanung. Die Funktionen der Modellierung und Spezifikation ermöglichen zusammenfassend die anforderungsgerechte Abbildung der charakteristischen Eigenschaften und sind folglich als maßgebliche Befähiger für die Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme zu verstehen.

Im nachfolgenden Kapitel 7 erfolgt auf der Grundlage der Beschreibungs- und Modellierungsansätze die Entwicklung einer Methode zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme als zentrales Element des Planungssystems.

7 Methode zur Produktionsplanung

7.1 Übersicht

Auf Basis der entwickelten Modellierungs- und Beschreibungsansätze beinhaltet das vorliegende Kapitel den Aufbau und den Ablauf der Methode zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme. Die Integration der Eigenschaften rekonfigurierbarer Systeme, abgebildet durch System- und Ressourcenkonfigurationen, in die Produktionsplanung stellt das zentrale Ziel der Methode dar. Darüber hinaus gilt es, Losgrößen, Termine und Reihenfolgen für die Produktion in Abhängigkeit vom Konfigurationsbereich des Produktionssystems festzulegen.

Auf den Ablauf der Methode der Produktionsplanung wird in Abschnitt 7.2 eingegangen. In Abschnitt 7.3 erfolgt die Darstellung der Produktionsbedarfsplanung, die das Ziel verfolgt, die Rahmenbedingungen und die produktspezifischen Auftragsdaten adäquat aufzunehmen. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 7.4 Möglichkeiten zur planungsseitigen Generierung von Konfigurationsalternativen sowie zur Kapazitätsabstimmung im Rahmen der Ressourcenplanung dargestellt. Abschließend steht in Abschnitt 7.5 die Produktionsablaufplanung auf Basis einer mathematischen Modellbeschreibung im Fokus. Das Kapitel schließt mit einem Fazit in Abschnitt 7.6.

7.2 Ablauf der Methode zur Produktionsplanung

Der Ablauf der Methode zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme ist in Abbildung 29 dargestellt und teilt sich in die Funktionen der *Produktionsbedarfs-*, der *Ressourcen-* und der *Produktionsablaufplanung* auf. Hierbei besteht das Ziel darin, die kostenminimalen Ressourcenkonfigurationen für ein vorliegendes Produktionsprogramm zu identifizieren und festzulegen. Darüber hinaus nutzen die beiden ersten Funktionen der Methode maßgeblich die Modellierungs- und Beschreibungsansätze des vorherigen Kapitels.

Im Rahmen der *Produktionsbedarfsplanung* werden ausgehend von der Generierung und Spezifikation des Produktionsprogramms die möglichen Ressourcenkonfigurationen zu den einzelnen Arbeitsvorgängen der Aufträge mithilfe eines Technologieabgleichs zugeordnet. Sollten keine Konfigurationen aus dem Kon-

7 Methode zur Produktionsplanung

figurationsbereich zur Erfüllung der technologischen Anforderungen geeignet sein, so kann der Rekonfigurationsbedarf ermittelt und durch Anpassungsmaßnahmen gedeckt werden. Damit einhergehend ist der Technologieabgleich erneut erforderlich. Des Weiteren werden die produktspezifischen Auftragsdaten in einem konfigurationsabhängigen Arbeitsplan adäquat festgehalten. Abschließend werden die konfigurationsabhängigen Herstellungsprozesse generiert. Als Ergebnis der Produktionsbedarfsplanung liegt ein produktspezifisches Produktionsprogramm inklusive der notwendigen Produktbeschreibungen vor. Damit wird die Grundlage zur Generierung geeigneter Konfigurationsalternativen im Rahmen der Ressourcenplanung geschaffen.

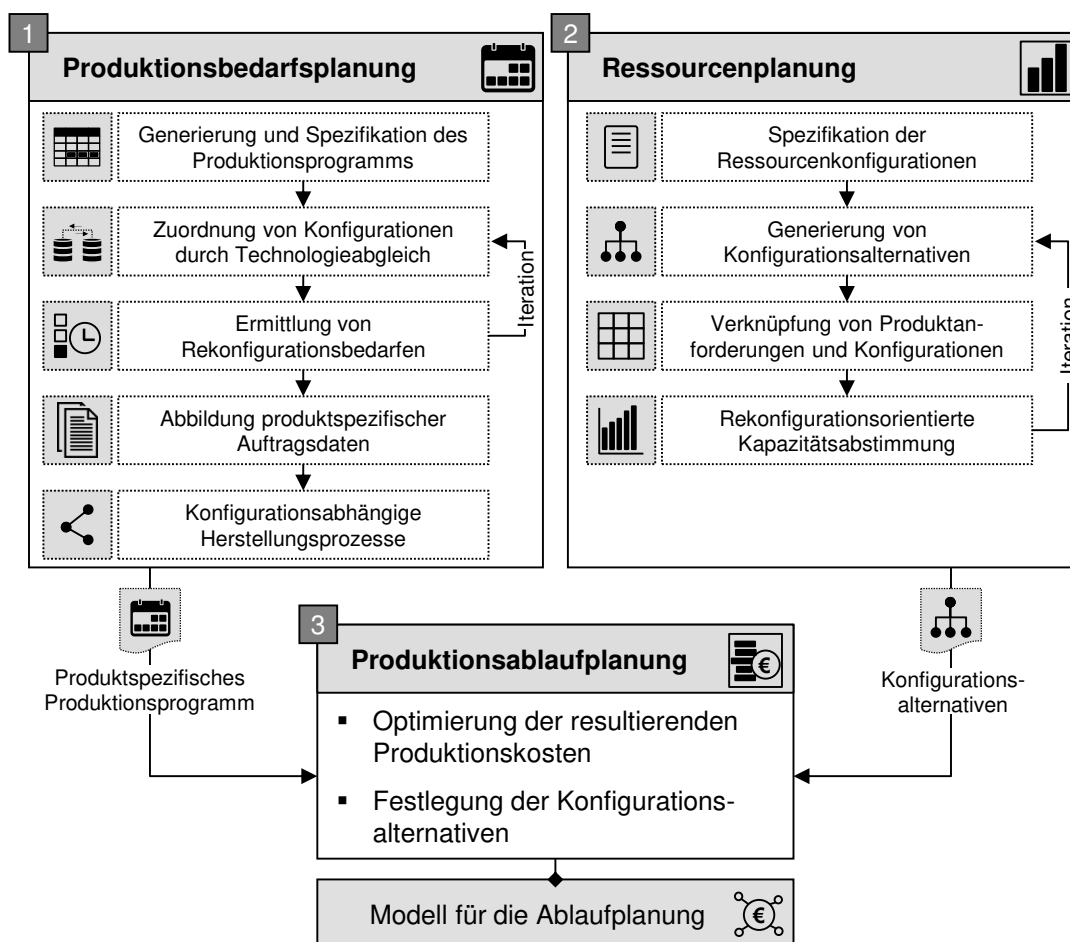


Abbildung 29: Methode zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme (in Anlehnung an HEES ET AL. 2016C)

Die *Ressourcenplanung* verfolgt das Ziel, die für die Produktionsablaufplanung relevanten Konfigurationsalternativen zu generieren. In einem ersten Schritt werden hierfür die Ressourcen des als gegeben betrachteten Produktionssystems mithilfe der Ergebnisse aus der Produktionsbedarfsplanung spezifiziert. Hierfür

werden u. a. die Ergebnisse des Technologieabgleichs in eine Ressourcenspezifikation überführt. Darauf aufbauend können die systemseitigen und für die Ablaufplanung relevanten Konfigurationsalternativen generiert werden, woraufhin diese Alternativen mit den Produkthanforderungen in Verbindung gebracht werden. Im Anschluss kann eine erste rekonfigurationsorientierte Kapazitätsabstimmung durchgeführt werden.

Nach Abschluss der vorherigen Planungsfunktionen hat die *Produktionsablaufplanung* die Aufgaben, auf Basis der Ergebnisse der Produktionsbedarfs- und Ressourcengrobplanung die Optimierung der resultierenden Produktionskosten vorzunehmen sowie anwendungsfallsspezifische Konfigurationsalternativen zeitlich festzulegen. Aufgrund der Vielzahl an Entscheidungsvariablen beruht die Produktionsablaufplanung auf einem mathematischen Modell, das die Möglichkeit bietet, mit Methoden des Operations Research die Termine, die Losgrößen und die Reihenfolgen der einzelnen Aufträge zu determinieren.

7.3 Produktionsbedarfsplanung

7.3.1 Allgemeines

Die Produktionsbedarfsplanung nimmt eine essentielle Rolle bei der Strukturierung der produktseitigen Anforderungen für die Produktionsplanung ein. Sie verfolgt dabei das Ziel, die produktionstechnischen Rahmenbedingungen und die produktspezifischen Auftragsdaten adäquat aufzunehmen. In einem ersten Schritt gilt es, ein Produktionsprogramm aus den erforderlichen Bedarfsmengen zu generieren und zu spezifizieren (vgl. Abschnitt 7.3.2). Mithilfe eines Technologieabgleichs werden die möglichen Ressourcenkonfigurationen des Produktionssystems für die auftragsseitigen Anforderungen der jeweiligen Produkte ermittelt (vgl. Abschnitt 7.3.3). Hierbei werden für den Abgleich insbesondere die Klassifikationsnummern aus Abschnitt 6.2.5 herangezogen. Sollten durch diesen Abgleich keine geeigneten Konfigurationen identifiziert werden, so können mit der Ermittlung der Rekonfigurationsbedarfe sowie den damit verbundenen Anpassungsmaßnahmen Potenziale zur Erweiterung des Konfigurationsbereichs bestimmt und realisiert werden (vgl. Abschnitt 7.3.4). Die Abbildung der produktspezifischen Anforderungen erfolgt mit einem erweiterten konfigurationsabhängigen Arbeitsplan und wird in Abschnitt 7.3.5 dargelegt. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 7.3.6 die Generierung der resultierenden konfigurationsabhängigen Herstellungsprozesse vorgenommen. Nach Abschluss der Produktionsbedarfs-

7 Methode zur Produktionsplanung

planung liegen alle für die weitere Planung notwendigen Spezifikationen inklusive der Bedarfe der jeweiligen Produkte in einer strukturierten Form als produkt-spezifisches Produktionsprogramm vor.

7.3.2 Generierung und Spezifikation des Produktionsprogramms

Mit der Generierung und Spezifikation des Produktionsprogramms wird das Ziel verfolgt, die kapazitiven und produktseitigen Anforderungen an das rekonfigurierbare Produktionssystem festzulegen. Ein beispielhaftes Produktionsprogramm ist in Abbildung 30 dargestellt.

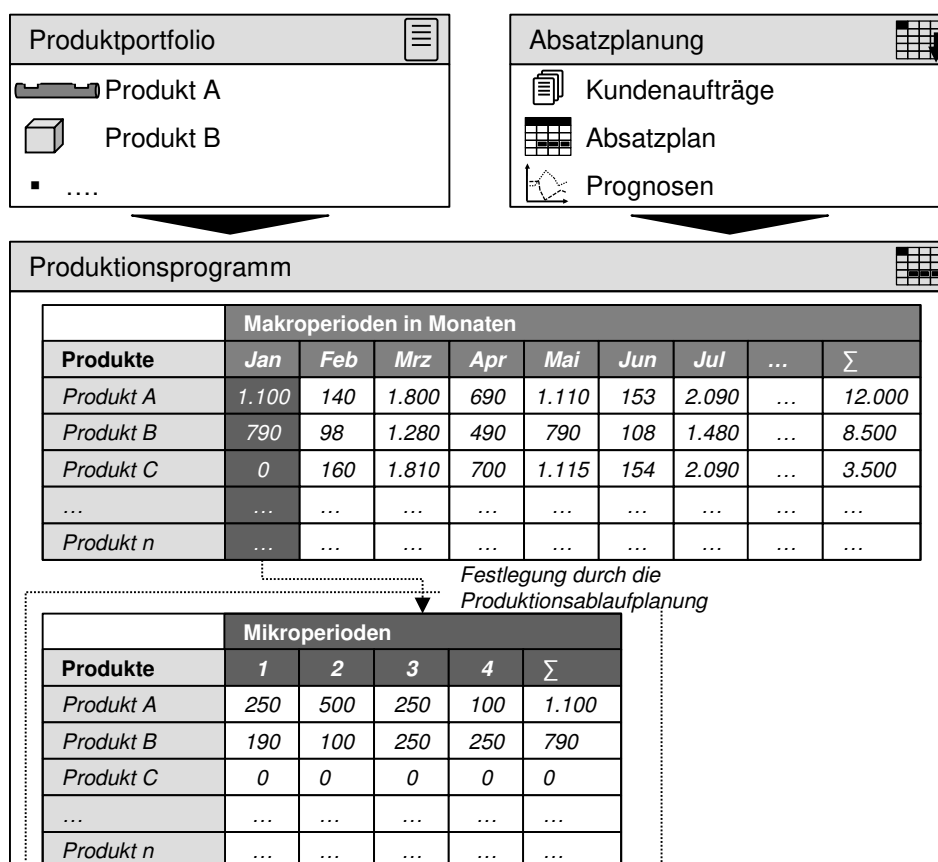


Abbildung 30: Beispielhaftes Produktionsprogramm inklusive der Darstellung von Makro- und Mikroperioden

Die Absatzplanung sowie die darin enthaltenen Produkte inklusive der notwendigen Planungsinformationen, z. B. in Form von Produktbeschreibungen, werden vorausgesetzt. Auf Basis der gegebenen Absatzplanung wird für einen bestimmten Planungszeitraum das zu realisierende Produktionsprogramm nach Produkten, Bedarfsmengen und Termin definiert. Das Produktionsprogramm bildet die produktions-spezifischen Rahmenbedingungen für die durchzuführende Produkti-

onsablaufplanung ab. Die Bedarfsmengen werden dabei auf Basis von Kundenaufträgen, Absatzplänen und Prognosen bestimmt und für einen definierten Zeitraum periodenweise aggregiert. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit findet eine Unterteilung in Makro- und Mikroperioden statt. Jede einzelne Makroperiode kann dabei eine feste Anzahl an definierten Mikroperioden beinhalten. Wird beispielsweise ein Produktionsprogramm für drei Monate, die die Makroperioden definieren, erstellt, so kann eine gewisse Anzahl an zusammenhängenden Tagen innerhalb dieser Makroperiode als Mikroperioden festgelegt werden. Als Einschränkung für die Mikroperioden gilt, dass nur eine Konfiguration des Produktionssystems aus dem Konfigurationsbereich vorliegen kann. Die Konfiguration ändert sich folglich innerhalb der Mikroperiode nicht. Bei der Generierung des Produktionsprogramms werden aus einer vorliegenden Absatzplanung (z. B. 12.000 Stück pro Jahr von Produkt A) und dem Produktportfolio die Bedarfe für die Makroperioden fixiert. Änderungen in diesem Bereich sind folglich nur bei erneuter Ausführung dieses Planungsschrittes möglich. Die Entscheidung in Bezug auf die Dauer der Mikroperioden und die exakten Produktionsmengen werden in der Produktionsablaufplanung vorgenommen.

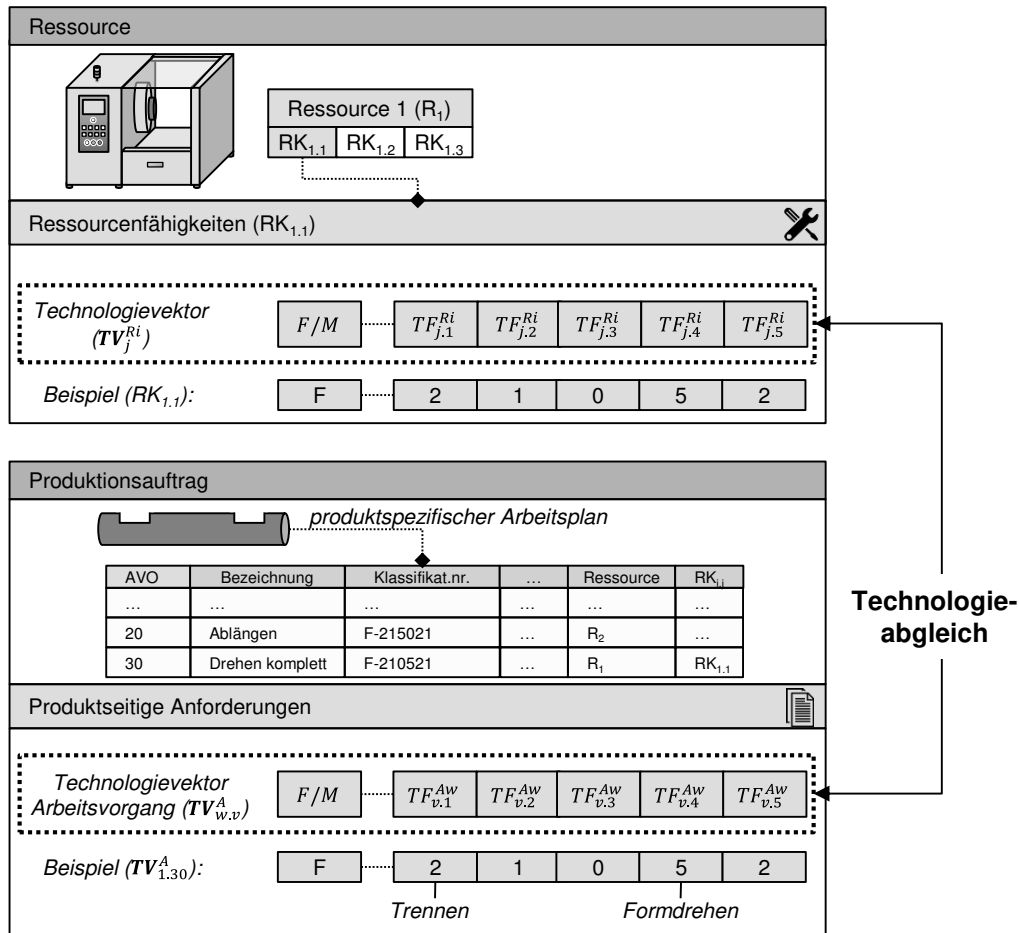
7.3.3 Zuordnung von Konfigurationen durch Technologieabgleich

Für die Produktionsplanung muss die Möglichkeit geschaffen werden, Konfigurationen zu den jeweiligen Arbeitsvorgängen (AVO) eines Auftrages zuzuordnen und auszuwählen. Dabei gilt es über den Technologieabgleich sicherzustellen, dass die geeigneten Konfigurationen den Arbeitsvorgängen anforderungsgerecht zugeordnet und anschließend in einer Vorauswahl zusammengefasst werden können. Auf Basis des in Abschnitt 6.2.5 dargestellten Klassifikationsschemas wird nachfolgend die Beschreibung des Technologieabgleichs für die Zuordnung von Konfigurationen zu den jeweiligen Arbeitsvorgängen dargelegt.

Die Zuordnung von Konfigurationen erfolgt mithilfe eines formalen Technologieabgleichs von Auftragsanforderungen und konfigurationsabhängigen Ressourcenfähigkeiten anhand der Klassifikationsnummern (vgl. Abschnitt 6.2.5). Im Rahmen des Technologieabgleichs werden die technischen Anforderungen der Produkte den klassifizierten, technologischen Fähigkeiten der Konfigurationen gegenübergestellt. Die produktseitigen Anforderungen werden aus den Arbeitsvorgängen des Produktionsauftrages abgeleitet. Sie werden anhand von Klassifikationsnummern beschrieben und anschließend als Technologiefaktoren ($TF_{v,n}^{AW}$) in einen Technologievektor der Arbeitsvorgänge ($TV_{w,v}^A$) übertragen (vgl. Abbildung 31). Des Weiteren liegen für jede Ressource die produktionstechnischen

7 Methode zur Produktionsplanung

Fähigkeiten sowie gegebenenfalls die erweiterten technischen Informationen vor, wie z. B. die Abmessungen des Arbeitsraums. Diese Ressourcenparameter werden anschließend als Technologiefaktoren ($TF_{j,n}^{Ri}$) der jeweiligen Ressourcenkonfiguration in einen Technologievektor (TV_j^{Ri}) übertragen.



Legende:

F/M: Fertigungs- oder Montageprozess

$TF_{v,n}^{Aw}$ bzw. $TF_{j,n}^{Ri}$: Technologiefaktor

$TV_{w,v}^A$: Technologievektor des Arbeitsvorgangs v von Auftrag w

TV_j^{Ri} : Technologievektor der Ressourcenkonfiguration j von Ressource i

Abbildung 31: Technologieabgleich für die Zuordnung von Konfigurationen zu Arbeitsvorgängen

Anschließend kann der Technologieabgleich als Anforderungs-Fähigkeits-Abgleich durchgeführt werden. Hierbei werden die korrespondierenden Technologiefaktoren auf Übereinstimmung geprüft und ermittelt, welche Arbeitsvorgänge mit den Ressourcenkonfigurationen technologisch fertigbar sind. Nach dem Vergleich der einzelnen Ressourcen und deren Konfigurationsfähigkeiten liegt abschließend eine Vorauswahl an technologisch möglichen Konfigurationen als

Eingangsgröße für die nachfolgenden Planungsschritte vor. Die tatsächliche Auswahl der Konfigurationen erfolgt im Rahmen der Produktionsablaufplanung u. a. nach zeitlichen und kostentechnischen Kriterien sowie unter Beachtung der produktionstechnischen Rahmenbedingungen (z. B. dem Produktionsprogramm).

Mit der dargestellten Vorgehensweise zur Zuordnung und Vorauswahl von Konfigurationen durch den Abgleich der technologischen Parameter lassen sich darüber hinaus unterschiedliche Detaillierungsgrade eines Anforderungs-Fähigkeits-Abgleichs realisieren. Hierzu wird anwendungs- und planungsphasenspezifisch eine entsprechende Anzahl der Stellen im Technologievektor betrachtet. Sind beispielsweise zu Beginn der Produktionsplanung nur sehr wenige Informationen über die benötigten Fertigungsverfahren verfügbar, erfolgt der Abgleich mit einer verminderten Stellenanzahl (z. B. Vergleich der Hauptgruppen in der Produktionsbedarfsplanung). Das Ergebnis des Technologieabgleichs besteht aus allen Ressourcenkonfigurationen des Konfigurationsbereichs, die die technologischen Fähigkeiten zur Ausführung der Arbeitsvorgänge der Produktionsaufträge besitzen. Für den Fall, dass keine Konfiguration innerhalb des Konfigurationsbereichs zur Ausführung der Produktionsoperationen identifiziert werden kann, ist die Durchführung von Rekonfigurationen auf Basis der bestehenden Konfigurationen notwendig. Nachfolgend werden hierfür sowohl der Rekonfigurationsbedarf ermittelt als auch geeignete Anpassungsmaßnahmen vorgestellt. Sollten keine Zuordnungsprobleme vorhanden sein, kann der folgende Schritt in der Produktionsbedarfsplanung vernachlässigt werden.

7.3.4 Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen

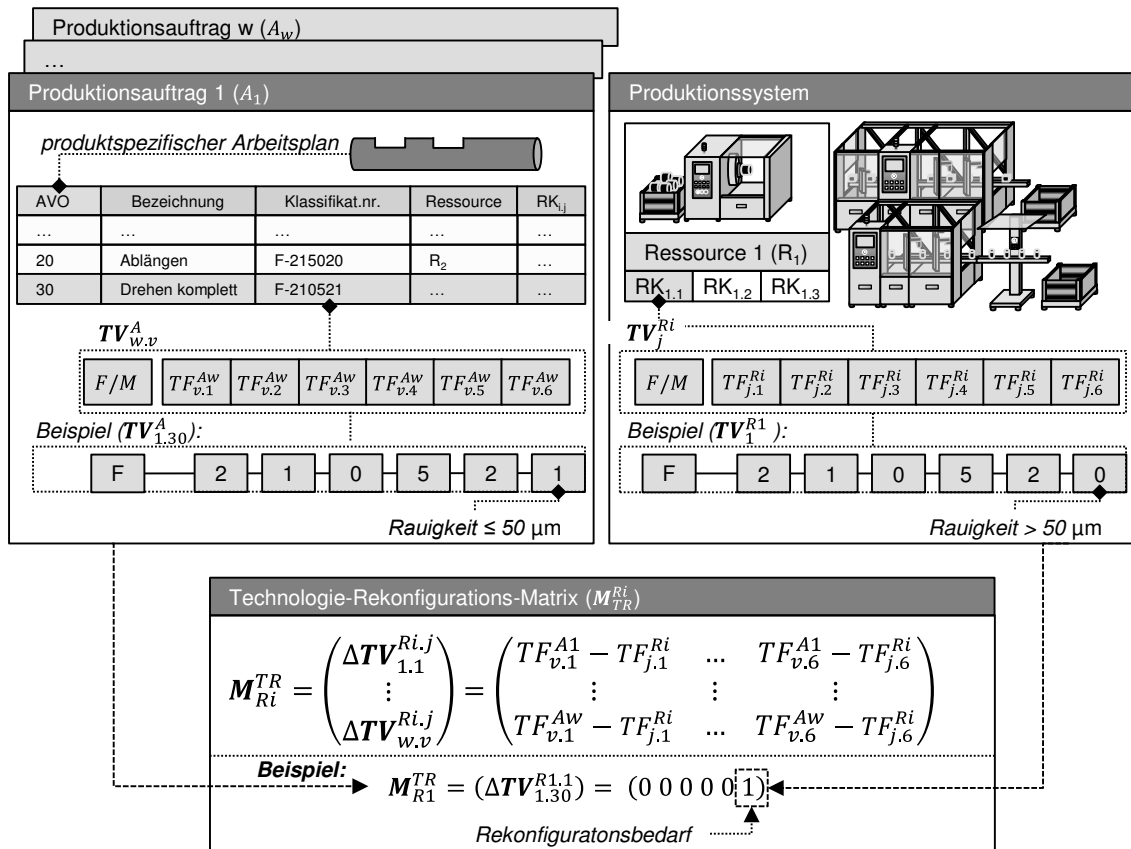
Im Allgemeinen können Rekonfigurationen durch Änderungen des Auftrages (z. B. Erhöhung der Stückzahlen), der Zustände (z. B. Ausfall einer oder mehrerer Produktionsressourcen) sowie der Umgebung (z. B. Begrenzungen der Produktionsfläche) hervorgerufen werden (BI ET AL. 2008). In der vorliegenden Arbeit werden lediglich die Veränderungen von Auftragsanforderungen als Ursache für Rekonfigurationen betrachtet, da sie die maßgeblichen Einflussgrößen für die Produktionsplanung darstellen. Im Gegensatz zu KARL (2014) werden strukturelle Rekonfigurationen, d. h. welche Bauteile bei einer Rekonfiguration auszutauschen sind, und Rekonfigurationsgraphen nicht betrachtet. Der Fokus des vorliegenden Abschnitts liegt auf der Ermittlung des Rekonfigurationsbedarfs, der aus dem Technologieabgleich resultiert. Auf Grundlage der in den vorherigen Abschnitten entwickelten Ergebnisse können technologiebedingte Rekonfigurati-

7 Methode zur Produktionsplanung

onen anhand der Fähigkeitsbereiche des Produktionssystems identifiziert werden. Diese dienen im Speziellen der Erweiterung des Konfigurationsbereichs.

Technologiebedingte Rekonfigurationen, d. h. Anpassungsbedarfe, die aus fehlenden technologischen Fähigkeiten resultieren, können mithilfe des Technologieabgleichs und des zugrundeliegenden Klassifikationsschemas identifiziert werden. Hierfür ist es erforderlich, dass alle produktseitigen Anforderungen der Arbeitsvorgänge sowie alle Ressourcenfähigkeiten mithilfe des in Abschnitt 6.2.5 dargestellten Klassifikationsschemas beschrieben sind. In die Betrachtungen werden alle Arbeitsvorgänge, die nicht einer Konfiguration innerhalb des Konfigurationsbereichs zugeordnet werden können, sowie die vorhandenen Ressourcenfähigkeiten einbezogen. Im Speziellen werden im Rahmen des Abgleichs die Technologievektoren der Arbeitsvorgänge ($TV_{w.v}^A$) und der konfigurationsabhängigen Ressourcenfähigkeiten (TV_j^{Ri}) anhand ihrer Technologiefaktoren verglichen. Hierbei wird eine erste Unterscheidung anhand der Art des Verfahrens, d. h. Fertigungs- oder Montageprozess, getroffen. Anschließend werden die Differenzen zwischen den Werten der Stellen der Technologiefaktoren gebildet und in einem konfigurationsspezifischen Differenzvektor ($\Delta TV_{w.v}^{Ri,j}$) zusammengefasst. Durch den Abgleich können die fehlenden Ressourcenfähigkeiten für jede einzelne Produktionsressource ermittelt und in einer sogenannten Technologie-Rekonfigurations-Matrix (M_{Ri}^{TR}) abgebildet werden.

In Abbildung 32 ist die Berechnung der einzelnen Werte anhand eines Beispiels dargestellt. Ausgehend von einem Auftrag 1 (A_1) erfolgt für den Arbeitsvorgang 30 ($A_{1,30}$) die Klassifikation des Vorgangs „Drehen komplett“ nach dem Klassifikationsschema. Hierbei handelt es sich um Fertigungsprozess (F). Als Anforderung an die Feingestalt ist die geforderte Rauigkeit $\leq 50 \mu\text{m}$ an der sechsten Stelle des Technologievektors des Arbeitsvorgangs ersichtlich. Im Rahmen der Konfigurationszuordnung konnte bisher keine passende Ressourcenkonfiguration des Produktionssystems für die Bearbeitung ermittelt werden. Diejenige Konfiguration, die die geringste Differenz in den jeweiligen Stellen der Technologie-Rekonfigurations-Matrix aufweist, konnte bei Ressource R_1 in Form von $RK_{1,3}$ identifiziert werden. Zur vollständigen Bearbeitung des Arbeitsvorgangs ist eine technologische Rekonfiguration zur Erfüllung der Feingestalt-Anforderungen notwendig. Hierfür können die nachfolgend dargestellten Anpassungsmaßnahmen zur Anwendung kommen. Im vorliegenden Beispiel kann es ausreichend sein, das vorliegende Werkzeug auszutauschen.



Legende:

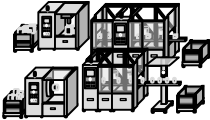
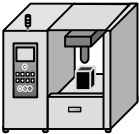
- $TF_{v,n}^{Aw}$ bzw. $TF_{j,n}^{Ri}$: Technologiefaktor
- F/M: Fertigungs- bzw. Montageprozess
- RK_{i,j}: Ressourcenkonfiguration j der Ressource i
- M_{Ri}^{TR} : Technologie-Rekonfigurations-Matrix für eine Produktionsressource i
- $\Delta TV_{w,v}^{Ri,j}$: Differenzvektor zwischen den Technologievektoren von AVO v und RK_{i,j}

Abbildung 32: Identifikation von technologiebedingten Rekonfigurationen mittels einer Technologie-Rekonfigurations-Matrix

Auf Grundlage der im vorherigen Abschnitt entwickelten Vorgehensweise zur Identifikation von technologiebedingten Rekonfigurationen ist es notwendig, geeignete Maßnahmen zur Anpassung der vorliegenden System- und Ressourcenkonfigurationen bereitzustellen. Hierfür ist es in Abhängigkeit der vorliegenden Phase der Produktionsplanung (vgl. Abschnitt 2.4.2) essentiell, die Maßnahmen nach zeitlichen Aspekten aufzuteilen. Des Weiteren müssen die Maßnahmen hinsichtlich ihres Rekonfigurationsaufwandes spezifiziert werden. In Rahmen der vorliegenden Arbeit wird daher zwischen den auf kurzfristige Sicht und den auf mittel- sowie langfristige Sicht möglichen Rekonfigurationsmaßnahmen unterschieden. Für die Einstufung des Rekonfigurationsaufwandes werden qualitative Abschätzungen in den Stufen gering, mittel und hoch verwendet. Während die systemspezifischen Maßnahmen insbesondere auf langfristige Sicht zur Anwendung kommen, können die kurzfristigen Maßnahmen vor allem auf Produktions-

7 Methode zur Produktionsplanung

ressourcen angewandt werden. Generell ist auch die Kombination einzelner Maßnahmen für die Durchführung von Rekonfigurationen zulässig. Eine allgemeingültige Auswahl und Bewertung einzelner Maßnahmen ist vor dem Hintergrund der Zielsetzung nicht möglich. Adäquate Maßnahmen zur Rekonfiguration von Produktionssystemen sind u. a. in KOREN ET AL. (1999) und ELMARAGHY (2006) zusammengefasst. Die Maßnahmen, die der Anpassung von Technologien zugeordnet werden können, dienen der Lösung von Differenzen in der Technologie-Rekonfigurations-Matrix. Die einzelnen Technologiefaktoren der System- und der Ressourcenkonfigurationen können durch das Anpassen, Hinzufügen oder Entfernen von Technologiefaktoren adaptiert werden. Eine Übersicht ausgewählter Maßnahmen zur Anpassung von Konfigurationen kann Abbildung 33 entnommen werden.

Ebene	Zeithorizont			
	mittel- bis langfristig		kurzfristig	
	Maßnahme	Aufwand	Maßnahme	Aufwand
 System	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anpassung, Hinzufügen o. Entfernen von Ressourcen <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> ▪ Anpassung des Produktionslayouts <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Änderung des Materialflusses <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 	
 Ressource	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anpassung, Hinzufügen o. Entfernen von ressourcenspezifischen Modulen <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anpassung, Hinzufügen o. Entfernen von ressourcenspezifischen Modulen <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> ▪ Austauschen, Hinzufügen o. Entfernen von Werkzeugen und Vorrichtungen <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> ▪ Umprogrammierung von produktspezifischen Bearbeitungsprogrammen <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 	

Legende:

- Geringer Rekonfigurationsaufwand
- Mittlerer Rekonfigurationsaufwand
- Hoher Rekonfigurationsaufwand

Abbildung 33: Ausgewählte Maßnahmen mit beispielhafter Bewertung zur Anpassung von Konfigurationen hinsichtlich der Technologie

Auf der Ebene des Produktionssystems kann die Anpassung der Produktionstechnologien u. a. durch das Anpassen, Hinzufügen oder Entfernen von einzelnen Produktionsressourcen erfolgen. Zusätzlich können Änderungen am Produktionslayout vorgenommen werden. Als Restriktionen gelten hier das verfügbare Platzangebot sowie die vorhandenen Anschlussmöglichkeiten (elektrisch, pneumatisch, etc.) für die Produktionsressourcen. Diese Anpassungsmaßnahmen können

einer mittel- bis langfristigen Sichtweise sowie einem hohen Rekonfigurationsaufwand zugeordnet werden. Im Gegensatz dazu kann die Anpassung des Materialflusses kurzfristig auf der Systemebene umgesetzt werden. Diese kann beispielsweise bei der Einführung eines neuen Produktes erforderlich sein. Der Aufwand für die Rekonfiguration wird in der vorliegenden Arbeit im mittleren Bereich eingeordnet, da insbesondere in den indirekten Bereichen, wie z. B. der Arbeitsvorbereitung, Anpassungsmaßnahmen notwendig sind. Für einzelne Produktionsressourcen erfolgt die Rekonfiguration der Technologie mittel- bis langfristig durch das Anpassen, Hinzufügen oder Entfernen einzelner Module. Abhängig vom strukturellen Aufbau der Produktionsressource kann der Austausch kurzfristig erfolgen. Die Umsetzung kann, sofern standardisierte Schnittstellen vorliegen, mit einem mittleren Aufwand durchgeführt werden. In Bezug auf die kurzfristigen Maßnahmen können an Ressourcen darüber hinaus Werkzeuge und Vorrichtungen mit einem geringen Rekonfigurationsaufwand angepasst werden. Des Weiteren können kurzfristig und kostengünstig Umprogrammierungen in den produktspezifischen Bearbeitungsprogrammen vorgenommen werden.

Zusammenfassend wird die Ermittlung des Rekonfigurationsbedarfs mithilfe des entwickelten Technologieabgleichs ermöglicht. Weiterhin können die identifizierten Rekonfigurationen mithilfe der ebenen- und phasenspezifischen Anpassungsmaßnahmen durchgeführt werden. Sofern die notwendigen Rekonfigurationsbedarfe durch die vorliegenden Maßnahmen im Rahmen der Produktionsbedarfsplanung gedeckt werden können, ist die Ausführung des in Abschnitt 7.3.3 dargestellten Technologieabgleichs mit dem erweiterten Konfigurationsbereich erneut notwendig.

7.3.5 Abbildung produktspezifischer Auftragsdaten

Im Rahmen der Produktionsbedarfsplanung wurde bereits mit der Generierung und Spezifikation des Produktionsprogramms festgelegt, welche Produkte in dem vorliegenden oder neuen Produktionssystem hergestellt werden sollen. Darauf aufbauend und unter Berücksichtigung der Ergebnisse des Technologieabgleichs (vgl. Abschnitt 7.3.3) gilt es, geeignete Beschreibungen der herzustellenden Produkte für die Produktionsplanung bereitzustellen. Die Abbildung produktspezifischer Auftragsdaten erfüllt daher den Zweck, die notwendigen Produktionsprozesse und die daraus resultierenden Anforderungen an die System- und Ressourcenkonfigurationen sowie die konfigurationsabhängigen Planungsdaten, wie z. B. Bearbeitungszeiten, für die Produktionsablaufplanung abzubilden.

7 Methode zur Produktionsplanung

Das zentrale Planungsdokument für die Abbildung und Bereitstellung produkt-spezifischer Auftragsdaten in der Ressourcen- und Produktionsablaufplanung ist der Arbeitsplan. Dieser dokumentiert die Arbeitsvorgänge in einer logischen und wirtschaftlichen Reihenfolge und stellt zudem die Schnittstelle zur Konstruktion dar (EVERSHEIM 2002). Als wesentliche Inhalte des Arbeitsplans werden die erforderlichen Ressourcen zur Herstellung des Produktes sowie Informationen für Kalkulationen, die Materialdisposition und die Kapazitätsplanung abgebildet (WIENDAHL 2010). Grundlegende Informationen, wie z. B. die Werkstückbezeichnung und der Werkstoff, finden sich im Arbeitsplankopf. Der Arbeitsplanrumpf hingegen stellt die Arbeitsvorgänge in einer tabellarischen Form dar. Zusätzlich können Kostenstellen oder Bearbeiter im Arbeitsplan aufgeführt werden. Um die Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme zu befähigen, wird ausgehend von den grundlegenden Darstellungen ein konfigurationsabhängiger Arbeitsplan verwendet. Eine Darstellung eines für die Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme geeigneten Arbeitsplanes ist in Abbildung 34 dargestellt. Dieser dient als Grundlage für die Aufnahme der produktseitigen Anforderungen. Die Reihenfolge der Arbeitsfolgen wird für die nachfolgenden Schritte als gegeben betrachtet.

Arbeitsplan								
Stückzahl: 4	Datum: 15.02.2016		Auftragsnummer: 2016-150206-17062017			Zeichnung: 2016-1501		
	Bearbeiter: S. Leopold							
Werkstoff: C45	Bezeichnung: Maschinenwelle		Abmessungen: D = 90 mm, L = 720 mm		Rohgewicht: 1,5 kg	Fertiggewicht: 0,9 kg		
AVO	Arbeitsvorgang	Klassifikationsnummer	KS	LG	Ressource	Konfig.	t_r [min]	t_{ij}^b [min]
...
20	Ablängen	F-215021	910	04	R ₁	RK _{1,1}	10	2,0
30	Drehen komplett	F-210521	320	06	R ₂	RK _{2,1} RK _{2,2}	20	5,2 4,6
40	Nut fräsen	F-212021	400	06	R ₃	RK _{3,1} RK _{3,3}	10	5,5 2,6
...

Legende:

AVO: Arbeitsvorgang	KS: Kostenstelle
LG: Lohngruppe	RK _{i,j} : Ressourcenkonfiguration j von Ressource i
t_r : Rüstzeit	t_{ij}^b : konfigurationsabhängige Bearbeitungszeit

Abbildung 34: Konfigurationsabhängiger Arbeitsplan für die Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme

Als Anpassung eines klassischen Arbeitsplans ist die Klassifikationsnummer des in Abschnitt 6.2.5 dargestellten Klassifikationsschemas im Arbeitsplanrumpf integriert. Zusätzlich besteht bei diesem erweiterten Arbeitsplan die Möglichkeit, konfigurationsabhängige Bearbeitungszeiten, die in Abschnitt 6.4.2 spezifiziert sind, für die einzelnen Arbeitsvorgänge zu hinterlegen. Mithilfe des Technologieabgleichs (vgl. Abschnitt 7.3.3) kann das Ergebnis der Zuordnung der Auftragsanforderungen zu den vorhandenen Ressourcenfähigkeiten der jeweiligen Konfiguration im Arbeitsplan dokumentiert werden. Zusammenfassend können durch die adaptierte und erweiterte Struktur des Arbeitsplans Arbeitsvorgänge für die Produktionsablaufplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme abgebildet werden.

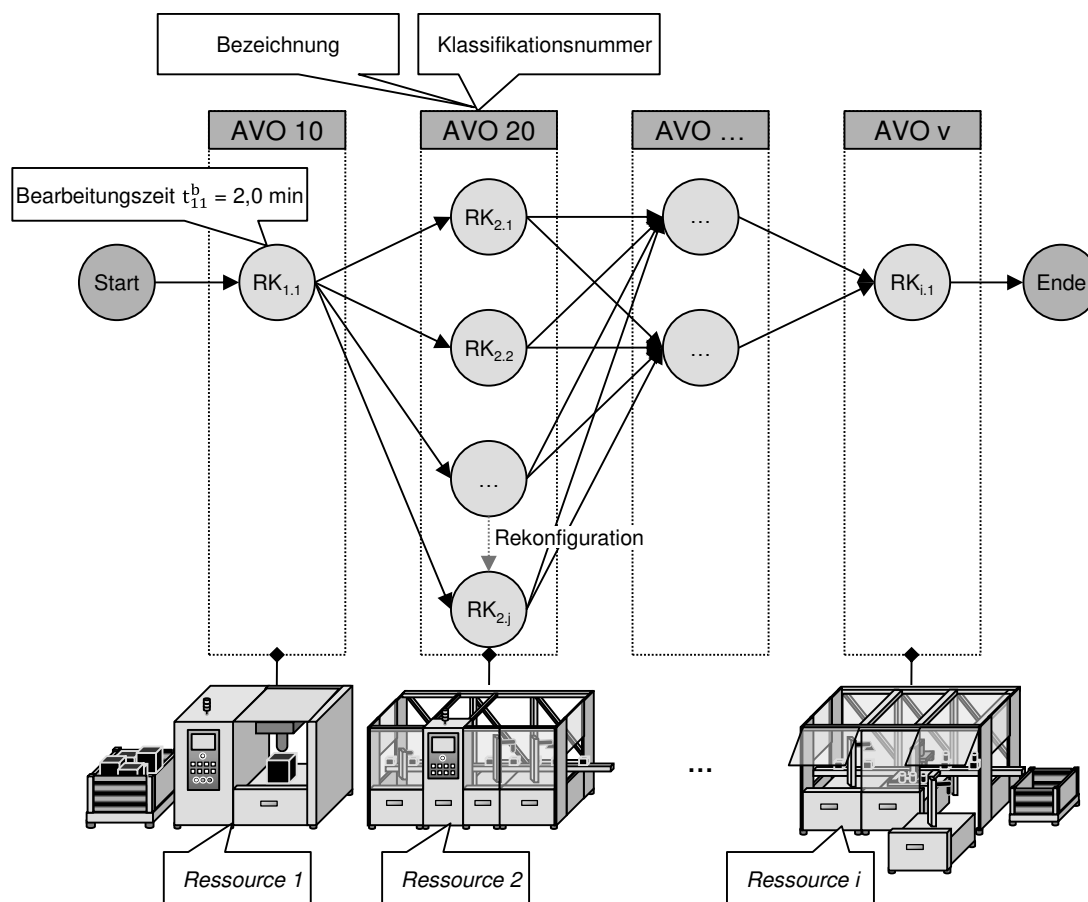
7.3.6 Generierung konfigurationsabhängiger Herstellungsprozesse

Die bisherigen Ausführungen im vorherigen Abschnitt haben die konfigurationsabhängige Beschreibung von Produktionsaufträgen in den Fokus gestellt. Aus den Planungsergebnissen entsteht der Bedarf, die konfigurationsabhängigen Herstellungsprozesse abzubilden und die darin enthaltenen Konfigurationsalternativen auf der Ressourcenebene darzustellen. Im Rahmen des vorliegenden Abschnitts werden mithilfe eines Modellierungsansatzes die konfigurationsabhängigen Herstellungsprozesse als Grundlage für die Produktionsablaufplanung generiert. Bei der Modellierung der Herstellungsprozesse ist zu berücksichtigen, dass die einzelnen Arbeitsvorgänge in Abhängigkeit zueinander stehen. Als Ergebnis liegen nach diesem Planungsschritt alle Konfigurationsmöglichkeiten für die Durchführung des Herstellungsprozesses vor.

Im sogenannten Herstellungsgraphen werden alle Arbeitsvorgänge abgebildet, die zur Herstellung des jeweiligen Produktes gemäß dem Arbeitsplan durchzuführen sind (vgl. Abbildung 35). Die Abfolge der einzelnen Ressourcen wird dabei als gegeben betrachtet. Als Eingangsdaten für die Generierung werden hierfür die adaptierten Arbeitspläne des vorherigen Abschnitts herangezogen. Mithilfe des Graphen können folglich alle möglichen, ressourcenspezifischen Konfigurationsalternativen für die einzelnen Arbeitsvorgänge dargestellt werden. Weiterhin können die einzelnen Arbeitsvorgänge durch die Klassifikationsnummer sowie ihre Bezeichnung eindeutig beschrieben werden. Bei der Modellierung der alternativen Konfigurationen im Herstellungsprozess repräsentieren die Knoten den Konfigurationszustand einer Produktionsressource zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die Verweildauer in dem jeweiligen Zustand bzw. der Ressourcenkonfiguration hängt dabei maßgeblich von der konfigurationsspezifischen

7 Methode zur Produktionsplanung

Bearbeitungszeit ab. Der jeweilige Zustand kann vor der Durchführung des Herstellungsprozesses durch eine Rekonfiguration innerhalb des Konfigurationsbereichs verändert werden (vgl. Abschnitt 6.3). Die Kanten des Graphen symbolisieren den Übergang zwischen den einzelnen Arbeitsvorgängen. Der dargestellte Ansatz zur Modellierung konfigurationsabhängiger Herstellungsprozesse ermöglicht die vollständige Beschreibung der möglichen Konfigurationsalternativen der Ressourcen durch Parallelstrukturen. Diese Struktur bietet die Möglichkeit, mehrere ausführbare Konfigurationen abzubilden, die den gleichen Herstellungsprozess durchführen. Des Weiteren werden die von den Konfigurationen beeinflussbaren Bearbeitungszeiten integriert. Die verschiedenen Möglichkeiten zur Konfiguration der Ressourcen werden im Rahmen der Produktionsablaufplanung als Eingangsdaten für die Festlegung einer Konfigurationsalternative herangezogen.



Legende:

AVO: Arbeitsvorgang

$RK_{i,j}$: Ressourcenkonfiguration j von Ressource i

t_{ij}^b : Konfigurationsabhängige Bearbeitungszeit

○ Zustand

→ Kante

Abbildung 35: Modellierung konfigurationsabhängiger Herstellungsprozesse

Nach Abschluss der Produktionsbedarfsplanung liegen als essentielle Grundlage für die Produktionsablaufplanung die geforderten, produktspezifischen Produktionsmengen für jede definierte Makroperiode in Form eines Produktionsprogramms vor. Weiterhin sind die Informationen für die Produktionsplanung der einzelnen Produkte in einem Arbeitsplan dokumentiert, als Herstellungsgraph modelliert und können infolgedessen in der Produktionsablaufplanung als Eingangsdaten genutzt werden.

7.4 Ressourcenplanung

7.4.1 Allgemeines


Die Aufgaben der Ressourcenplanung sind die Generierung und Beschreibung der Systemkonfigurationen sowie die konfigurationsabhängige Kapazitätsabstimmung auf Basis der Skalierbarkeit der Produktionskapazitäten. Die notwendige Informationsbasis zur Ableitung der Konfigurationen wird u. a. durch die Modellierungs- und Beschreibungsansätze für rekonfigurierbare Produktionssysteme bereitgestellt. Für die strukturierte Dokumentation der Fähigkeiten des Produktionssystems werden die Ressourcen spezifiziert (vgl. Abschnitt 7.4.2). Diese Spezifikation dient in Abschnitt 7.4.3 zudem als essentielle Basis für die darauf aufbauende Generierung der aus Planungssicht relevanten Konfigurationsalternativen. Als ein Ergebnis der Ressourcenplanung wird der Produktionsablaufplanung eine sogenannte Produkt-Konfigurations-Kompatibilitäts-Matrix (vgl. Abschnitt 7.4.4) zur Verfügung gestellt. Auf Basis dieser Matrix können unterschiedliche Systemkonfigurationen im Rahmen der Ablaufplanung bewertet und periodenspezifisch für die Ausführung des vorliegenden Produktionsprogramms ausgewählt werden. Abschließend werden mithilfe der Beschreibung der Skalierbarkeit rekonfigurierbarer Produktionssysteme (vgl. Abschnitt 6.4) sowie der Konfigurationsalternativen die Möglichkeiten zur rekonfigurationsorientierten Kapazitätsabstimmung in Abschnitt 7.4.5 dargelegt.

7.4.2 Spezifikation der Ressourcenkonfigurationen

Bei rekonfigurierbaren Produktionssystemen setzen sich die Funktionalität und die Kapazität des gesamten Systems aus dem Konfigurationszustand der einzelnen Produktionsressourcen innerhalb ihres Konfigurationsbereichs zusammen. Aus diesem Grund verfolgt die Spezifikation der einzelnen Ressourcenkonfigura-

7 Methode zur Produktionsplanung

tionen das Ziel, die notwendigen Planungsdaten für die nachfolgende Generierung von Konfigurationsalternativen auf Basis des in Abschnitt 6.2.4 dargelegten Modellierungsansatzes und der Beschreibung der konfigurationsabhängigen Bearbeitungszeiten (vgl. Abschnitt 6.4.2) in einer Ressourcenspezifikation zur Verfügung zu stellen. Die Struktur und die Inhalte der Ressourcenspezifikation sind in Abbildung 36 aufgezeigt.

Ressource	Konfig.	Module	Arbeitsvorgänge	Bearbeitungszeit t_{ij}^b [min]	Bearbeitungskostensatz c_{ij}^b [€/h]
 R1	RK _{1,1}	M ₁	A _{1,10}	7	60
	RK _{1,2}	M ₂	A _{1,10}	4,2	60
	RK _{1,3}	M ₁ , M ₂	A _{1,10} A _{2,30}	2,8 3,2	110 110
...
R _i	RK _{i,j}	M _n	A _{w,v}	t_{ij}^b	c_{ij}^b

Legende:

- A_{w,v}: Arbeitsvorgang v des Auftrags w
- RK_{i,j}: Ressourcenkonfiguration j von Ressource i
- M_n: Modul n der Ressource i
- t_{ij}^b : Bearbeitungszeit mit Ressourcenkonfiguration j von Ressource i
- c_{ij}^b : Bearbeitungskostensatz mit Ressourcenkonfiguration j von Ressource i

Abbildung 36: Ressourcenspezifikation für die Bereitstellung relevanter Planungsinformationen

Um das Ziel einer durchgängigen Produktionsplanung zu erreichen, werden in der Spezifikation die relevanten Planungsinformationen für die Produktionsablaufplanung zusammengefasst. Als Eingangsdaten für die Ressourcenspezifikation dient der konfigurationsabhängige Arbeitsplan (vgl. Abschnitt 7.3.5). Die Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu den Ressourcenkonfigurationen liegt bereits durch den Technologieabgleich (vgl. Abschnitt 7.3.3) vor. Diese Spezifikation beinhaltet zudem die vorhandenen Module, die für die Ausführung der jeweiligen Fertigungs- oder Montageprozesse notwendig sind. Des Weiteren können die konfigurationsspezifischen Bearbeitungszeiten (t_{ij}^b) und -kostensätze (c_{ij}^b) integriert werden. Mithilfe der konfigurationsabhängigen Bearbeitungszeiten sind die Arbeitsvorgänge der erweiterten Arbeitspläne aus planungstechnischer Sicht vollständig für die weiteren Planungsschritte spezifiziert. Nach Erstellung der Ressourcenspezifikationen werden anschließend die möglichen Konfigurationsalternativen für das Produktionssystem generiert.

7.4.3 Generierung von Konfigurationsalternativen

Das Ziel der Generierung von Konfigurationsalternativen ist es, auf Basis der Ressourcenspezifikationen und den Planungsergebnissen der Produktionsbedarfsplanung mögliche Systemkonfigurationen, die im Rahmen der Ablaufplanung hinsichtlich der Erfüllung der Zielfunktion bewertet werden, zu generieren und zu spezifizieren (vgl. Abbildung 37). Bei der Generierung der Alternativen wird der vollständige Konfigurationsbereich der einzelnen Produktionsressourcen betrachtet. Des Weiteren müssen Restriktionen hinsichtlich der Kombination von unterschiedlichen Ressourcenkonfigurationen berücksichtigt werden.

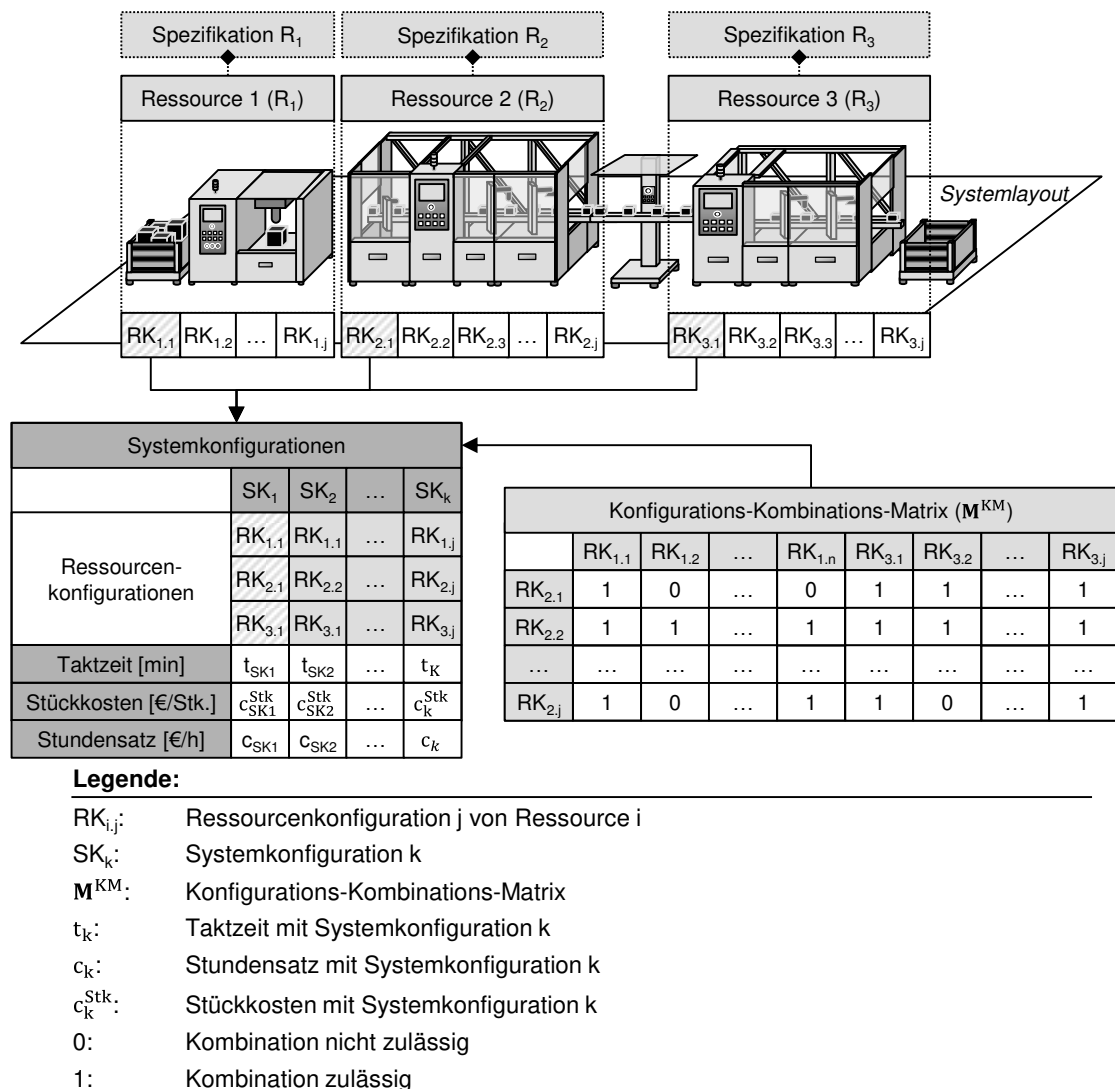


Abbildung 37: Generierung von Konfigurationsalternativen mithilfe der Ressourcenspezifikationen und einer Konfigurations-Kombinations-Matrix (in Anlehnung an HEES ET AL. 2016C)

7 Methode zur Produktionsplanung

Auf Basis eines gegebenen Systemlayouts, das sich beispielsweise aus den Ergebnissen des Technologieabgleichs und einer Kapazitätsabschätzung bei Neuplanungsprojekten ableiten lässt, sind die verwendeten Produktionsressourcen sowie die möglichen Konfigurationen über den Konfigurationsbereich bereits festgelegt. Als wesentliche Eingangsdaten für die Erstellung unterschiedlicher Konfigurationsalternativen werden hierfür die Ressourcenspezifikationen (vgl. Abschnitt 7.4.2) herangezogen. Die Kombination der einzelnen Ressourcenkonfigurationen resultiert in einer Systemkonfiguration, die im Rahmen der Produktionsablaufplanung verwendet werden kann. Die Konfigurationen werden so lange kombiniert, bis alle zulässigen Kombinationen erstellt sind. Jede dieser generierten Konfigurationsalternativen lässt sich zudem mit einer konfigurationsspezifischen Taktzeit (t_K), den Stückkosten (c_k^{Stk}) sowie den Stundensätzen (c_k) konkretisieren. Maßgeblich zur Festlegung der systemspezifischen Taktzeit ist die Taktzeit der Engpassressource. Die konfigurationsspezifischen Stückkosten lassen sich nach Formel (12) berechnen. In der Berechnung werden die in der Konfigurationsalternative vorliegenden ressourcenspezifischen Bearbeitungszeiten mit den zugehörigen Bearbeitungskosten multipliziert. Anschließend werden die Kosten der jeweiligen Ressource zu den Stückkosten der Systemkonfiguration aufsummiert. Aus den Stückkosten können mit der konfigurationsspezifischen Taktzeit anschließend die Stundensätze für die jeweilige Konfigurationsalternative abgeleitet werden.

$$c_k^{Stk} = \sum_{i=1}^{i^{max}} t_{ij}^b \cdot c_{ij}^b \quad (12)$$

mit c_k^{Stk} Stückkosten für die Systemkonfiguration k
 t_{ij}^b Bearbeitungszeit mit Ressourcenkonfiguration $RK_{i,j}$
 c_{ij}^b Bearbeitungskosten mit Ressourcenkonfiguration $RK_{i,j}$

Des Weiteren können im Rahmen der Generierung der Konfigurationsalternativen Restriktionen bei den Kombinationen durch eine sogenannte Konfigurations-Kombinations-Matrix (M^{KM}) abgebildet werden. Diese stellt in Abhängigkeit der Ressourcenkonfigurationen des Produktionssystems dar, welche Kombinationen zulässig sind. Restriktionen können z. B. vorhanden sein, wenn Module sowohl in einer als auch in einer anderen Ressource eingesetzt werden können. Das jeweilige Modul steht folglich nur einer der beiden Ressourcenkonfigurationen zur Verfügung. Mithilfe der generierten Systemkonfigurationen können die Konfigurationen im Rahmen der Produktionsablaufplanung unter kostentechnischen Aspekten festgelegt werden.

7.4.4 Verknüpfung von Produktanforderungen und Konfigurationen

Neben der Spezifikation der Konfigurationsalternativen ist es als Vorbereitung für die Produktionsablaufplanung erforderlich, die Informationen aus dem Produktionsprogramm mit den jeweiligen Konfigurationsalternativen in Verbindung zu bringen. Hiermit werden die Auswahlmöglichkeiten für die Ablaufplanung eingeschränkt und die anschließende Lösungssuche beschleunigt. Für die Verknüpfung der produktseitigen Anforderungen mit alternativen Systemkonfigurationen wird daher eine Produkt-Konfigurations-Kompatibilitäts-Matrix (M^{PK}) eingeführt (vgl. Abbildung 38). Diese Matrix stellt für jede systemseitig mögliche Konfigurationsalternative die Produkte dar, die in dieser Konfiguration gefertigt werden können.

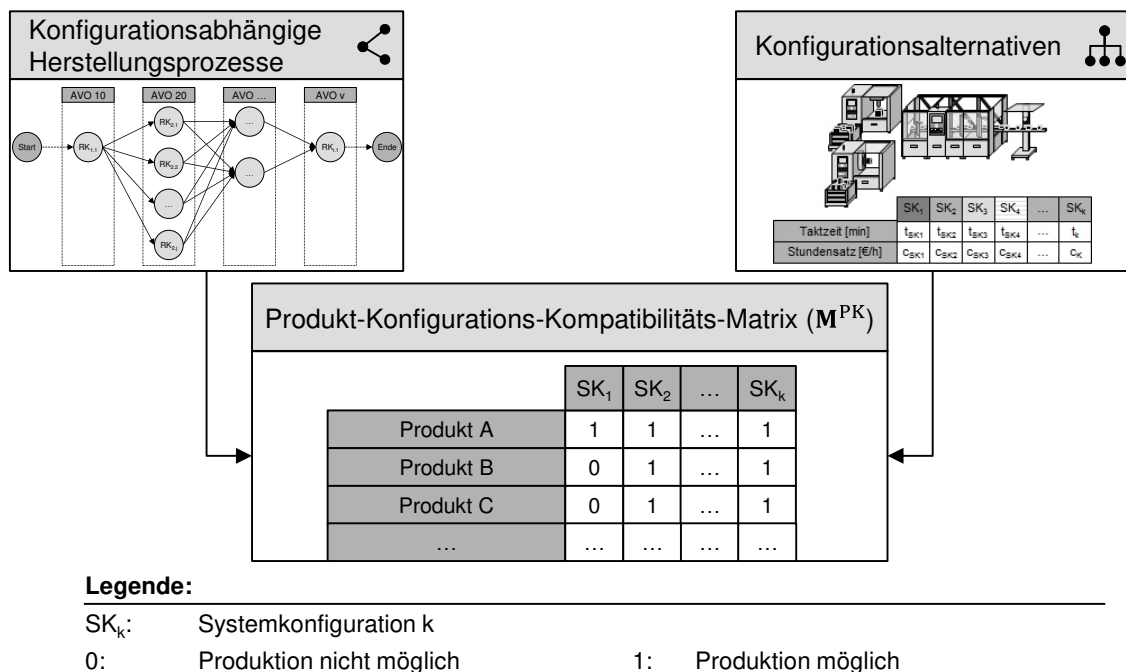


Abbildung 38: Verknüpfung von konfigurationsabhängigen Herstellungsprozessen und Konfigurationsalternativen

Als Eingangsdaten werden hierfür die konfigurationsabhängigen Herstellungsprozesse und die Konfigurationsalternativen verwendet. Diese beinhalten alle notwendigen Ergebnisse der Produktionsbedarfsplanung hinsichtlich der produktseitigen Anforderungen an die Ressourcenkonfigurationen. Weiterhin sind die alternativen Ressourcenkonfigurationen für die Ausführung der einzelnen Arbeitsvorgänge integriert. Durch diese Verknüpfung liegt infolgedessen eine Einschränkung bezüglich der möglichen Systemkonfigurationen vor, die technologisch in der Lage sind, das jeweilige Produkt herzustellen. Die Produkt-

7 Methode zur Produktionsplanung

Konfigurations-Kompatibilitäts-Matrix sowie die Beschreibung der alternativen Systemkonfigurationen stellen die wesentlichen Eingangsdaten für die Produktionsablaufplanung dar und sind nach Durchführung dieses Planungsschrittes vollständig spezifiziert.

7.4.5 Rekonfigurationsorientierte Kapazitätsabstimmung

Ein wesentlicher Schlüsselfaktor von rekonfigurierbaren Produktionssystemen besteht in der Möglichkeit, die Kapazität an die geforderten Rahmenbedingungen anpassen zu können (KOREN ET AL. 1999). Anpassungen an geänderte Marktbedingungen, wie z. B. eine steigende Nachfrage, können somit schnell und einfach vorgenommen werden. In diesem Abschnitt wird insbesondere die Kapazitätsabstimmung in den Fokus der Betrachtungen gestellt. Grundsätzlich wird im Rahmen der Kapazitätsabstimmung der Kapazitätsbedarf mit dem vorliegenden Kapazitätsangebot verglichen (WIENDAHL 2010). Sollten Anpassungen notwendig sein, kann einerseits das Kapazitätsangebot erhöht oder andererseits die Kapazitätsbelastung reduziert werden. Im Rahmen der Betrachtungen werden vor allem sogenannte Belastungsprofile verwendet, die den notwendigen Kapazitätsbedarf beinhalten und für die jeweiligen Planungsperioden generiert werden können.

Für die Kapazitätsabstimmung muss in einem ersten Schritt der notwendige Kapazitätsbedarf in Form eines konfigurationsabhängigen Belastungsprofils (KAP^B) bestimmt werden. Abbildung 39 stellt den Kapazitätsbedarf als konfigurationsabhängiges Belastungsprofil für eine Planungsperiode beispielhaft dar.

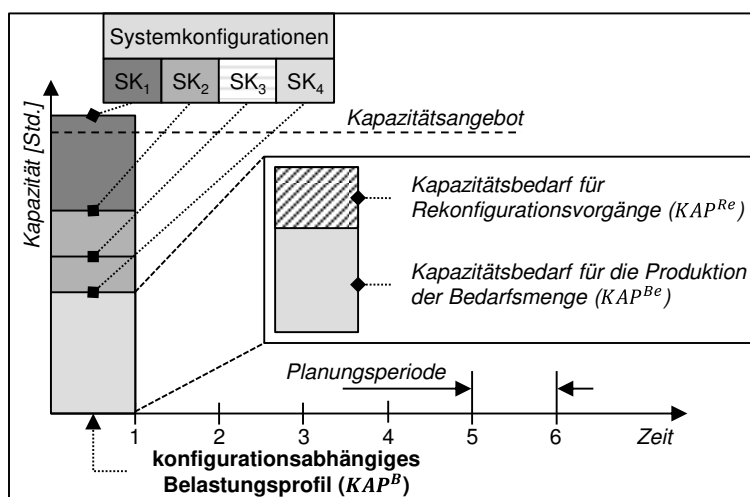


Abbildung 39: Konfigurationsabhängiges Belastungsprofil
(in Anlehnung an HEES ET AL. 2016C)

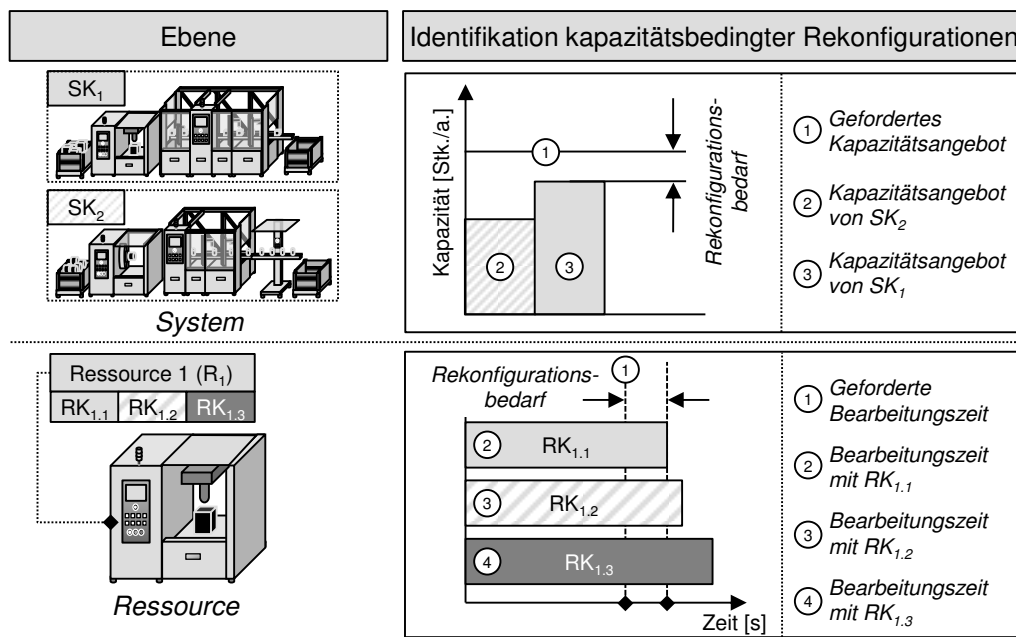
Der Kapazitätsbedarf (KAP^{Be}) setzt sich zum einen aus der Bedarfsmenge (m^B) der jeweiligen Planungsperiode und der konfigurationspezifischen Taktzeit (t_k) des Systems zusammen (vgl. Formel (13)). Darüber hinaus ist zum anderen der Kapazitätsbedarf für die Rekonfigurationsvorgänge (KAP^{Re}) zu berücksichtigen. Dieser wird aus den Rekonfigurationsaufwänden der einzelnen Produktionsressourcen berechnet und ist in Formel (11) in Abschnitt 6.4.3 im Detail dargestellt.

$$KAP^B = KAP^{Be} + KAP^{Re} = t_k \cdot m^B + KAP^{Re} \quad (13)$$

mit

KAP^B	konfigurationsabhängiges Belastungsprofil (Zeit)
KAP^{Be}	Kapazitätsbedarf (Zeit) für die Bedarfsmenge
KAP^{Re}	Kapazitätsbedarf (Zeit) für Rekonfigurationsvorgänge
m^B	Bedarfsmenge
t_k	Taktzeit mit Systemkonfiguration k

Anschließend werden die generierten Belastungsprofile mit dem Kapazitätsangebot abgeglichen. Zwei Beispiele auf den Ebenen System und Ressource sind in Abbildung 40 dargestellt.



Legende:

RK_{ij} : Ressourcenkonfiguration j von Ressource i
 SK_k : Systemkonfiguration k

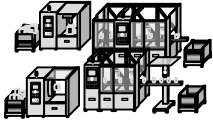
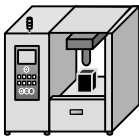
Abbildung 40: Kapazitätsabgleich für rekonfigurierbare Produktionssysteme auf Basis von Ausbringungsmengen und Bearbeitungszeiten

7 Methode zur Produktionsplanung

Für den Fall, dass keine Konfiguration zur Erfüllung der Anforderungen identifiziert werden kann, sind die Identifikation von Rekonfigurationen und die Bereitstellung von Anpassungsmaßnahmen notwendig. Auf der Systemebene können Rekonfigurationsbedarfe z. B. durch den Vergleich der geforderten mit den möglichen Kapazitätsangeboten identifiziert werden. Sollten die geforderten Bereiche maßgeblich von den möglichen Kapazitäten der bekannten Systemkonfigurationen abweichen, wird eine Rekonfiguration des kompletten Systems über den bisherigen Fähigkeitsbereich hinaus notwendig. Des Weiteren können Rekonfigurationen für Produktionsressourcen mit einem Kapazitätsabgleich erfasst werden. Hierzu wird die Differenz zwischen den konfigurationsabhängigen Bearbeitungszeiten, die für das konfigurationsabhängige Belastungsprofil maßgebend sind, und der geforderten Bearbeitungszeit bestimmt. Über- oder unterschreitet diese Differenz einen definierten Toleranzbereich, wird eine Rekonfiguration notwendig. Neben den bekannten Anpassungsmaßnahmen im Rahmen des Kapazitätsabgleichs, wie z. B. zusätzliche Schichten (vgl. Abschnitt 2.4.2), bieten rekonfigurierbare Produktionssysteme die Möglichkeit, mithilfe von Rekonfigurationsvorgängen die Kapazitäten zu skalieren.

Kapazitätsbedingte Rekonfigurationen können notwendig werden, wenn der Fähigkeitsbereich des Produktionssystems bzw. der Produktionsressourcen zur Bearbeitung des Produktionsprogramms nicht mehr ausreichend ist. Im Mittelpunkt der Anpassung der Konfigurationen in ihrer Kapazität stehen die in Abbildung 41 aufgeführten ebenenspezifischen und nach zeitlichen Kriterien aufgeteilten Maßnahmen. Grundsätzlich ist zu beachten, dass die Maßnahmen einen unterschiedlich starken Einfluss auf die resultierenden Kapazitäten haben und somit in Abhängigkeit des geforderten Rekonfigurationsbedarfs eingesetzt werden können. Des Weiteren können die Maßnahmen in Folge von Über- und Unterkapazitäten angewandt werden. Im Allgemeinen wird der Umfang der verfügbaren Kapazitäten durch Hinzufügen oder Entfernen von Ressourcen bzw. Modulen gesteigert oder verringert und damit die Möglichkeit zur Rekonfiguration geschaffen. In Bezug auf die Ebene des Produktionssystems stehen mittel- bis langfristige Maßnahmen im Vordergrund, die durch Hinzufügen oder Entfernen von Produktionsressourcen eine Skalierung der verfügbaren Kapazität herbeiführen. Beispielsweise kann eine Ressource dupliziert und somit die mögliche Taktzeit für eine Produktionsstufe angepasst werden. Einhergehend mit dieser Maßnahme sind hohe Rekonfigurationsaufwände. Kurzfristige Maßnahmen zur systemseitigen Anpassung der Kapazität sind nicht möglich. Die Schwerpunkte für die Produktionsressourcen bilden einerseits die Anpassung der Zusammensetzung der Ressource durch das Hinzufügen oder Entfernen von einzelnen Modulen und

andererseits die Anpassung von Produktionsabläufen. Unter letzterem werden die Anpassung der Maschinenbelegung sowie die Veränderung der Losgrößen zusammengefasst. Durch die Maßnahmen zur ressourcenbezogenen Anpassung kann die Skalierung der Produktionskapazitäten auf der Ebene der Ressourcen für notwendige Rekonfigurationen durchgeführt werden. Die Anpassung der Ressourcenzusammensetzung kann mittel- bis langfristig und kurzfristig mit erhöhten Aufwänden erfolgen. Auf den Maßnahmen zur Anpassung der Produktionsabläufe basierend kann ferner die zeitliche und mengenmäßige Bearbeitung einzelner Aufträge beeinflusst werden. Dies kann kurzfristig und mit geringem Aufwand umgesetzt werden. Sofern die Rekonfigurationsbedarfe durch die Maßnahmen gedeckt werden können, ist die Generierung der Konfigurationsalternativen erneut auszuführen.

Ebene	Zeithorizont			
	mittel- bis langfristig		kurzfristig	
	Maßnahme	Aufwand	Maßnahme	Aufwand
 System	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hinzufügen o. Entfernen von Ressourcen 	■ ■ ■		
 Ressource	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hinzufügen o. Entfernen von ressourcen-spezifischen Modulen 	■ ■ □	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hinzufügen o. Entfernen von ressourcen-spezifischen Modulen ▪ Anpassung der Maschinenbelegung ▪ Anpassung der Losgrößen 	■ ■ □ ■ □ □ ■ □ □

Legende:

- □ □ Geringer Rekonfigurationsaufwand
- ■ □ Mittlerer Rekonfigurationsaufwand
- ■ ■ Hoher Rekonfigurationsaufwand

Abbildung 41: Ausgewählte Maßnahmen mit beispielhafter Bewertung zur Anpassung von Konfigurationen hinsichtlich der Kapazität

Die entwickelten Möglichkeiten für die Kapazitätsabstimmung ermöglichen die Nutzung der Skalierbarkeit rekonfigurierbarer Produktionssysteme im Rahmen der Produktionsplanung und werden der Produktionsablaufplanung für die Auswahl und Festlegung der Konfigurationsalternativen zur Verfügung gestellt. Weiterhin dienen die Maßnahmen zur Anpassung von System- und Ressourcenkonfigurationen hinsichtlich ihrer Kapazität zur Erweiterung bzw. Anpassung des Konfigurationsbereichs.

7.5 Produktionsablaufplanung

7.5.1 Allgemeines

Im Rahmen der nachfolgenden Abschnitte wird die Produktionsablaufplanung vorgestellt, welche das zentrale Element der Methode zur Produktionsplanung darstellt. Die Produktionsablaufplanung hat zur Aufgabe, mithilfe des Produktionsprogramms und der Konfigurationsalternativen einen Produktionsplan für den Planungszeitraum entsprechend den Eingangsdaten aus der Produktionsbedarfs- und Ressourcenplanung festzulegen. Dies ist vor allem dadurch begründet, dass die Betriebs- und Produktionskosten eines rekonfigurierbaren Produktionssystems nach KOREN ET AL. (1999) insbesondere von der Wahl der Konfiguration abhängig sind. Auf Basis der Erkenntnisse der vorherigen Schritte wird ein mathematisches Modell für die Ablaufplanung vorgestellt, welches unter Einhaltung verschiedener, durch reale Gegebenheiten bestimmter Nebenbedingungen im Ergebnis eine kostenminimale Ressourcenkonfiguration determiniert sowie u. a. Losgrößen, Termine und Reihenfolgen der Produktion festlegt. Die Anwendung der Produktionsablaufplanung ist dabei nicht auf fixe Zeiträume beschränkt, sondern kann über die entsprechende Wahl der Makro- und Mikroperioden an den Planungszeitraum angepasst werden.

In den nachfolgenden Abschnitten wird von den notwendigen Annahmen ausgehend (vgl. Abschnitt 7.5.2) das Modell für die Produktionsablaufplanung formuliert, das in HEES ET AL. (2016C) veröffentlicht ist. Dieses besteht aus einer Zielfunktion und den entsprechenden Nebenbedingungen (vgl. Abschnitt 7.5.3). Des Weiteren werden das Lösungsverfahren und die Entscheidungsgrößen im Detail beschrieben (vgl. Abschnitt 7.5.4).

7.5.2 Annahmen

In Vorbereitung für die nachfolgende Formulierung des Modells für die Produktionsablaufplanung werden die wesentlichen Rahmenbedingungen und Annahmen für die Anwendung des Modells aufgeführt. Diese beinhalten insbesondere die Rahmenbedingungen und die Betrachtungsweise der Produktionskapazitäten.

Als Planungsobjekt wird ein rekonfigurierbares Produktionssystem in den Fokus der Betrachtungen gestellt. Mithilfe der in den vorherigen Kapiteln und Abschnitten dargestellten Ansätze wird das Verhalten des Systems abgebildet. Im Speziellen werden die prädiktive Skalierbarkeit der Kapazität sowie die Anpas-

sung der Funktionalität in das Modell integriert. Die Produktion unterschiedlicher Produkte, die mithilfe des Technologieabgleichs in ihren Arbeitsvorgängen den möglichen Ressourcenkonfigurationen zugeordnet sind, erfolgt sequentiell in den in Abschnitt 7.3.2 eingeführten Makro- und Mikroperioden. Des Weiteren wird die Ausbringungsmenge des Produktionssystems durch ein Produktionsprogramm koordiniert, wobei Losgrößen, Produktionsreihenfolgen und Konfigurationen so gewählt werden sollen, dass die produktspezifische Nachfrage der Makroperioden möglichst kostengünstig bedient werden kann. Die dynamische Nachfrage ist dabei für jede Makroperiode gegeben und wird am Ende der Makroperiode durch die Produktionsmenge und den Lagerbestand gedeckt. Die produzierten Produkte können zudem bis zu einer maximalen Lagerkapazität eingelagert werden. Für die Einlagerungsvorgänge fallen Lagerhaltungskosten an.

Die einzelnen Ressourcenkonfigurationen sowie die daraus resultierenden Konfigurationsalternativen (vgl. Abschnitt 7.4.3) unterscheiden sich sowohl in ihrer Funktionalität als auch in ihrer möglichen Kapazität über die Bereitstellung konfigurationsabhängiger Bearbeitungszeiten. Die Skalierung der Kapazität kann dabei zur Anpassung des Leistungspotenzials des Produktionssystems genutzt werden. Im Falle eines Rekonfigurationsvorgangs müssen die hierfür notwendigen Kapazitätsbedarfe berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 7.4.5). Weiterhin werden die Aufwände für die Rekonfigurationen durch die Rekonfigurationsmatrix (vgl. Abschnitt 6.3.4) abgebildet und im Rahmen der Produktionsablaufplanung verwendet. Ein Produktionssystem kann zudem nur eine Konfiguration aus dem Konfigurationsbereich je Mikroperiode einnehmen.

In Bezug auf die Kapazität wird von der Annahme ausgegangen, dass das vorgegebene Kapazitätsangebot, das durch die verfügbare Arbeitszeit dargestellt wird, für die einzelnen Makro- und Mikroperioden nicht überschritten werden darf. Als Folge muss sich das Produktionssystem mittels Rekonfigurationen an das Angebot anpassen und die bereitgestellte Kapazität entsprechend skalieren.

7.5.3 Modellformulierung

Für die Realisierung der Produktionsablaufplanung wird nachfolgend die Modellformulierung vorgenommen. In Abbildung 42 sind der strukturelle Aufbau und die einzelnen Elemente des Modells für die Produktionsablaufplanung im Detail dargestellt. Im besonderen Fokus dieses Abschnitts stehen dabei die Eingangsparameter, die Formulierung der Zielfunktion sowie die Darlegung der notwendigen Nebenbedingungen. Weiterhin werden die bisherigen Erkenntnisse

7 Methode zur Produktionsplanung

aus den vorherigen Abschnitten sowie aus den Modellierungs- und Beschreibungsansätzen aus Kapitel 6 bei der Modellformulierung berücksichtigt.

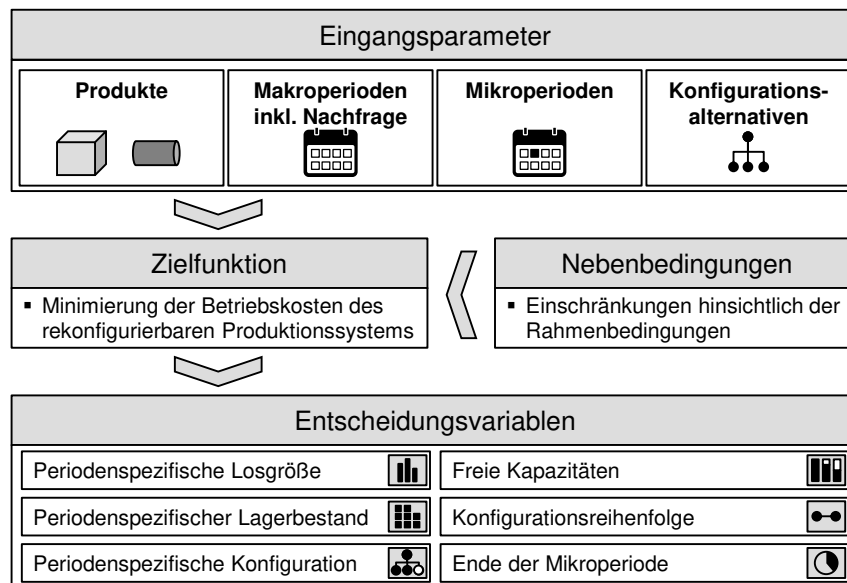


Abbildung 42: Strukturelle Aufbau und einzelne Elemente des Modells für die Produktionsablaufplanung

7.5.3.1 Eingangsparameter

Die notwendigen Eingangsparameter für das Modell der Produktionsablaufplanung sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Als wesentliche Planungsgrundlage wird die Menge der Produkte (P) gesehen. Die Produkte sind zudem jeweils durch einen konfigurationsabhängigen Arbeitsplan beschrieben und den möglichen Ressourcenkonfigurationen zugeordnet.

$p \in P := \{1, \dots, P^{max}\}$	Menge der Produkte, wobei P^{max} die Anzahl der zu produzierenden Produktvarianten ist
$t \in T := \{1, \dots, T^{max}\}$	Menge der Makroperioden; Länge der Periode gegeben; Nachfragedaten sind in dieser Zeiteinheit gegeben
$s \in S := \{1, \dots, S^{max}\}$	Menge der Mikroperioden; Länge der Periode wird frei innerhalb einer Makroperiode gewählt
$k \in K := \{1, \dots, K^{max}\}$	Menge der systemseitigen Konfigurationsalternativen aus dem Konfigurationsbereich

Tabelle 3: Übersicht der Eingangsparameter

Des Weiteren finden als Eingangsdaten die Menge der definierten Makroperioden (T) Berücksichtigung. Diese sind zudem durch eine periodenspezifische Nachfrage in Abhängigkeit der definierten Produkte spezifiziert. Darüber hinaus wird die Menge der Mikroperioden (S), die in ihrer Länge im Rahmen der Produktionsablaufplanung festgelegt werden, als Eingangsparameter aufgenommen. Auf der Seite des Produktionssystems sind als elementare Eingangsdaten die Menge der systemseitigen Konfigurationsalternativen (K) aus dem Konfigurationsbereich aufzuführen.

7.5.3.2 Zielfunktion

Das Ziel der Produktionsablaufplanung ist die Bestimmung der Entscheidungsvariablen, sodass die Betriebskosten des rekonfigurierbaren Produktionssystems bei der Herstellung eines gegebenen Produktionsprogramms minimiert werden. Die formulierte Zielfunktion ist in Formel (14) dargestellt.

$$\begin{aligned} \min c^{ges} = & \sum_{k \in K} \sum_{l \in K} \sum_{s \in S} \eta_{kls} \cdot t_{kl}^{Re} \cdot c^{Re} + \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} q_{p,s,k} \cdot t_k \cdot c_k \\ & + \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} c_p^L \cdot y_{p,t} + \sum_{s \in S} t_s^{leer} \cdot c^{leer} \end{aligned} \quad (14)$$

mit	c^{ges}	Gesamtkosten im betrachteten Planungszeitraum
	η_{kls}	Indikator für den Rekonfigurationsvorgang von Systemkonfiguration k nach l am Ende der Mikroperiode s
	t_{kl}^{Re}	Rekonfigurationszeit von Konfiguration k zu l
	c^{Re}	Rekonfigurationskosten für den Rekonfigurationsvorgang
	$q_{p,s,k}$	Losgröße von Produkt p in Periode s unter Konfiguration k
	t_k	Bearbeitungszeit mit Systemkonfiguration k
	c_k	Bearbeitungskosten je Zeiteinheit mit Konfiguration k
	c_p^L	Lagerkosten von Produkt p pro Makroperiode t
	$y_{p,t}$	Lagerbestand von Produkt p am Ende der Makroperiode t
	t_s^{leer}	Leerzeit in der Mikroperiode s
	c^{leer}	Leerkosten je Zeiteinheit

Die einzelnen Bestandteile der Zielfunktionen sind die Rekonfigurationskosten, die Bearbeitungskosten, die Lagerkosten sowie die Kosten für die Leerzeiten. Im Speziellen repräsentieren die Leerzeiten die freien Kapazitäten und entstehen beim Stillstand des Produktionssystems. Dies kann z. B. der Fall sein, wenn die vorgesehene Produktionsmenge bereits abgearbeitet wurde, obwohl in der jewei-

7 Methode zur Produktionsplanung

ligen Periode noch Arbeitszeit zur Verfügung steht. Die Berechnung der Rekonfigurationskosten wird mithilfe der Rekonfigurationsmatrix (vgl. Abschnitt 6.3.4) sowie dem erfahrungswertbasiertem Zeitfaktor durchgeführt. Der Zusammenhang ist in Formel (15) dargestellt.

$$t_{kl}^{Re} = \sum_{i=1}^{i^{max}} \alpha_t \cdot A_{mj}^{Ri} \quad (15)$$

mit t_{kl}^{Re} Rekonfigurationszeit von Konfiguration k nach l
 A_{mj}^{Ri} Rekonfigurationsaufwand für den Wechsel von Konfiguration m nach j bei Produktionsressource i
 α_t erfahrungswertbasierter Zeitfaktor

In der Berechnung der Rekonfigurationszeiten werden die Rekonfigurationsaufwände mit einem erfahrungswertbasierten Zeitfaktor (α_t) für die Rekonfigurationsvorgänge der einzelnen Ressourcen multipliziert. Aus den ressourcenspezifischen Rekonfigurationszeiten lässt sich anschließend die Rekonfigurationszeit (t_{kl}^{Re}) als Summe aller einzelnen Zeitanteile berechnen. Eine Berücksichtigung von Lagerkosten wird in dem vorliegenden Modell eingeführt, da sonst bereits in der Anlaufphase der Produktionsablaufplanung hohe Bestände zur Minimierung der Rekonfigurationskosten aufgebaut werden.

7.5.3.3 Nebenbedingungen

Neben den Eingangsparametern und den Annahmen sind zur Erreichung der Zielsetzung Einschränkungen hinsichtlich der Rahmenbedingungen für die Produktionsablaufplanung vorzunehmen. Diese ermöglichen die Berücksichtigung realer Produktionsbedingungen und sind für die Validierung des Modells notwendig. Im Allgemeinen können die Variablen hierbei reelle Zahlenwerte annehmen, sich auf ganzzahlige Werte oder auf Binärzahlen beschränken. Nachfolgend werden die notwendigen Nebenbedingungen formuliert und spezifiziert.

Die ersten beiden Nebenbedingungen der Produktionsablaufplanung stellen die Bestandsgleichungen für die erste Planungsperiode (16) sowie für die darauffolgenden Makroperioden (17) dar. Der Lagerbestand der jeweiligen Produkte berechnet sich aus der Summe des Lagerbestands der Vorperiode und der Produktionsmenge abzüglich der vorliegenden produktspezifischen Nachfrage für die jeweilige Periode.

$$y_{p,1} = y_{p,0} + \sum_{k \in K} \sum_{s \in S_t} q_{p,1,k} - m_{p,1}^B \quad \forall p \in P, t \in \{1\} \quad (16)$$

$$y_{p,t} = y_{p,t-1} + \sum_{k \in K} \sum_{s \in S_t} q_{p,s,k} - m_{p,t}^B \quad \forall t \in T \setminus \{1\}, p \in P \quad (17)$$

mit	$y_{p,t}$	Lagerbestand von Produkt p in der Makroperiode t
	$y_{p,t-1}$	Lagerbestand von Produkt p in der vorherigen Makroperiode
	$y_{p,1}$	Lagerbestand von Produkt p in der ersten Makroperiode
	$y_{p,0}$	Lagerbestand von Produkt p zu Planungsbeginn
	$q_{p,s,k}$	Losgröße von Produkt p in Mikroperiode s unter Systemkonfiguration k
	$q_{p,1,k}$	Losgröße von Produkt p in der ersten Mikroperiode unter Systemkonfiguration k
	$m_{p,t}^B$	Bedarfsmenge von Produkt p in der Makroperiode t
	$m_{p,1}^B$	Bedarfsmenge von Produkt p in der ersten Makroperiode

Des Weiteren stellen die Nebenbedingungen (18) und (19) sicher, dass die Losgrößen sowie die Lagerbestände in den Planungsperioden keine negativen Werte annehmen. Die Einhaltung der maximalen Lagerkapazität für jedes Produkt wird durch die Restriktion (20) sichergestellt.

$$q_{p,s,k} \geq 0 \quad \forall p \in P, s \in S, k \in K \quad (18)$$

$$y_{p,t} \geq 0 \quad \forall p \in P, t \in T \quad (19)$$

$$y_{p,t} \leq y_p^{max} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (20)$$

mit	$y_{p,t}$	Lagerbestand von Produkt p in der Makroperiode t
	y_p^{max}	maximale Lagerkapazität von Produkt p
	$q_{p,s,k}$	Losgröße von Produkt p in Mikroperiode s unter Systemkonfiguration k

Mit der Nebenbedingung (21) wird die Produktionskapazität beschrieben. Hierbei dürfen die resultierenden Rekonfigurationszeiten und die notwendigen Bearbeitungszeiten die verfügbare Arbeitszeit der Makroperiode, die als Kapazitätsgrenze fungiert, nicht überschreiten. Die Kapazität einer Mikroperiode bestimmt sich über den Anfangs- und den Endzeitpunkt.

7 Methode zur Produktionsplanung

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in K} \eta_{kls} \cdot t_{kl}^{Re} + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} q_{p,s,k} \cdot t_k \quad \forall s \in S \quad (21)$$

$$\leq KAP_{T_s} (\tau_s - \tau_{s-1})$$

mit	$q_{p,s,k}$	Losgröße von Produkt p in Mikroperiode s unter Systemkonfiguration k
	t_{kl}^{Re}	Rekonfigurationszeit von Konfiguration k nach l
	t_k	Bearbeitungszeit mit Systemkonfiguration k
	KAP_{T_s}	maximales Kapazitätsangebot (Zeit) der Makroperiode
	T_s	entsprechende Makroperiode der Mikroperiode s
	τ_s	Endzeitpunkt der Mikroperiode s
	τ_{s-1}	Endzeitpunkt der vorherigen Mikroperiode
	η_{kls}	Indikator für Wechsel von Konfiguration k zu l am Ende der Mikroperiode s

Ein Produkt kann ausschließlich mit der jeweiligen Konfigurationsalternative produziert werden, wenn die vorliegende Konfiguration ($\delta_{ks} = 1$) mit dem Produkt in Abhängigkeit der Produkt-Konfigurations-Kompatibilitäts-Matrix (vgl. Abschnitt 7.4.3) kompatibel ist ($z_{pk} = 1$). Dies wird durch die Nebenbedingung (22) sichergestellt. Darüber hinaus muss in jeder Mikroperiode genau eine Konfigurationsalternative vorliegen (23). Rekonfigurationsvorgänge können zudem nur maximal einmal je Mikroperiode durchgeführt werden (24).

$$q_{p,s,k} \cdot t_k \leq KAP_{T_s} \cdot \delta_{ks} \cdot z_{pk} \quad \forall p \in P, s \in S, k \in K \quad (22)$$

$$\sum_{k \in K} \delta_{ks} = 1 \quad \forall s \in S \quad (23)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in K} \eta_{kls} = 1 \quad \forall s \in S \quad (24)$$

mit	$q_{p,s,k}$	Losgröße von Produkt p in Mikroperiode s unter Systemkonfiguration k
	t_k	Bearbeitungszeit mit Systemkonfiguration k
	KAP_{T_s}	maximales Kapazitätsangebot (Zeit) der Makroperiode
	T_s	entsprechende Makroperiode der Mikroperiode s
	η_{kls}	Indikator für Wechsel von Konfiguration k zu l am Ende der Mikroperiode s
	δ_{ks}	Konfigurationszustand des Produktionssystems in der Mikroperiode s
	z_{pk}	Kompatibilität zwischen Produkt p und der Konfiguration k (Produkt-Konfigurations-Kompatibilitäts-Matrix)

Die Nebenbedingung (25) beschreibt die Verknüpfung zwischen dem Indikator des Konfigurationszustandes und dem Indikator des Rekonfigurationsvorgangs. Die Startkonfiguration für das Lösungsverfahren wird durch die Restriktion (26) festgelegt.

$$\delta_{k,s-1} + \delta_{ls} - 1 \leq \eta_{kls} \quad \forall k \in K, l \in K, s \in S \setminus \{1\} \quad (25)$$

$$\delta_{k1} = \delta_{k0} \quad \forall k \in K \quad (26)$$

mit	η_{kls}	Indikator für Wechsel von Konfiguration k zu l am Ende der Mikroperiode s
	δ_{ks}	Konfigurationszustand des Produktionssystems in der Mikroperiode s
	$\delta_{k,s-1}$	Konfigurationszustand in der vorherigen Mikroperiode
	δ_{ls}	Konfigurationszustand mit Systemkonfiguration l in der Mikroperiode s
	δ_{k1}	Konfigurationszustand in der ersten Mikroperiode
	δ_{k0}	Konfigurationszustand zu Planungsbeginn

Die Leerzeit (t_s^{leer}), d. h. die freie Kapazität in der Mikroperiode s , kann aus der verfügbaren Kapazität abzüglich der Rekonfigurations- und Bearbeitungszeiten mithilfe von Nebenbedingung (27) berechnet werden.

$$t_s^{leer} = KAP_{T_s} (\tau_s - \tau_{s-1}) - \sum_{k \in K} \sum_{l \in K} \eta_{kls} \cdot t_{kl}^{Re} - \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} q_{p,s,k} \cdot t_k \quad \forall s \in S \quad (27)$$

mit	$q_{p,s,k}$	Losgröße von Produkt p in Mikroperiode s unter Systemkonfiguration k
	t_{kl}^{Re}	Rekonfigurationszeit von Konfiguration k nach l
	t_k	Bearbeitungszeit mit Systemkonfiguration k
	t_s^{leer}	Leerzeit in der Mikroperiode s
	KAP_{T_s}	maximales Kapazitätsangebot (Zeit) der Makroperiode
	T_s	entsprechende Makroperiode der Mikroperiode s
	τ_s	Endzeitpunkt der Mikroperiode s
	τ_{s-1}	Endzeitpunkt der vorherigen Mikroperiode
	η_{kls}	Indikator für Wechsel von Konfiguration k zu l am Ende der Mikroperiode s

7 Methode zur Produktionsplanung

Eine Verknüpfung der Mikro- und Makroperioden wird durch die Nebenbedingung von TRANSCHEL ET AL. (2011) sichergestellt (28). Abschließend deklarieren (29) und (30) die Indikatoren für den Konfigurationszustand sowie für den Konfigurationswechsel als Binärvariablen.

$$\tau_{\bar{s}(t)} = t \quad \forall t \in T \quad (28)$$

$$\delta_{ks} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (29)$$

$$\eta_{kls} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, l \in K, s \in S \quad (30)$$

mit	$\bar{s}(t)$	letzte Mikroperiode der Makroperiode t
	$\tau_{\bar{s}(t)}$	Endzeitpunkt der letzten Mikroperiode
	η_{kls}	Indikator für Wechsel von Konfiguration k zu l am Ende der Mikroperiode s
	δ_{ks}	Konfigurationszustand des Produktionssystems in der Mikroperiode s

7.5.4 Lösungsverfahren und Entscheidungsvariablen

Die Produktionsablaufplanung hat zur Aufgabe, mithilfe des Produktionsprogramms und der Konfigurationsalternativen einen Produktionsplan für den Planungszeitraum entsprechend den Eingangsdaten aus der Produktionsbedarfs- und Ressourcenplanung festzulegen. Hierbei werden für die Mikroperioden die Ressourcenkonfiguration bestimmt sowie Losgrößen, Termine und Reihenfolgen der Produktion festgelegt. Mithilfe des mathematischen Modells, bestehend aus den Eingangsparametern, der Zielfunktion und den Nebenbedingungen, wird für ein bestehendes Produktionssystem für einen spezifischen Eingangsdatensatz anhand eines Branch-and-Bound-Verfahrens eine optimale Lösung für das gemischt-ganzzahlige Modell berechnet. Im Allgemeinen handelt es sich dabei um ein exaktes Verfahren, das die Menge des zulässigen Lösungsraums in Teilmengen (Branch) aufteilt (DOMSCHKE & DREXL 2007). Die Aufteilung erfolgt dabei in mindestens zwei Teilprobleme und kann für nachfolgende Teilmengen fortgeführt werden, sodass ein sogenannter Lösungsbaum entsteht. Hierbei repräsentiert der Ausgangsknoten das ursprüngliche Problem. Mithilfe von oberen und unteren Schranken (Bound) wird die Verzweigung in die Teillösungen beschränkt. Das Ziel ist dabei die Reduzierung des Berechnungsaufwandes sowie

die Elimination von nicht zielführenden Lösungsalternativen (DOMSCHKE & DREXL 2007). Für weitere Ausführungen zum Branch-and-Bound-Verfahren wird an dieser Stelle auf z. B. DOMSCHKE & DREXL (2007) verwiesen.

Das Ergebnis des Lösungsverfahrens wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit in einem Produktionsplan festgehalten. Dieser beinhaltet die mikroperiodenspezifischen Konfigurationen (δ_{ks}), die Konfigurationsreihenfolge (η_{kls}) sowie die periodenspezifischen Losgrößen ($q_{p,s,k}$). Weiterhin werden die Rekonfigurationszeitpunkte im Rahmen des Lösungsverfahrens über das Ende der Mikroperioden (τ_s) berechnet. Zusätzlich werden die resultierenden Lagerbestände der Makroperioden ($y_{p,t}$) ermittelt und dem Produktionsplan zugeordnet. Des Weiteren ermöglicht die Lösung des beschriebenen Optimierungsproblems die Berechnung der periodenspezifischen freien Kapazitäten (t_s^{leer}). In Kombination mit den Eingangsdaten lassen sich aus diesen Ergebnissen weitere planungsrelevante Daten ableiten. Beispielsweise können Aussagen hinsichtlich der Rekonfigurationsaufwände in den Makro- und Mikroperioden getroffen und bei der Erstellung zukünftiger Produktionsprogramme berücksichtigt werden. Als Ergebnis ermöglicht die Produktionsablaufplanung die Nutzung der Skalierbarkeit der Kapazitäten sowie die Anpassung von Funktionalitäten eines rekonfigurierbaren Systems im Rahmen der Produktionsplanung.

7.6 Fazit

Die Methode zur Produktionsplanung, bestehend aus der Produktionsbedarfs-, Ressourcen- und Produktionsablaufplanung, wurde im vorliegenden Kapitel als wesentliches Element des Planungssystems dargestellt. Der Ablauf der Methode wurde in Abschnitt 7.2 aufgezeigt. In der Produktionsbedarfsplanung (vgl. Abschnitt 7.3) wird ein Produktionsprogramm generiert und spezifiziert. Zudem werden aufbauend auf einem Technologieabgleich die Auftragsanforderungen in einen konfigurationsabhängigen Arbeitsplan überführt. Sollten Rekonfigurationen zur Erweiterung des Konfigurationsbereichs notwendig sein, so können sowohl der Rekonfigurationsbedarf ermittelt als auch Anpassungsmaßnahmen durchgeführt werden. Anschließend wurde in Abschnitt 7.4 die Ressourcenplanung entwickelt. Hierbei werden systemseitige Konfigurationsalternativen aus den Ressourcenspezifikationen generiert. Die Verknüpfung der Ergebnisse der Produktionsbedarfs- und Ressourcenplanung erfolgt abschließend durch die Generierung einer Produkt-Konfigurations-Kompatibilitäts-Matrix. Des Weiteren wurden Möglichkeiten zur rekonfigurationsorientierten Kapazitätsabstimmung

7 Methode zur Produktionsplanung

im Rahmen der Produktionsplanung aufgezeigt. Abschließend wurde mithilfe der Ergebnisse der vorherigen Planungsschritte die Produktionsablaufplanung (vgl. Abschnitt 7.5) für die Festlegung eines Produktionsplans entwickelt. Im Speziellen wurde eine mathematische Modellbeschreibung formuliert, die die Minimierung der Produktionskosten eines rekonfigurierbaren Produktionssystems ermöglicht. Die Entscheidungsvariablen für die Planungsperioden des Modells sind die Konfigurationen, die Losgrößen, die Termine sowie die Reihenfolgen der Produktion.

Mithilfe der Kombination aus den Modellierungs- und Beschreibungsansätzen sowie den entwickelten Planungsfunktionen ist es möglich, die wesentliche Eigenschaft von rekonfigurierbaren Produktionssystemen im Rahmen der Produktionsplanung zu nutzen. Im nachfolgenden Kapitel 8 erfolgt die Anwendung und Validierung sowie die Bewertung des Planungssystems anhand eines realen Anwendungsbeispiels.

8 Anwendungsbeispiel und Bewertung

8.1 Allgemeines

Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme ermöglicht es, die vorteilhaften Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme in der Produktionsplanung zu nutzen. Das Ziel des vorliegenden Kapitels ist die Demonstration der Funktionsweise des Systems zur Produktionsplanung. Darüber hinaus wird die simulationsgestützte Umsetzung und Validierung anhand eines realen Anwendungsbeispiels aufgezeigt. Die Validierung soll insbesondere der Generierung und Interpretation von Aussagen über den Nutzen und die Leistungsfähigkeit des Planungssystems dienen. In Abschnitt 8.2 wird das Anwendungsbeispiel detailliert beschrieben. Darauf aufbauend erfolgt in Abschnitt 8.3 die Anwendung des Systems zur Produktionsplanung. Im Speziellen werden hier die Durchführung der Modellierungs- und Beschreibungsansätze aufgezeigt. Anschließend erfolgt in den nachfolgenden Abschnitten die Anwendung der Methode zur Produktionsplanung. Des Weiteren wird in Abschnitt 8.4 die simulationsgestützte Umsetzung und Validierung der Planungsmethode durchgeführt. Schließlich erfolgen in Abschnitt 8.5 eine qualitative Bewertung der in Kapitel 4 definierten Anforderungen sowie eine genaue Betrachtung des Aufwandes und des Nutzens unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Das Kapitel schließt mit einem Fazit in Abschnitt 8.6.

8.2 Anwendungsbeispiel

8.2.1 Anwendungsszenario

Für die prototypische Anwendung des Systems zur Produktionsplanung sowie für die simulationstechnische Umsetzung und Validierung wird eine beispielhafte Produktionslinie eines Automobilzulieferers betrachtet. Ausgehend von einer Produktspezifikation und einer Absatzplanung des Automobilherstellers wird die Produktion des Zulieferunternehmens geplant. Im Fokus der Betrachtungen steht die Produktion von Ventilen für Verbrennungsmotoren. Im vorliegenden Anwendungsszenario werden drei unterschiedliche Ventile als Produkte A, B und C betrachtet. Diese Produkte unterscheiden sich sowohl in ihrer jährlichen Nach-

fragemenge als auch hinsichtlich der zur Herstellung notwendigen Produktionsprozesse. Aufgrund der zunehmenden Variantenvielfalt und der damit notwendigen produktseitigen Anpassungen ist der Zulieferer gezwungen, häufige Adaptationen in der Produktion vorzunehmen. Weiterhin muss dieser mit Bedarfschwankungen umgehen und die Produktion an die marktseitigen Rahmenbedingungen anpassen können. Um diese Herausforderungen bewältigen zu können, wurde für diese Produktionslinie ein rekonfigurierbares Produktionssystem entwickelt und in Betrieb genommen. Ein solches System bietet die Möglichkeit, die Kapazitäten im Laufe des Lebenszyklus sowie in der Betriebsphase zu skalieren. Die Anwendung des Planungssystems erfolgt auf Basis des in Abschnitt 8.2.2 dargestellten produktionstechnischen Systems. Die Methode zur Produktionsplanung hat dabei die Aufgabe, einen konfigurationsspezifischen Produktionsplan auf Basis des Produktionsprogramms und der Produktbeschreibung für unterschiedliche Produktionsszenarien zu erstellen.

Zusammengefasst steht das vorgestellte Anwendungsszenario repräsentativ für die Herausforderungen mit denen produzierende Unternehmen konfrontiert werden. Insbesondere die Schwankung der Nachfragemengen sowie kurzfristige Änderungen führen zu einer hohen Komplexität in den Planungsabläufen. Folglich ist das beschriebene Anwendungsszenario für die Demonstration des Nutzens des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme geeignet.

8.2.2 Produktionstechnisches System

Die Ausgangsbasis für das Anwendungsbeispiel und die damit verbundene Validierung stellt ein Produktionssystem der *teamtechnik Maschinen und Anlagen GmbH* dar. Im Rahmen des Beispiels werden auf der Montage- und Prüflinie Ventile für die Automobilindustrie produziert. Die Produktionsanlage basiert dabei auf dem modularen Anlagenkonzept TEAMOS (vgl. Abbildung 43). Dieses bietet die Möglichkeit, auf Basis einer Modulplattform durch den Austausch von einzelnen Modulen Rekonfigurationen schnell und einfach durchzuführen. Weiterhin können Handarbeitsplätze für teilautomatisierte Systeme integriert werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich vollautomatisierte Produktionssysteme betrachtet. Mithilfe von sogenannten TEAMOS-Prozessträgern wird die Integration kundenspezifischer Prozessmodule sichergestellt. Der Austausch einzelner Module wird zudem durch standardisierte Schnittstellen gewährleistet. Die Skalierbarkeit der Kapazität kann durch die Erweiterung des Produktionssystems oder den Austausch einzelner Module er-

folgen. Weiterhin können durch den Austausch die Funktionen der einzelnen Produktionsressourcen angepasst werden. Die einzelnen Prozesse der Anlage umfassen u. a. einen Fügeprozess sowie abschließende Qualitätssicherungsprozesse. Die Kombination der unterschiedlichen Konfigurationen innerhalb des Konfigurationsbereichs ergeben die systemseitigen Konfigurationsalternativen (vgl. Abschnitt 7.4.3). Der Materialfluss wird zwischen den einzelnen Ressourcen durch Transfereinrichtungen realisiert und erfolgt vollautomatisiert.

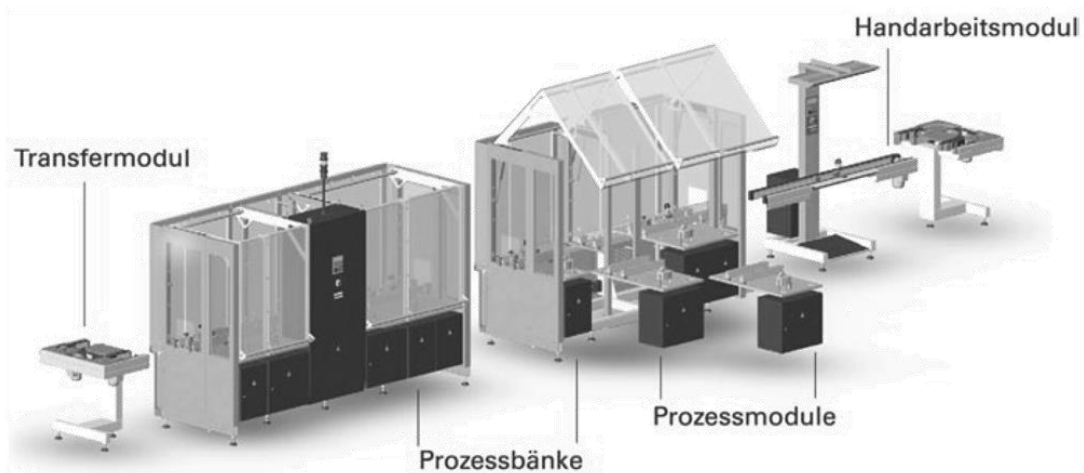


Abbildung 43: *TEAMOS-Plattform der teamtechnik Maschinen und Anlagen GmbH als Basis des produktionstechnischen Systems*
(Quelle: LOTTER 2012, S. 177)

8.3 Anwendung des Systems zur Produktionsplanung

8.3.1 Allgemeines

Im Rahmen des vorliegenden Unterkapitels wird die Anwendung des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme in den Fokus der Betrachtungen gestellt. Basierend auf den Ansätzen aus Kapitel 6 erfolgt in einem ersten Schritt die Modellierung und Beschreibung des Produktionssystems (vgl. Abschnitt 8.3.2). Darauf aufbauend werden die Produktionsbedarfsplanung (vgl. Abschnitt 8.3.3) und die Ressourcenplanung (vgl. 8.3.4) angewandt. Der letzte Schritt der Methode zur Produktionsplanung wird im nachfolgenden Abschnitt 8.4 simulationsgestützt anhand unterschiedlicher Produktionsszenarien des Anwendungsszenarios umgesetzt und validiert.

8.3.2 Modellierung und Beschreibung des Produktionssystems

Eine grundlegende Voraussetzung für die Anwendung des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme ist die Modellierung und Beschreibung des Produktionssystems. In einem ersten Schritt werden die Produktionsressourcen hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Konfigurationen beschrieben. Auf Basis der teamtechnik TEAMOS-Plattform sowie des Schutzrechts DE 10 2006 032 121 A1 wurde für die Anwendung des Planungssystems ein vereinfachtes Abbild der tatsächlichen Produktionslinie entwickelt. Das resultierende Produktionssystem ist in Abbildung 44 aufgezeigt.

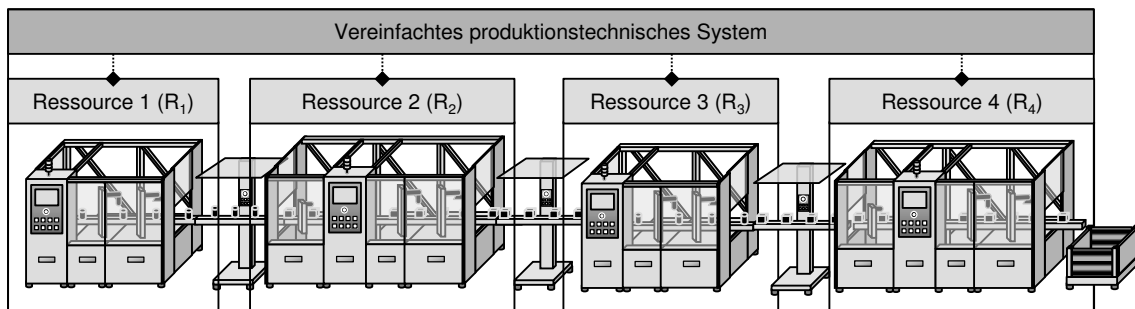
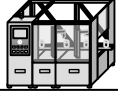





Abbildung 44: Vereinfachtes Layout des produktionstechnischen Systems

Das Produktionssystem besteht hierbei aus vier verketteten Produktionsressourcen, die durch den Austausch der Module, die spezifische Produktionsprozesse ausführen, unterschiedliche Ressourcenkonfigurationen einnehmen können. Beispielsweise können Ressource 1 und 3 drei unterschiedliche Konfigurationen annehmen. Der Konfigurationsbereich kann darüber hinaus mithilfe der beschriebenen Anpassungsmaßnahmen adaptiert werden. Die genauen Spezifikationen der einzelnen Produktionsressourcen inklusive der Beschreibung der jeweiligen Konfigurationen ist zusammenfassend in Tabelle 4 dargestellt. Hierbei sind alle möglichen Ressourcenkonfigurationen aufgeführt, die im Rahmen der Produktionsplanung für das Anwendungsszenario zur Verfügung stehen. Des Weiteren sind die Ressourcenfähigkeiten für die einzelnen Konfigurationen nach dem entwickelten Klassifikationsschema (vgl. Abschnitt 6.2.5) spezifiziert. Im Rahmen des Anwendungsbeispiels können die Ressourcenkonfigurationen in Abhängigkeit der verwendeten Module mehrere Fähigkeiten bereitstellen. Dies kann insbesondere bei aufwändigeren Herstellungsprozessen notwendig sein. Die Ressourcen 1 und 3 unterscheiden sich nicht in Bezug auf ihre Produktionsprozesse und dienen der Qualitätssicherung. Beispielsweise werden hier Hochspannungs- oder Leckageprüfungen durchgeführt. Die Ressourcen 2 und 4 hingegen weisen konfigurationsspezifische Produktionsverfahren auf, die in Abhängigkeit

8.3 Anwendung des Systems zur Produktionsplanung

der zu produzierenden Produkte benötigt werden. Hier stehen sowohl Füge- als auch Beschichtungsprozesse im Fokus der Betrachtungen.

Ressource	Max. Modulanzahl ($n_{M_i,ges}$)	Konfig.	Module	Ressourcenfähigkeiten	Verfahren
 R ₁	2	RK _{1,1}	M ₁	M-51	Prüfen
		RK _{1,2}	M ₂	M-51	Prüfen
		RK _{1,3}	M ₁ , M ₂	M-51	Prüfen
 R ₂	3	RK _{2,1}	M ₃	F-416	Federnd Einspreizen
		RK _{2,2}	M ₃ M ₄	F-416 F-413	Federnd Einspreizen Ineinanderschieben
		RK _{2,3}	M ₃ M ₅	F-416 F-412	Federnd Einspreizen Einlegen, Einsetzen
		RK _{2,4}	M ₄ M ₅	F-413 F-412	Ineinanderschieben Einlegen, Einsetzen
		RK _{2,5}	M ₃ M ₄ M ₅	F-416 F-413 F-412	Federnd Einspreizen Ineinanderschieben Einlegen, Einsetzen
 R ₃	2	RK _{3,1}	M ₆	M-51	Prüfen
		RK _{3,2}	M ₇	M-51	Prüfen
		RK _{3,3}	M ₆ , M ₇	M-51	Prüfen
 R ₄	3	RK _{4,1}	M ₈	F-517	Beschriften
		RK _{4,2}	M ₈ M ₉	F-517 F-516	Beschriften Bedrucken
		RK _{4,3}	M ₈ M ₁₀	F-517 F-592	Beschriften Chem. Beschichten
		RK _{4,4}	M ₉ M ₁₀	F-516 F-592	Bedrucken Chem. Beschichten
		RK _{4,5}	M ₈ M ₉ M ₁₀	F-517 F-516 F-592	Beschriften Bedrucken Chem. Beschichten

Legende:

- RK_{i,j}: Ressourcenkonfiguration j von Ressource i
- M_n: Modul n der Ressource i
- F/M: Fertigungs- bzw. Montageprozess

Tabelle 4: Übersicht der einzelnen Produktionsressourcen

Mithilfe der strukturellen Informationen, d. h. der Anzahl hinzugefügter und entfernter Produktionsmodule, wurden die Rekonfigurationszeiten für die jeweiligen Produktionsressource als Grundlage für die Ressourcenplanung berechnet. Hierbei wurden in einem ersten Schritt die Rekonfigurationsaufwände ermittelt und mit dem erfahrungswertbasierten Zeitfaktor (α_t) multipliziert (vgl. Formel (16)). Der erfahrungswertbasierte Zeitfaktor wurde durch ein Experteninterview mit 60 Minuten für einen kompletten Aufwandsfaktor veranschlagt. Diese relativ geringen Aufwände lassen sich durch den modularen Aufbau sowie die

8 Anwendungsbeispiel und Bewertung

standardisierten Schnittstellen der TEAMOS-Plattform rechtfertigen. Anpassungen, d. h. der Austausch der einzelnen Module, sind hiermit innerhalb kurzer Zeiten möglich. Mithilfe dieser Berechnungen lassen sich die Rekonfigurationszeiten auf Systemebene nach der Generierung der Konfigurationsalternativen ermitteln. Für das vorliegende Anwendungsbeispiel ist die Rekonfigurationsmatrix für die Produktionsressource 4 in Tabelle 5 exemplarisch dargestellt. Beispielsweise werden bei einem Wechsel von $RK_{4,1}$ auf $RK_{4,4}$ zwei Module hinzugefügt und ein Modul entfernt. Für die Produktionsressource sind maximal drei Funktionsmodule vorgesehen. Folglich fällt ein Rekonfigurationsaufwand A_{14}^{R4} in Höhe von 0,53 an. Der notwendige Aufwand für den Rekonfigurationsvorgang ist dabei als hoch einzustufen. Weiterhin ist die Matrix nicht symmetrisch. Die Rekonfigurations-Matrizen liegen nach diesem Planungsschritt für alle vorhandenen Produktionsressourcen des Produktionssystems vor.

A_{mj}^{R4}	$RK_{4,1}$	$RK_{4,2}$	$RK_{4,3}$	$RK_{4,4}$	$RK_{4,5}$
$RK_{4,1}$	0	0,20	0,20	0,53	0,40
$RK_{4,2}$	0,13	0	0,33	0,33	0,20
$RK_{4,3}$	0,13	0,33	0	0,33	0,20
$RK_{4,4}$	0,47	0,33	0,33	0	0,20
$RK_{4,5}$	0,27	0,13	0,13	0,13	0

Legende:

-
- $RK_{i,j}$: Ressourcenkonfiguration j von Ressource i
 A_{mj}^{Ri} : Rekonfigurationsaufwand auf Ressourcenebene für den Wechsel von Konfiguration m nach j bei Ressource i

Tabelle 5: Exemplarische Darstellung der Rekonfigurationsmatrix für die Produktionsressource 4

Nach Abschluss der Modellierung und Beschreibung des Produktionssystems des Anwendungsbeispiels liegen die Strukturierung des Systems mit den einzelnen Ressourcenkonfigurationen, die konfigurationsspezifischen Ressourcenfähigkeiten sowie die Aufwände für die möglichen Rekonfigurationsvorgänge der Produktionsressourcen vor. Im Anschluss werden die einzelnen Funktionen der Methode zur Produktionsplanung für das Anwendungsbeispiel durchgeführt.

8.3.3 Durchführung der Produktionsbedarfsplanung

Die Produktionsbedarfsplanung verfolgt das Ziel, die produktseitigen Anforderungen aufzunehmen und zu strukturieren. Im Rahmen des Anwendungsbeispiels

8.3 Anwendung des Systems zur Produktionsplanung

gilt es, die Produktion für die drei Produkte A, B und C ($P = 3$) in unterschiedlichen Produktionsszenarien für das vorliegende Produktionssystem zu planen. Im Fokus der Betrachtungen stehen insbesondere die Spezifikationen der einzelnen Schritte des Herstellungsprozesses. Die Nachfrageszenarien werden zum besseren Verständnis der Resultate in der simulationsbasierten Umsetzung und Validierung in Abschnitt 8.4 vorgestellt. Zunächst gilt es, die produktionstechnischen Anforderungen für die Herstellungsprozesse der einzelnen Ventile aufzunehmen. Für die drei Produkte ergeben sich die in Tabelle 6 aufgezeigten Arbeitsvorgänge sowie die hieraus resultierenden Klassifikationsnummern. Die Produktionsprozesse an den Ressourcen 1 und 3 sind für alle drei Produkte identisch. Dahingegen unterscheiden sich die notwendigen Fertigungs- und Montageprozesse in Abhängigkeit der Produkte an den Produktionsressourcen 2 und 4. Beispielsweise benötigt Produkt C im letzten Arbeitsvorgang ein Beschriftungsverfahren (z. B. Laserbeschriftung). Mithilfe der Klassifikationsnummern sowie des Technologieabgleichs (vgl. Abschnitt 7.3.3) können anschließend die Konfigurationen der vorherigen Modellierung den einzelnen Arbeitsvorgängen zugeordnet werden. Hierfür werden die einzelnen Fähigkeiten der Ressourcenkonfigurationen, die in Tabelle 4 dargestellt sind, mit den produktseitigen Anforderungen aus Tabelle 6 verglichen und anschließend zugeordnet.

Arbeitsvorgänge	Produktanforderungen		
	Produkt A	Produkt B	Produkt C
$A_{w.10}$	M-51	M-51	M-51
$A_{w.20}$	F-416	F-413	F-416
$A_{w.30}$	F-412	F-412	M-51
$A_{w.40}$	M-51	M-51	F-517
$A_{w.50}$	F-517	F-516	
$A_{w.60}$	F-592	F-592	

Legende:

$A_{w.v}$: Produktspezifischer Arbeitsvorgang v des Produktionsauftrages w
 F/M: Fertigungs- bzw. Montageprozess

Tabelle 6: Produktspezifische Arbeitsvorgänge und Klassifikationsnummern der herzustellenden Produkte A, B und C

In einem weiteren Schritt werden alle herzustellenden Produkte mithilfe des konfigurationsabhängigen Arbeitsplans (vgl. Abschnitt 7.3.5) beschrieben und spezifiziert. Da für das Anwendungsbeispiel aus Gründen der Geheimhaltung keine detaillierten Produktbeschreibungen veröffentlicht werden können, sind die dargestellten Daten repräsentativ angenommen. In Abbildung 45 ist der Arbeits-

8 Anwendungsbeispiel und Bewertung

plan für die Herstellung von Produkt A dargestellt. Darin sind die wesentlichen Arbeitsvorgänge, die resultierenden Bearbeitungszeiten sowie die Klassifikationsnummern enthalten. Weiterhin sind die Ressourcenkonfigurationen zugeordnet und hinterlegt. Die Kostenstellen und Lohngruppen sind für das vorliegende Anwendungsbeispiel aufgrund der Fokussierung auf automatisierte Produktionssysteme nicht weiter relevant und daher nicht aufgeführt.

Arbeitsplan					
Stückzahl:	Datum: 02.07.2016		Auftragsnummer: 2016-30		Zeichnung: 2016-1405
	Bearbeiter: J. Löhe				
Werkstoff: Ventilstahl	Bezeichnung: Ventil A		Abmessungen: ...	Fertiggewicht: 0,4 kg	
AVO	Arbeitsvorgang	Klassifikationsnummer	Ressource	Konfig.	t_{ij}^b [s]
$A_{30.10}$	Leckageprüfung	M-51	R_1	RK _{1,1} RK _{1,2} RK _{1,3}	10 8 4,5
$A_{30.20}$	Einspreizen der Hauptbaugruppe	F-416	R_2	RK _{2,1} RK _{2,2} RK _{2,3} RK _{2,5}	2,8 6,2 5 9,5
$A_{30.30}$	Einlegen, Einsetzen der Dichtung	F-412	R_2	RK _{2,3} RK _{2,4} RK _{2,5}	5 6,4 9,5
$A_{30.40}$	Hochspannungsprüfung	M-51	R_3	RK _{3,1} RK _{3,2} RK _{3,3}	10 8 4,5
$A_{30.50}$	Laserbeschriftung	F-517	R_4	RK _{4,1} RK _{4,2} RK _{4,3} RK _{4,5}	2,8 6,2 5 9,5
$A_{30.60}$	Beschichten der Oberfläche	F-592	R_4	RK _{4,3} RK _{4,4} RK _{4,5}	5 6,4 9,5

Legende:

AVO: Arbeitsvorgang

F/M: Fertigungs- bzw. Montageprozess

$A_{w,v}$: Produktspezifischer Arbeitsvorgang v des Produktionsauftrages w

RK _{i,j} : Ressourcenkonfiguration j von Ressource i

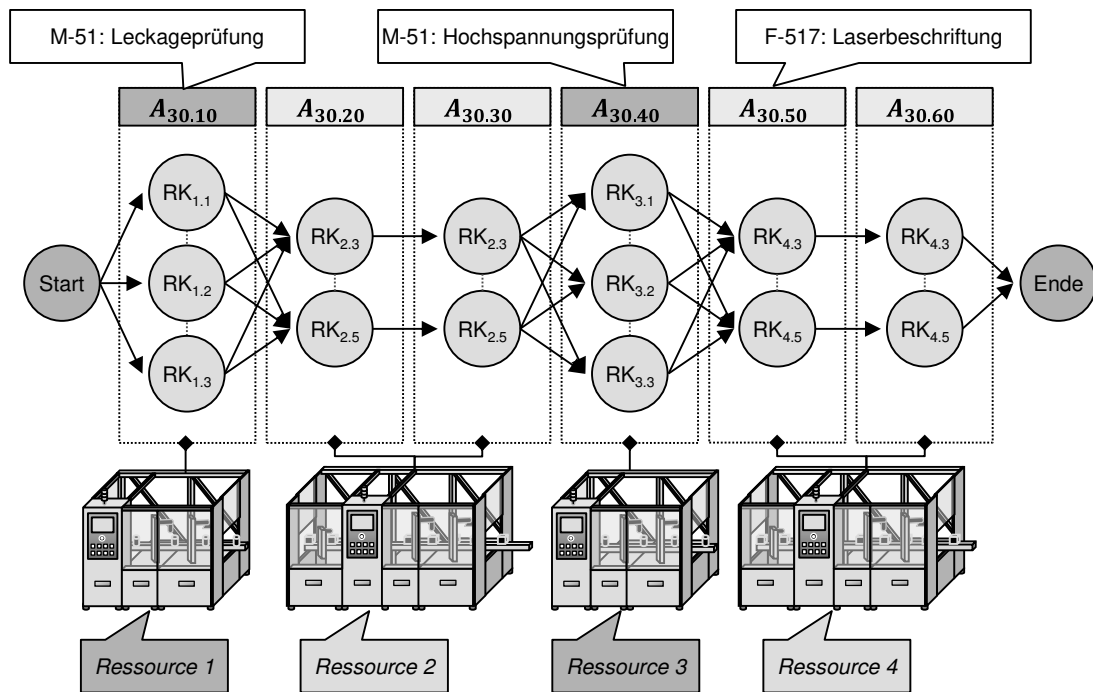
t_{ij}^b : konfigurationsabhängige Bearbeitungszeit

Abbildung 45: Exemplarischer Arbeitsplan inklusive der Arbeitsvorgänge für die Herstellung von Produkt A

Die bisherigen Ausführungen haben die konfigurationsabhängige Beschreibung von Produktanforderungen in den Fokus der Betrachtungen gestellt. Aus den Planungsergebnissen können zudem die konfigurationsabhängigen Herstellungsprozesse abgebildet und die darin enthaltenen Konfigurationsalternativen auf der

8.3 Anwendung des Systems zur Produktionsplanung

Ressourcenebene dargestellt werden. Damit können alle möglichen, ressourcenspezifischen Konfigurationsalternativen für die einzelnen Arbeitsvorgänge der jeweiligen Produkte dargestellt werden. Beispielsweise sind in Abbildung 46 die möglichen ressourcenspezifischen Konfigurationen für die Herstellung von Produkt A aufgezeigt. Hierbei wurden die Konfigurationsmöglichkeiten für die Arbeitsvorgänge $A_{30.20}$ und $A_{30.50}$ bereits eingeschränkt, da die Arbeitsvorgänge $A_{30.30}$ und $A_{30.60}$ nicht über die Möglichkeit verfügen, die Bearbeitung mit den Ressourcenkonfigurationen $RK_{2.1}$ und $RK_{2.2}$ bzw. $RK_{4.1}$ und $RK_{4.2}$ auszuführen. Des Weiteren werden die oben genannten Arbeitsvorgänge auf der gleichen Ressource ausgeführt. Ein Rekonfigurationsvorgang während der Bearbeitung ist folglich nicht vorgesehen.



Legende:

- $A_{w,v}$: Produktspezifischer Arbeitsvorgang v des Produktionsauftrages w
- $RK_{i,j}$: Ressourcenkonfiguration j von Ressource i
- F/M: Fertigungs- bzw. Montageprozess
- Konfigurationszustand
- Kante

Abbildung 46: Herstellungsgraph zur Darstellung der Konfigurationsalternativen für die Herstellung von Produkt A

Mit Durchführung der Produktionsbedarfsplanung sind die einzelnen Produkte in Bezug auf ihre Herstellungsprozesse vollständig beschrieben. Des Weiteren liegen die Arbeitspläne sowie die konfigurationsabhängigen Herstellungsalternativen für die zu produzierenden Produkte vor.

8.3.4 Anwendung der Ressourcenplanung

Mit der Anwendung der einzelnen Schritte der Ressourcenplanung wird das Ziel verfolgt, die möglichen systemseitigen Konfigurationsalternativen für die anschließende Produktionsablaufplanung zu generieren. Hierfür werden in einem ersten Schritt die Ressourcen mit den Ergebnissen der Produktionsbedarfsplanung hinsichtlich der Konfigurationen sowie den resultierenden Bearbeitungszeiten und -kosten konkretisiert. Die spezifizierten Ressourcenkonfigurationen dienen im weiteren Planungsvorgehen als wesentliche Eingangsparameter. Für die sich anschließende Generierung der Konfigurationsalternativen wird für das Anwendungsbeispiel die Konfigurations-Kombinations-Matrix in Tabelle 7 verwendet. Diese ermöglicht die Abbildung der Einschränkungen hinsichtlich der Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Ressourcenkonfigurationen. Es zeigt sich, dass insbesondere Inkompatibilitäten zwischen den Ressourcenkonfigurationen von Ressource 2 und 4 bestehen. Diese ermöglichen es, die möglichen Lösungsalternativen einzuschränken und die Rechenzeit zu beschleunigen.

M^{KM}	RK _{1,1}	RK _{1,2}	RK _{1,3}	RK _{2,1}	RK _{2,2}	RK _{2,3}	RK _{2,4}	RK _{2,5}	RK _{3,1}	RK _{3,2}	RK _{3,3}	RK _{4,1}	RK _{4,2}	RK _{4,3}	RK _{4,4}	RK _{4,5}			
RK _{1,1}	Konfigurationsbereich von Ressource 1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
RK _{1,2}				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
RK _{1,3}				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
RK _{2,1}	1	1	1	Konfigurationsbereich von Ressource 2					1	1	1	1	1	1	0	1			
RK _{2,2}	1	1	1						1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
RK _{2,3}	1	1	1						1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
RK _{2,4}	1	1	1						1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	
RK _{2,5}	1	1	1						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
RK _{3,1}	1	1	1	1	1	1	1	1	Konfigurationsbereich von Ressource 3			1	1	1	1	1			
RK _{3,2}	1	1	1	1	1	1	1	1				1	1	1	1				
RK _{3,3}	1	1	1	1	1	1	1	1				1	1	1	1				
RK _{4,1}	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	Konfigurationsbereich von Ressource 4							
RK _{4,2}	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1								
RK _{4,3}	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1								
RK _{4,4}	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1								
RK _{4,5}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1								

Legende:

RK_{i,j}: Ressourcenkonfiguration j von Ressource i

0: Kombination nicht zulässig

1: Kombination zulässig

Tabelle 7: Konfigurations-Kombinations-Matrix (M^{KM}) zur Abbildung der Kombinationsmöglichkeiten des Anwendungsbeispiels

Auf Basis der Ressourcenspezifikationen und der Ergebnisse der Produktionsbedarfsplanung sowie unter Berücksichtigung der Konfigurations-Kombinations-

8.3 Anwendung des Systems zur Produktionsplanung

Matrix werden die systemseitigen Konfigurationsalternativen durch die Kombination der einzelnen Ressourcenkonfigurationen erstellt. Tabelle 8 stellt einen Auszug der möglichen Systemkonfigurationen einschließlich der Kompatibilitäten mit den Produkten dar. Insgesamt wurden die möglichen Alternativen für das Beispiel auf 72 Systemkonfigurationen eingeschränkt. Die jeweiligen Taktzeiten der Systemkonfigurationen ergeben sich aus der Taktzeit der Engpassressource. Hierbei wird ersichtlich, dass sich die jeweiligen Konfigurationen sowohl in ihrer Funktionalität, d. h. der möglichen Produkte, als auch in ihren konfigurationsabhängigen Taktzeiten unterscheiden. Darüber hinaus sind in der Tabelle auch die Stundensätze für die einzelnen Systemkonfigurationen aufgeführt.

System-konfiguration	Ressource 1	Ressource 2	Ressource 3	Ressource 4	Taktzeit t_k [s]	Stundensatz c_k [€/h]	Produkt-Kompatibilität		
							Produkt A	Produkt B	Produkt C
SK ₁	RK _{1,1}	RK _{2,1}	RK _{3,1}	RK _{4,1}	10	43	0	0	1
SK ₂	RK _{1,1}	RK _{2,1}	RK _{3,1}	RK _{4,2}	10	60	0	0	1
SK ₃	RK _{1,1}	RK _{2,1}	RK _{3,1}	RK _{4,3}	10	52	0	0	1
SK ₄	RK _{1,1}	RK _{2,1}	RK _{3,1}	RK _{4,5}	10	53	0	0	1
SK ₅	RK _{1,1}	RK _{2,1}	RK _{3,2}	RK _{4,1}	10	60	0	0	1
SK ₆	RK _{1,1}	RK _{2,1}	RK _{3,2}	RK _{4,2}	10	76	0	0	1
SK ₇	RK _{1,1}	RK _{2,1}	RK _{3,2}	RK _{4,3}	10	68	0	0	1
SK ₈	RK _{1,1}	RK _{2,1}	RK _{3,2}	RK _{4,5}	10	69	0	0	1
SK ₉	RK _{1,1}	RK _{2,1}	RK _{3,3}	RK _{4,1}	10	81	0	0	1
SK ₁₀	RK _{1,1}	RK _{2,1}	RK _{3,3}	RK _{4,2}	10	97	0	0	1
SK ₁₁	RK _{1,1}	RK _{2,1}	RK _{3,3}	RK _{4,3}	10	89	0	0	1
SK ₁₂	RK _{1,1}	RK _{2,1}	RK _{3,3}	RK _{4,5}	10	90	0	0	1
SK ₁₃	RK _{1,1}	RK _{2,2}	RK _{3,1}	RK _{4,2}	10	77	0	0	1
SK ₁₄	RK _{1,1}	RK _{2,2}	RK _{3,1}	RK _{4,3}	10	68	0	0	1
SK ₁₅	RK _{1,1}	RK _{2,2}	RK _{3,1}	RK _{4,5}	10	69	0	0	1
SK ₁₆	RK _{1,1}	RK _{2,2}	RK _{3,2}	RK _{4,2}	10	93	0	0	1
SK ₁₇	RK _{1,1}	RK _{2,2}	RK _{3,2}	RK _{4,3}	10	85	0	0	1
SK ₁₈	RK _{1,1}	RK _{2,2}	RK _{3,2}	RK _{4,5}	10	86	0	0	1
SK ₁₉	RK _{1,1}	RK _{2,2}	RK _{3,3}	RK _{4,2}	10	114	0	0	1
SK ₂₀	RK _{1,1}	RK _{2,2}	RK _{3,3}	RK _{4,3}	10	106	0	0	1
SK ₂₁	RK _{1,1}	RK _{2,2}	RK _{3,3}	RK _{4,5}	10	107	0	0	1
SK ₂₂	RK _{1,1}	RK _{2,3}	RK _{3,1}	RK _{4,3}	10	60	1	0	1
SK ₂₃	RK _{1,1}	RK _{2,3}	RK _{3,1}	RK _{4,5}	10	61	1	0	1
SK ₂₄	RK _{1,1}	RK _{2,3}	RK _{3,2}	RK _{4,3}	10	77	1	0	1
SK ₂₅	RK _{1,1}	RK _{2,3}	RK _{3,2}	RK _{4,5}	10	78	1	0	1
SK ₂₆	RK _{1,1}	RK _{2,3}	RK _{3,3}	RK _{4,3}	10	98	1	0	1
SK ₂₇	RK _{1,1}	RK _{2,3}	RK _{3,3}	RK _{4,5}	10	99	1	0	1
SK ₂₈	RK _{1,1}	RK _{2,4}	RK _{3,1}	RK _{4,4}	10	72	0	1	0
SK ₂₉	RK _{1,1}	RK _{2,4}	RK _{3,1}	RK _{4,5}	10	67	0	1	0
...

Legende:

- RK_{i,j}: Ressourcenkonfiguration j von Ressource i
- SK_k: Systemkonfiguration k
- t_k : Taktzeit mit Systemkonfiguration k c_k : Stundensatz mit Systemkonfiguration k
- 0: Produktion nicht möglich 1: Produktion möglich

Tabelle 8: Auszug der möglichen Systemkonfigurationen inklusive der Produkt-Konfigurations-Kompatibilitäten

8 Anwendungsbeispiel und Bewertung

Des Weiteren sind die resultierenden Rekonfigurationszeiten exemplarisch als Matrix in Tabelle 9 dargestellt. Die Zeiten berechnen sich auf Basis der Rekonfigurationsaufwände der einzelnen Ressourcen (vgl. Abschnitt 8.3.2) sowie mithilfe des erfahrungswertbasierten Zeitfaktors. Die Produkt-Konfigurations-Kompatibilitäts-Matrix sowie die Beschreibung der Systemkonfigurationen stellen die wesentlichen Eingangsdaten für die Produktionsablaufplanung dar und sind nach Durchführung dieses Planungsschrittes vollständig spezifiziert. Die Ergebnisse der Ressourcenplanung dienen nachfolgend als maßgebliche Eingangsparameter für die simulationsbasierte Umsetzung und Validierung.

Rekonfigurationszeit [min]	SK ₁	SK ₂	SK ₃	SK ₄	SK ₅	SK ₆	SK ₇	SK ₈	SK ₉	SK ₁₀	SK ₁₁	SK ₁₂	SK ₁₃	SK ₁₄	SK ₁₅	SK ₁₆	SK ₁₇	SK ₁₈	SK ₁₉	SK ₂₀	...
SK ₁	0	12	12	24	30	42	42	54	18	30	30	42	24	24	36	54	54	66	42	42	...
SK ₂	8	0	20	12	38	30	50	42	26	18	38	30	12	32	24	42	62	54	30	50	...
SK ₃	8	20	0	12	38	50	30	42	26	38	18	30	32	12	24	62	42	54	50	30	...
SK ₄	16	8	8	0	46	38	38	30	34	26	26	18	20	20	12	50	50	42	38	38	...
SK ₅	30	42	42	54	0	12	12	24	18	30	30	42	54	54	66	24	24	36	42	42	...
SK ₆	38	30	50	42	8	0	20	12	26	18	38	30	42	62	54	12	32	24	30	50	...
SK ₇	38	50	38	42	8	20	0	12	26	38	18	30	62	42	54	32	12	24	50	30	...
SK ₈	46	38	38	30	16	8	8	0	34	26	26	18	50	50	42	20	20	12	38	38	...
SK ₉	12	24	24	36	12	24	24	36	0	12	12	24	36	36	48	36	36	48	24	24	...
SK ₁₀	20	12	32	24	20	12	32	24	8	0	20	12	24	44	36	24	44	36	12	32	...
SK ₁₁	20	32	12	24	20	32	12	24	8	20	0	12	44	24	36	44	24	36	32	12	...
SK ₁₂	28	20	20	12	28	20	20	12	16	8	8	0	32	32	24	32	32	24	20	20	...
SK ₁₃	16	8	28	20	46	38	58	50	34	26	46	38	0	20	12	30	50	42	18	38	...
SK ₁₄	16	28	8	20	46	58	38	50	34	46	26	38	20	0	12	50	30	42	38	18	...
SK ₁₅	24	16	16	8	54	46	46	38	42	34	34	26	8	8	0	38	38	30	26	26	...
SK ₁₆	46	38	58	50	16	8	28	20	34	26	46	38	30	50	42	0	20	12	18	38	...
SK ₁₇	46	58	38	50	16	28	8	20	34	46	26	38	50	30	42	20	0	12	38	18	...
SK ₁₈	54	46	46	38	24	16	16	8	42	34	34	26	38	38	30	8	8	0	26	26	...
SK ₁₉	28	20	40	32	28	20	40	32	16	8	28	20	12	32	24	12	32	24	0	20	...
SK ₂₀	28	40	20	32	28	40	20	32	16	28	8	20	32	12	24	32	12	24	20	0	...
..

Legende:

SK_k: Systemkonfiguration k

Tabelle 9: Exemplarische Rekonfigurationszeiten für Rekonfigurationsvorgänge innerhalb des Konfigurationsbereichs

8.4 Simulationsbasierte Umsetzung und Validierung

8.4.1 Allgemeines

Mithilfe des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme wird das Ziel verfolgt, die Eigenschaften und im Speziellen die Skalierbarkeit rekonfigurierbarer Systeme in der Produktionsplanung nutzbar zu machen. Um Aussagen über den quantitativen Nutzen und die Leistungsfähigkeit des Systems zur Produktionsplanung treffen zu können, erfolgt nachfolgend die

simulationsbasierte Umsetzung und Validierung der Methode zur Produktionsplanung. Da im industriellen Umfeld kaum rekonfigurierbare Produktionssysteme vorzufinden sind, wird nachfolgend die Umsetzung auf Basis der Optimierungssoftware FICO® Xpress Optimization Suite vorgestellt. Für die Validierung werden in Abschnitt 8.4.3 unterschiedliche Planungsmodelle und Produktionsszenarien dargelegt. Diese unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der geforderten Nachfragemengen als auch in Bezug auf die zu produzierenden Produkte. Im Fokus der simulationsgestützten Untersuchungen stehen im Speziellen die Integration der Skalierbarkeit und der Funktionsänderung in die Produktionsplanung. Als wesentliche Eingangsdaten gelten dabei die Ergebnisse der vorherigen Abschnitte, wie z. B. die Konfigurationsalternativen. Die durchgeführten Simulationsstudien werden abschließend in Abschnitt 8.4.4 detailliert vorgestellt. In diesem Zusammenhang erfolgen die Beschreibung der Szenarien und die Diskussion der erzielten Ergebnisse.

8.4.2 Beschreibung der Umsetzung

Für die Validierung der Methode zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme wurde explizit die Produktionsablaufplanung mithilfe der Software FICO® Xpress Optimization Suite umgesetzt. Der Aufbau sowie die Ein- und Ausgangsdaten sind in Abbildung 47 dargestellt. Im Speziellen bietet die Software die Möglichkeit, Optimierungslösungen selbst zu entwickeln und zu nutzen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden mit dieser Software die formulierte Zielfunktion, die Nebenbedingungen sowie die Entscheidungsvariablen in der Simulationsumgebung implementiert. Als wesentliche Eingangsdaten dienen das produkt- und makroperiodenspezifische Produktionsprogramm, die Konfigurationsalternativen sowie die Rekonfigurationszeiten. Die Daten sind hierbei in einer Microsoft Excel®-Datei hinterlegt. Nach Durchführung der Produktionsablaufplanung mithilfe des Branch-and-Bound-Verfahrens ergibt sich ein Excel-basierter Produktionsplan. Darin sind u. a. die Konfigurationen in den Mikroperioden, die jeweiligen Produktionsmengen der Produkte sowie die Dauer der Mikroperioden enthalten. Im Fokus der simulationstechnischen Experimente steht die Demonstration des Mehrwerts der Methode zur Produktionsplanung im Vergleich zu konventionellen Planungsansätzen. Weiterhin sollen die Skalierbarkeit der Kapazitäten und die Anpassung der Funktionalitäten illustriert werden. Beide Planungsmodelle wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit der gleichen Planungsplattform evaluiert. Die betrachteten Produktionsszenarien sind nachfolgend dargestellt.

8 Anwendungsbeispiel und Bewertung

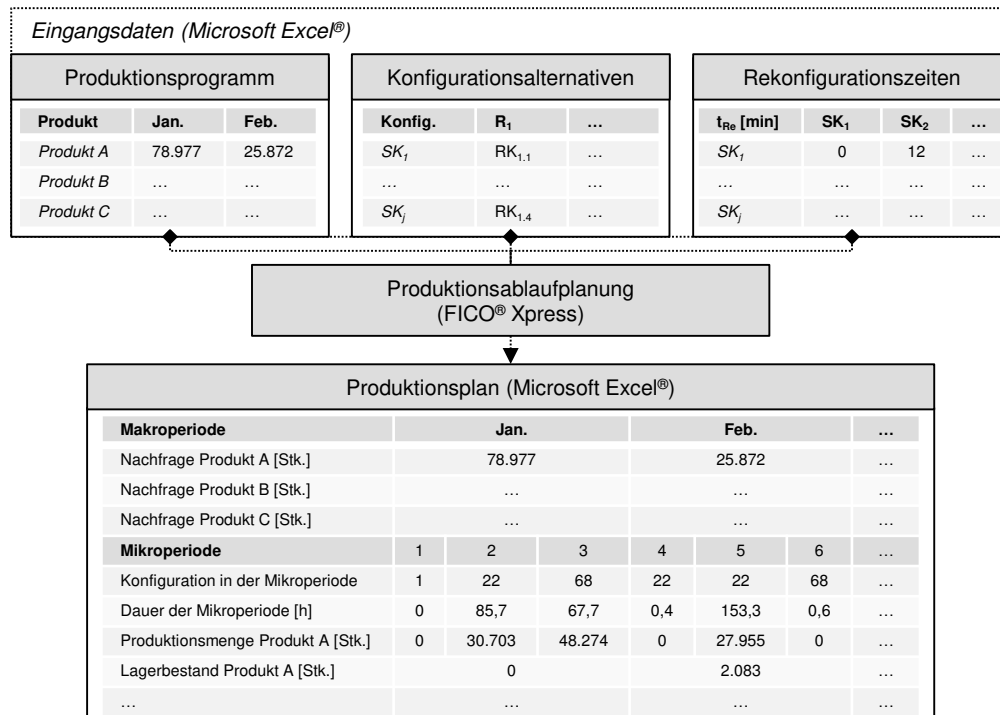


Abbildung 47: Aufbau und Schnittstellen der Planungsumgebung

8.4.3 Planungsmodelle und Produktionsszenarien

Für die Quantifizierung der Nutzenaspekte des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme sollen Änderungen hinsichtlich der Skalierbarkeit und des Funktionsumfangs in unterschiedlichen Planungsszenarien systematisch untersucht werden. In Ergänzung zu diesem Referenzmodell dient eine konventionelle Produktionsplanung mit statischen Planungsdaten als Vergleichsmodell. Tabelle 10 stellt die Spezifika und Eingangsdaten der beiden Planungsmodelle zusammenfassend dar. Die grundsätzlichen Rahmenbedingungen wurden für beide Modelle identisch festgelegt. Der Planungszeitraum, d. h. die Anzahl der Makroperioden, spiegelt die Anzahl der Monate eines Kalenderjahres wider. Weiterhin sind maximal drei Mikroperioden je Makroperiode möglich, da maximal drei Produkte produziert werden und somit jederzeit die Möglichkeit für Rekonfigurationsvorgänge gegeben sein muss. Die maximal verfügbare Arbeitszeit je Makroperiode ergibt sich als arithmetisches Mittel aus einer täglichen Arbeitszeit von acht Stunden und 230 Arbeitstagen für die 12 Makroperioden. Des Weiteren wurde die maximale Lagerkapazität je Produkt auf 100.000 Stück festgelegt. Auf Grundlage der formulierten Zielfunktion und den geltenden Nebenbedingungen (vgl. Abschnitt 7.5.3) entscheiden die beiden Modelle für ein vorab definiertes Produktionsprogramm prädiktiv über die Produktionsmengen und die Lagerbestände in den jeweiligen Planungsperioden.

8.4 Simulationsbasierte Umsetzung und Validierung

	Referenzmodell (System zur Produktionsplanung für rekonfig. Produktionssysteme)	Vergleichsmodell (konventionelle Produktionsplanung mit statischen Planungsdaten)
Planungszeitraum (T)	12 Makroperioden	
Anzahl Mikroperioden (S)	36 Mikroperioden	
Arbeitszeit je Makroperiode (KAP_{T_s})	153,33 Stunden	
Maximale Lagerkapazität je Produkt (y_p^{max})	100.000 Stück	
Prädiktion der Planung	ja	
Fehlmengen	nein	ja
Kapazitätsskalierung	ja	nein
Funktionsänderung	ja	nein
In der Planung verfügbare Systemkonfigurationen (K)	variabel (hier: 72 Systemkonfigurationen)	fixiert (hier: 1 Systemkonfiguration)
Planungsdaten	konfigurationsabhängig	statisch

Tabelle 10: Spezifika und Eingangsdaten der Planungsmodelle

Als wesentliche Eigenschaft des *Referenzmodells* können die Integration der Skalierbarkeit sowie die Möglichkeit zur planungsseitigen Anpassung der Funktionalitäten angeführt werden. Des Weiteren muss das System zur Produktionsplanung mithilfe von Lagerbeständen und Rekonfigurationsvorgängen zwischen den möglichen Systemkonfigurationen den Nachfragebedarf erfüllen. Die in der Planung verfügbare Anzahl an Systemkonfigurationen ist variabel. Weiterhin sind die korrespondierenden Planungsdaten konfigurationsabhängig. Infolgedessen können die Taktzeiten und die Stundensätze in Abhängigkeit der vorliegenden Systemkonfiguration variieren. Gründe hierfür können z. B. schnellere Bearbeitungszeiten oder erweiterte Funktionalitäten der einzelnen Module sein.

Als *Vergleichsmodell* wird eine konventionelle Produktionsplanung mit statischen Planungsdaten verwendet. Als wesentliches Unterscheidungskriterium verfügt diese Modell nicht über die Möglichkeit, Rekonfigurationen erkennen und durchführen zu können. Infolgedessen wird die Produktionsplanung mit einer vor Planungsbeginn definierten Konfigurationsalternative durchgeführt, die alle Funktionalitäten aufweist. Des Weiteren sind die Planungsdaten statisch, d. h. für jedes Szenario muss folglich mit der identischen Taktzeit geplant werden. Eine Skalierung der Kapazitäten kann deshalb in der Planung nicht durchgeführt werden. Darüber hinaus ist es dem Vergleichsmodell erlaubt, Fehlmengen in den Makroperioden auszuweisen. Zur Kompensation sind in einer realen Produktionsplanung Überstunden zur Deckung der Nachfrage als Kapazitätsanpas-

8 Anwendungsbeispiel und Bewertung

sungsmaßnahme einzuplanen, die sich aus diesen Fehlmengen und den Taktzeiten des Systems berechnen lassen.

Um den Nutzen des Referenzmodells demonstrieren zu können, werden nachfolgend unterschiedliche Szenarien untersucht (vgl. Tabelle 11). Im Fokus der Betrachtungen stehen die Skalierung der Kapazität und die Änderung der Funktionalitäten. Im ersten Szenario wird die Produktionsplanung für die Ausgangssituation anhand eines aus den Nachfragemengen abgeleiteten Produktionsprogramms für Produkt A durchgeführt. Die Nachfrage kann dabei als dynamisch charakterisiert werden. Darauf aufbauend wird im zweiten Szenario das Unternehmen mit einer gesteigerten Nachfragemenge des Produktes A konfrontiert. Als Folge muss die Skalierbarkeit in der Methode zur Produktionsplanung genutzt werden. Im dritten Szenario gilt es, die Produkte A und B gleichzeitig zu produzieren. Diese Produkte unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der Nachfragemenge als auch in ihren funktionalen Anforderungen. Für eine wirtschaftliche Herstellung der Produkte sind folglich Rekonfigurationen notwendig. Des Weiteren werden im vierten Szenario die Ablösung des Produktes A durch das Produkt C sowie die Reduzierung der Nachfragemengen in den Fokus der Betrachtungen gestellt.

Produktions-szenario	1	2	3	4
	Ausgangs-situation	Steigerung der Nachfrage	Änderung der Funktion	Reduzierung der Nachfrage und Änderung der Funktion
Nachfragemenge [Stück pro Jahr]				
Produkt A	850.000	1.200.000	620.000	-
Produkt B	-	-	240.000	350.000
Produkt C	-	-	-	200.000

Tabelle 11: Übersicht über die betrachteten Produktionsszenarien

Ausgehend von den Produktionsszenarien und den darin enthaltenen Nachfragemengen wurden szenario-spezifische Produktionsprogramme für die Makroperioden erstellt. Diese zeichnen sich durch Bedarfsschwankungen aus. Für beide Planungsmodelle werden mithilfe der simulationsgestützten Untersuchungen die Produktionsprogramme hinsichtlich der Entscheidungsvariablen (vgl. Abschnitt 7.5.4) detailliert. Nachfolgend werden die durchgeführten Simulationsstudien im Detail beschrieben sowie die erzielten Ergebnisse diskutiert.

8.4.4 Planungsergebnisse der Simulationen

Die nachfolgenden Planungsergebnisse der Simulationen werden qualitativ hinsichtlich der Möglichkeit der Skalierung der Kapazitäten sowie der Verläufe der Produktionsmenge und Lagerbestände ausgewertet. Als wesentliche Unterscheidung können die Planungsdaten des Referenzmodells anhand der notwendigen Bedarfsmengen und Funktionalitäten konfigurationsabhängig angepasst werden. Nachfolgend sind die Ergebnisse der jeweiligen Produktionsszenarien dargestellt.

8.4.4.1 Produktionsplanung für die Ausgangssituation

Im Rahmen des ersten Produktionsszenarios steht die Produktionsplanung für die Ausgangssituation des produzierenden Unternehmens im Fokus der Betrachtungen. In diesem Szenario gilt es, das Ventil A mit einer jährlichen Stückzahl in Höhe von 850.000 Stück mit dem in Abschnitt 8.2.2 dargestellten Produktionssystem zu möglichst geringen Produktionskosten zu produzieren. Die geforderten Stückzahlen für die 12 Makroperioden wurden dabei aus dem realen Anwendungsbeispiel anhand der jährlichen Nachfrage auf die einzelnen Perioden verteilt. Die Planungsergebnisse des Referenzmodells im Vergleich zu den Resultaten des Vergleichsmodells sind in Abbildung 48 dargestellt.

Es zeigt sich, dass das untersuchte Referenzmodell nachweislich in der Lage ist, die geforderten Nachfragemengen durch die Skalierung der Kapazitäten des Produktionssystems zu decken. Grundsätzlich wird durch das Referenzmodell die Kapazität so angepasst, dass die Summe aus Leer-, Bearbeitungs-, Rekonfigurations- und Lagerkosten möglichst gering ist. Zudem wird deutlich, dass das Produktionssystem in Zeiten von großen Nachfragen die maximal mögliche Kapazität in Höhe von 110.400 Stück pro Makroperiode, die durch die schnellstmögliche Taktzeit festgelegt wird, einplant und im Falle eines Einbruchs der Nachfrage diese wieder auf ein niedrigeres, kostengünstigeres Niveau skaliert. Der mögliche Skalierungskorridor, der durch die einzelnen Eigenschaften der Konfigurationsalternativen vorgegeben ist, wird folglich genutzt. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der Taktzeiten der Konfigurationsalternativen ein Minimum an Kapazitätsangebot existiert. Die Skalierung kann folglich nur innerhalb des Konfigurationsbereichs des Produktionssystems erfolgen, d. h. zwischen der minimalen und maximalen konfigurationsspezifischen Taktzeit. Die maximale Abweichung zwischen der Produktion von Produkt A und der Nachfrage liegt für das Referenzmodell bei 6,8 %. Dahingegen liegt die Abweichung zwischen dem Vergleichsmodell und der Nachfrage in der gleichen Periode bei 50,7 %. Darüber

8 Anwendungsbeispiel und Bewertung

hinaus wird im vorliegenden Szenario die Kapazität für nachfrageintensive Perioden nahezu verdoppelt. Das Vergleichsmodell kann hingegen die Eigenschaften des rekonfigurierbaren Systems in der Produktionsplanung nicht nutzen und muss infolgedessen mit einer fixen Kapazität die schwankende Nachfrage bedienen. Anpassungsmaßnahmen hierfür sind eine Vorausproduktion und der Aufbau von Lagerbeständen sowie die Berücksichtigung von Fehlmengen.

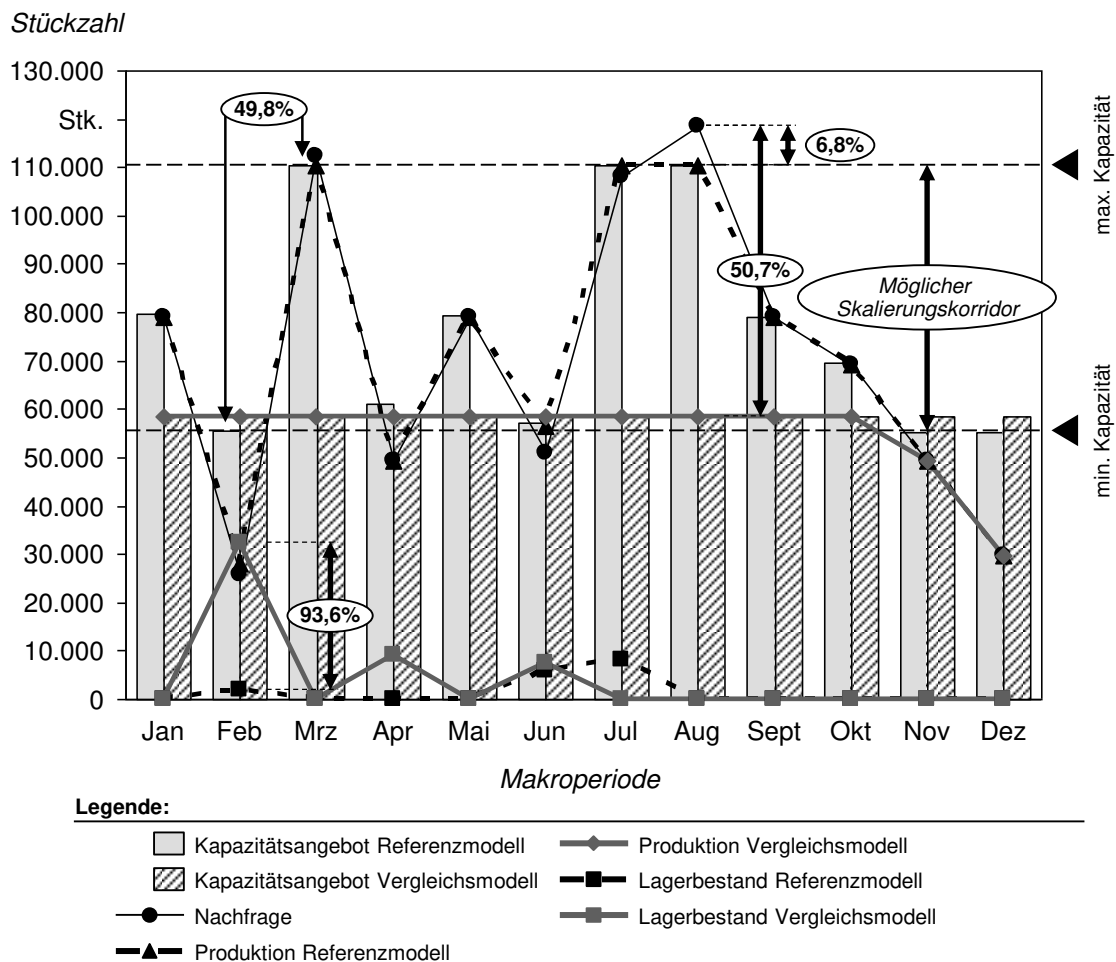


Abbildung 48: Planungsergebnisse des Referenz- und des Vergleichsmodells für die Ausgangssituation (HEES ET AL. 2016C)

Sollte die Kapazität für die Nachfrage nicht ausreichen, so wird in der vorhergehenden Makroperiode ein Lagerbestand aufgebaut. Dieser fällt für die entwickelte Planungsmethode in Relation zum Vergleichsmodell in der Maximalausprägung um 93,6 % geringer aus. Zusammenfassend lässt sich für die Produktionsplanung in der Ausgangssituation festhalten, dass durch die Integration der Skalierbarkeit in die Methode zur Produktionsplanung die Bereitstellung der geforderten Kapazität ermöglicht wird.

8.4.4.2 Produktionsplanung bei gesteigerter Nachfrage

Das zweite Produktionsszenario weist im Vergleich zum vorherigen eine gesteigerte Nachfrage von Produkt A in Höhe von 1.200.000 Stück pro Jahr auf. Die Nachfrage hat sich im Vergleich zum vorherigen Produktionsszenario folglich um etwa 41 % gesteigert. Schwerpunktmäßig soll im Rahmen dieses Produktionsszenarios die Skalierbarkeit bei erhöhter Belastung durch eine gesteigerte Nachfrage des Produktionssystems untersucht werden. Die Planungsergebnisse der beiden Planungsmodelle sind zusammenfassend in Abbildung 49 dargestellt.

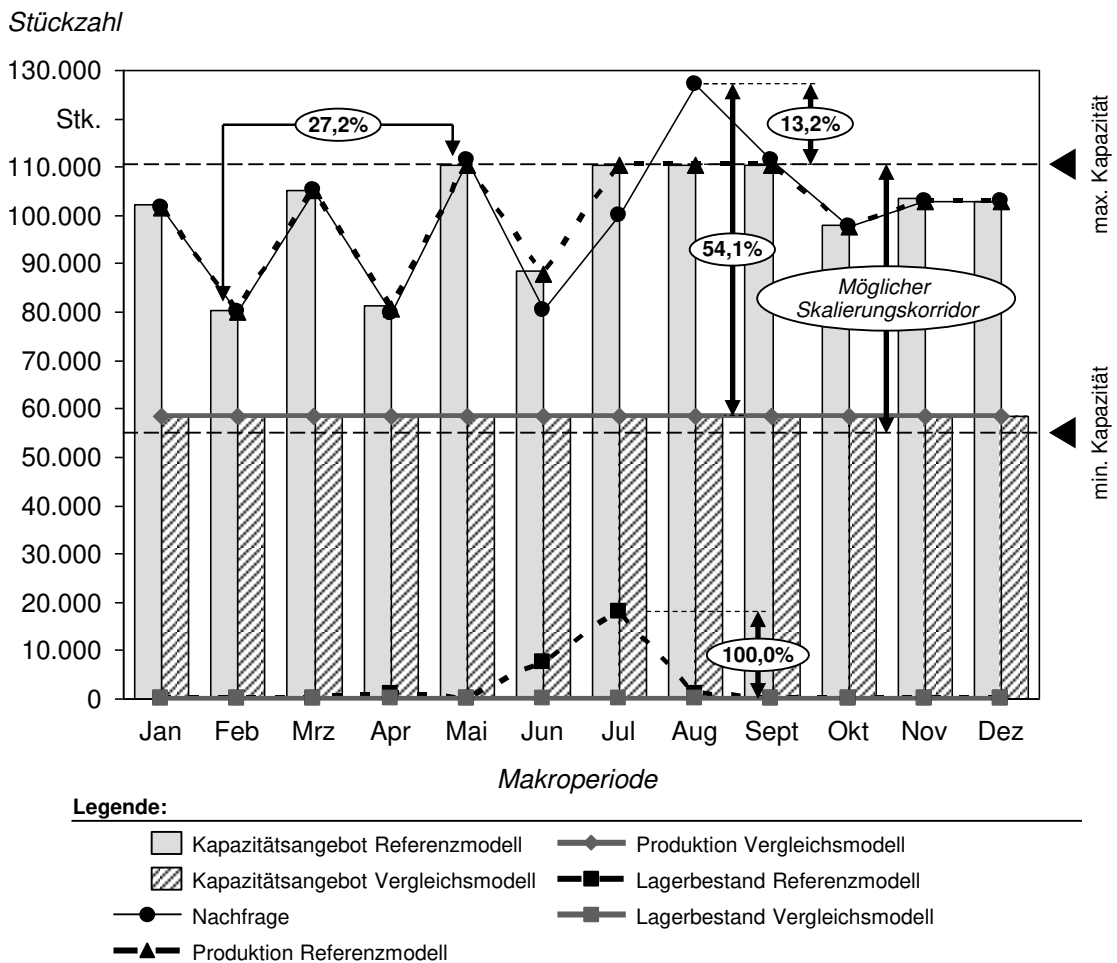


Abbildung 49: Planungsergebnisse des Referenz- und des Vergleichsmodells bei gesteigerter Nachfrage

Bei einer Steigerung der Nachfragemenge zeigt sich, dass die Kapazität schrittweise an die maximale, systemseitige Kapazitätsgrenze angepasst wird. Zu Beginn des Planungszeitraums sowie in Perioden, die durch eine geringere Nachfrage gekennzeichnet sind, wird prädictiv für nachfrageintensive Perioden der Lagerbestand von Produkt A durch eine Vorausproduktion aufgebaut. Somit

kann sichergestellt werden, dass die geforderten Nachfragemengen produziert werden können. Die maximale Skalierung der Kapazität liegt für die Methode zur Produktionsplanung bei 27,2 %. Der mögliche Skalierungskorridor des Produktionssystems wird aufgrund der erhöhten Nachfrage nur in geringem Maße ausgenutzt. Des Weiteren liegen die Differenzen zwischen Nachfragemenge und Produktionsmenge im höchsten Punkt des Produktionsszenarios beim Referenzmodell bei 13,2 %, wohingegen beim Vergleichsmodell Abweichungen in Höhe von 54,1 % vorzufinden sind. Die Planungsdaten weichen folglich deutlich von der tatsächlichen Nachfrage ab. Des Weiteren ist das Vergleichsmodell aufgrund der fehlerhaften Parametrierung der Produktionsplanung nicht in der Lage, einen Lagerbestand zur Deckung der Nachfragespitzen aufzubauen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei einer gesteigerten Nachfragemenge die Integration der Skalierbarkeit in die Methode zur Produktionsplanung insbesondere die notwendigen Lagerbestände reduziert. Die Kapazitäten werden allerdings aufgrund der Überlastung des Produktionssystems nicht wieder auf ein geringeres Niveau skaliert.

8.4.4.3 Produktionsplanung bei Änderung der Funktionalitäten

Eine weitere grundlegende Eigenschaft rekonfigurierbarer Produktionssysteme ist die Möglichkeit, die Funktionalität des Systems anpassen zu können. Im dritten Produktionsszenario gilt es, die Produkte A und B mit einer Nachfragemenge von 620.000 Stück und 240.000 Stück pro Jahr zu produzieren. Die Planungsergebnisse der Simulationen sind zusammengefasst in Abbildung 50 dargestellt.

Schwerpunktmäßig wird im Rahmen dieses Szenarios der Nutzen des Referenzmodells bei Änderung der geforderten Funktionalitäten untersucht. Als wesentliche Änderung zu den vorherigen Szenarien unterscheiden sich die notwendigen Produktionsprozesse des neuen Produktes B im Vergleich zum Produkt A (vgl. Abschnitt 8.3.3). Die Auswahl der möglichen Konfigurationsalternativen hat sich folglich für das Referenzmodell verändert. Grundsätzlich werden die Skalierbarkeit und die Änderung der Funktionalität durchgehend in den Planungsergebnissen umgesetzt. Die Produktionsmenge entspricht für den Planungsfall in vielen Fällen exakt den durch die Konfigurationen vorgegebenen Produktionskapazitäten. Die größte Abweichung zwischen der gesamten Produktionsmenge liegt für das Referenzmodell bei 24 % und für das Vergleichsmodell bei 47,3 %. Im Speziellen zeigt sich, dass die obere Kapazitätsgrenze für den Anwendungsfall noch unter der maximalen Systemkapazität von 110.400 Stück pro Jahr liegt. Mit dem

8.4 Simulationsbasierte Umsetzung und Validierung

Referenzmodell werden hierbei die kostenintensiven Konfigurationsalternativen, die eine maximale Ausbringungsmenge gewährleisten, aus Sicht der Optimierung der gesamten Produktionskosten vermieden. Das Vergleichsmodell hingegen arbeitet bei einer fixen Taktzeit an seiner Kapazitätsgrenze und muss die erhöhten Nachfragen durch den Aufbau von Lagerbeständen, die über die Simulationszeit abgebaut werden können, sowie durch die Berücksichtigung von Fehlern kompensieren. Der Lagerbestand des Referenzmodells kann zudem signifikant reduziert werden. Beispielsweise wird im Monat Februar ein um 30,1 % niedriger Lagerbestand erreicht.

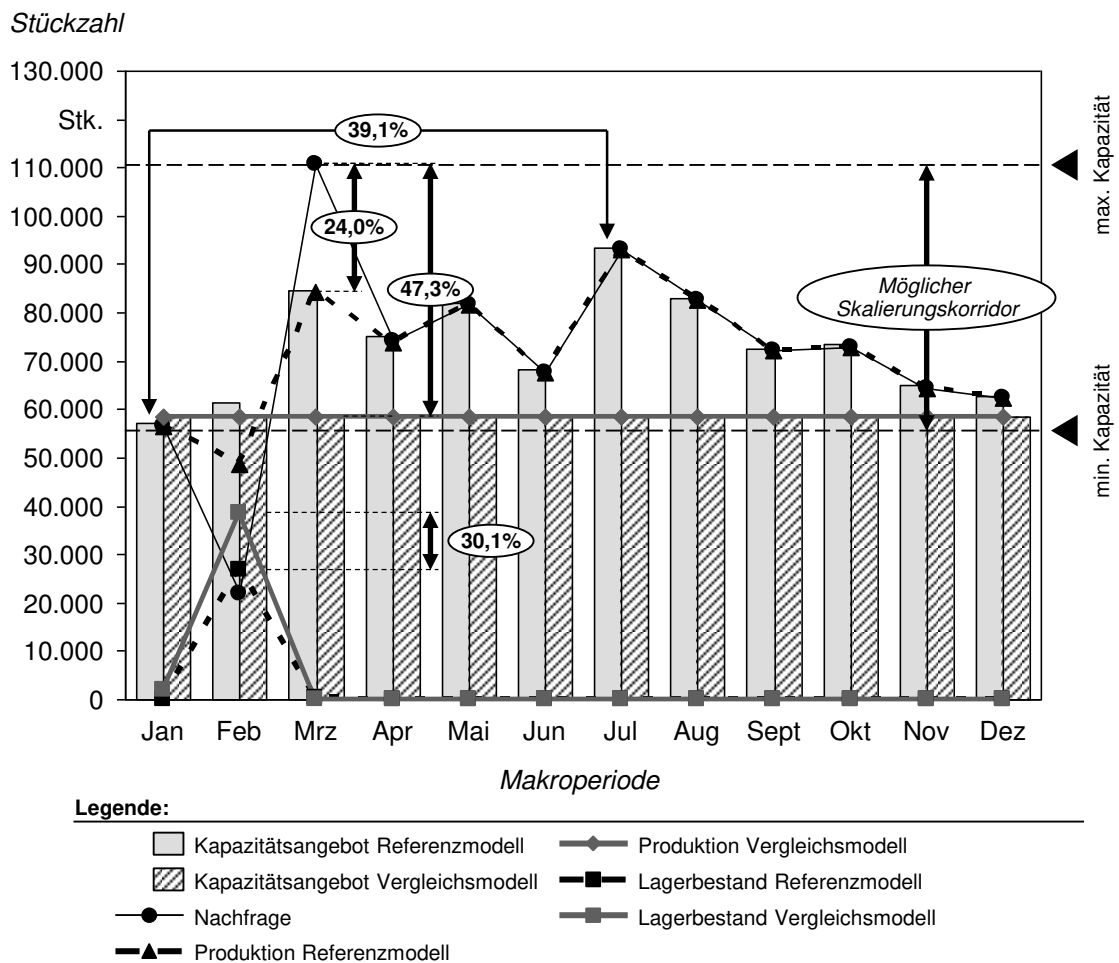


Abbildung 50: Planungsergebnisse des Referenz- und des Vergleichsmodells bei Änderung der geforderten Funktionalitäten

Die Konfiguration des Produktionssystems wird in Folge der Nachfrageschwankung und der geforderten Funktionalität anwendungsfallsspezifisch angepasst. Der mögliche Skalierungskorridor für die Kapazität, der durch die Änderung der Systemkonfiguration beschrieben wird, wird im Rahmen dieses Produktionsszenarios nicht vollständig ausgenutzt. Die maximale Skalierung liegt bei 39,1 %.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Referenzmodell die Anpassung der Funktionalitäten im Rahmen der Planungsergebnisse berücksichtigt und dabei eine deutliche Reduzierung der Lagerbestände erzielt werden kann. Des Weiteren wird die Deckung des Nachfragebedarfs durch die entwickelte Planungsmethode durchgehend sichergestellt.

8.4.4.4 Produktionsplanung bei reduzierter Nachfrage und Änderung der Funktionalität

Im Rahmen der letzten simulationsgestützten Untersuchung wird die Produktionsplanung bei einer reduzierten Nachfragemenge sowie einer gleichzeitigen Änderung des notwendigen Funktionsumfangs in den Fokus der Betrachtungen gestellt. Im Speziellen gilt es, die Produktion mit den Produkten B und C zu planen. Das letztere Produkt löst im Rahmen dieses Szenarios das bisherige Produkt A ab. Die notwendigen Fertigungs- und Montageprozesse sind in Tabelle 6 in Abschnitt 8.3.3 ausführlich dargestellt. Die geforderten Nachfragemengen betragen pro Jahr 350.000 Stück für Produkt B und 200.000 Stück für das neue Produkt C. Die Planungsergebnisse für das Referenz- und das Vergleichsmodell sind in Abbildung 51 dargestellt.

Bei genauer Betrachtung der Planungsergebnisse des Referenzmodells zeigt sich, dass sich das Kapazitätsangebot bei gleichzeitiger Anpassung der Funktionalitäten an die Nachfrage anpasst. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Kapazität nur bis an die minimale Kapazitätsgrenze in Höhe von 55.200 Stück pro Makroperiode skaliert werden kann. Das Referenzmodell kann den Konfigurationszustand des Produktionssystems folglich nur innerhalb des dargestellten Skalierungskorridors anpassen. Im Rahmen dieses Produktionsszenarios wird der mögliche Korridor nicht vollständig ausgenutzt. Die maximale Skalierung der Produktionskapazität liegt bei 22,2 %. Das Vergleichsmodell hingegen offeriert ein niedrigeres, fixes Kapazitätsangebot und arbeitet aufgrund dessen an seiner Kapazitätsgrenze. Die maximale Abweichung zwischen Nachfragemenge und Produktionsmenge liegt bei diesem Modell bei 27 %, wohingegen sie beim Referenzmodell bei 11,3 % liegt. Darüber hinaus müssen mögliche Nachfragespitzen im Vergleichsmodell durch den Aufbau von Lagerbeständen kompensiert werden. Diese sind bei der entwickelten Planungsmethode nur bedingt notwendig und können beispielsweise im März um 56,2 % reduziert werden. Die planungsseitigen Anpassungen werden beim Referenzmodell durch die Rekonfigurationsvorgänge vorgenommen. Die charakteristischen Eigenschaften rekonfigurierbarer

8.4 Simulationsbasierte Umsetzung und Validierung

Produktionssysteme können folglich im Rahmen der Produktionsplanung genutzt werden und ermöglichen eine wirtschaftliche Herstellung der Produkte B und C. Des Weiteren werden die notwendigen Rekonfigurationen bereits in der Planung berücksichtigt und können so frühzeitig zur Reduzierung von Rekonfigurationszeiten beitragen.

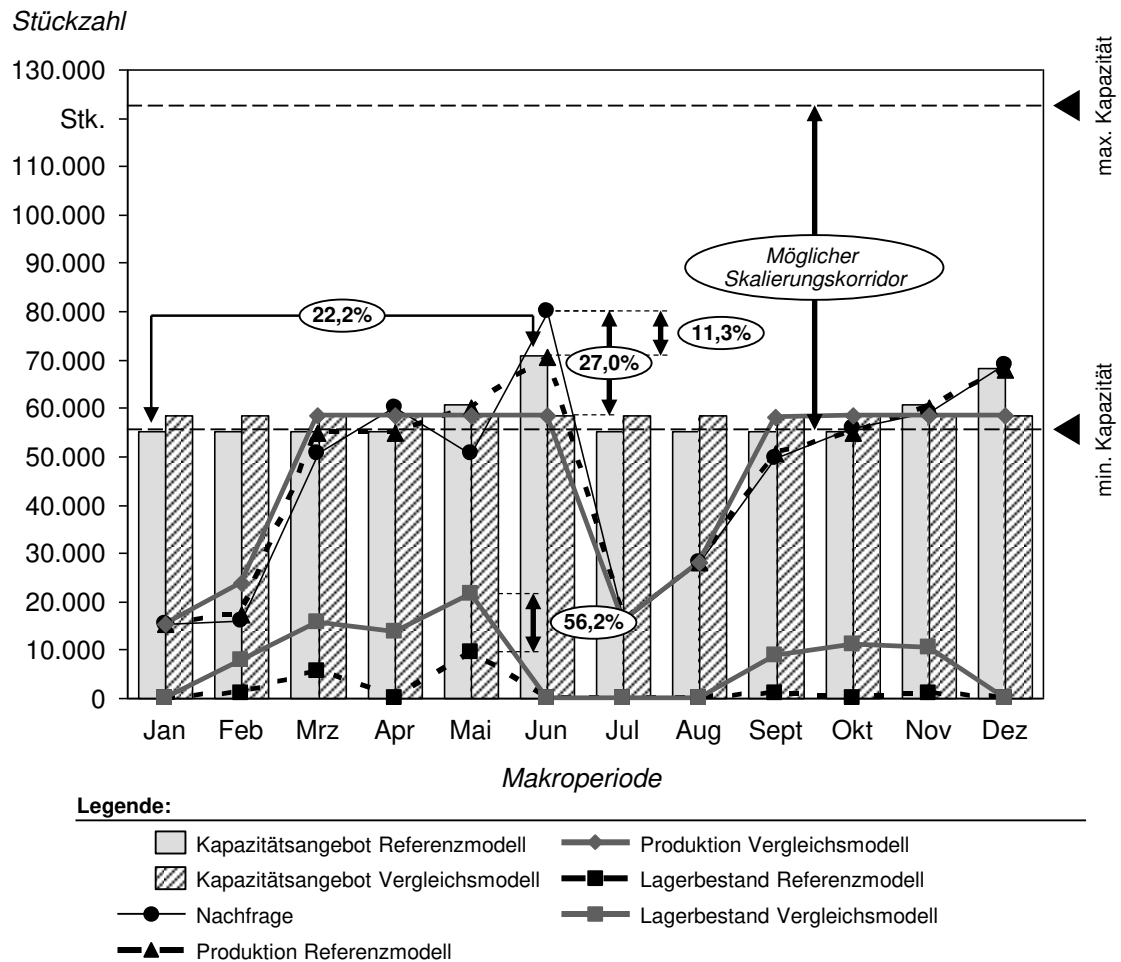


Abbildung 51: Planungsergebnisse des Referenz- und des Vergleichsmodells bei reduzierter Nachfrage und geänderten Funktionalitäten

Zusammenfassend lässt sich für dieses Produktionsszenario festhalten, dass die Skalierung der Produktionskapazitäten bei einer Reduzierung der Nachfragemenge durch das Referenzmodell berücksichtigt wird und infolgedessen die wirtschaftliche Herstellung des Produktportfolios sichergestellt werden kann. Im nachfolgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Simulationsstudien diskutiert und bewertet.

8.4.5 Analyse und Diskussion der Simulationsergebnisse

Die in den vorherigen Abschnitten dargestellten Planungsergebnisse haben qualitativ die Nutzenpotenziale des Referenzmodells in Relation zum Vergleichsmodell aufgezeigt. Nachfolgend werden die Ergebnisse der beiden Planungsmodelle hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit analysiert und diskutiert.

Insgesamt zeigt sich, dass das Referenzmodell mit den gegebenen Rahmenbedingungen, wie z. B. der maximal verfügbaren Arbeitszeit, die komplette Nachfragemenge für die jeweiligen Produktionsszenarien durch die *Ausbringungsmenge* decken kann (vgl. Abbildung 52). Dies geschieht einerseits durch Rekonfigurationsvorgänge und andererseits durch den prädiktiven Aufbau von Lagerbeständen. Das Vergleichsmodell hingegen kann in den Planungsergebnissen aufgrund der fehlerhaften Parametrierung der Produktionsplanung und der statischen Planungsdaten die Nachfrage nicht für alle Szenarien komplett decken. Die so resultierenden Fehlmengen müssen in der Planung durch das Vorsehen von Überstunden kompensiert werden. Dies hat zur Folge, dass für die Produktionsszenarien bis zu 1.313 Überstunden vorgesehen werden müssen. Dies entspricht in etwa einer Verdoppelung der Arbeitszeit für den kompletten Planungszeitraum im Vergleich zum Referenzmodell. Infolgedessen muss für das Vergleichsmodell mit erhöhten Produktionskosten gerechnet werden (vgl. KURBEL 2005).

Ausbringungsmenge

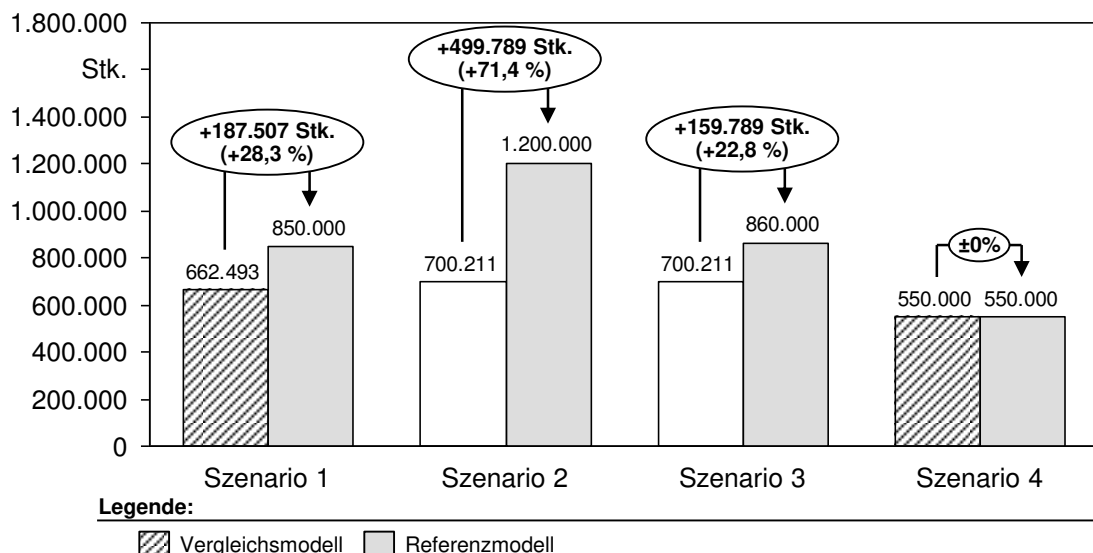


Abbildung 52: Mögliche Ausbringungsmengen des Referenz- und des Vergleichsmodells für die Produktionsszenarien

Das Referenzmodell zeichnet sich durch die Berücksichtigung von konfigurationsabhängigen Taktzeiten des Systems in den Planungsdaten aus. Aus Abbildung 52 wird ersichtlich, dass das Referenzmodell die *Produktionszeiten* in drei von vier Szenarien reduziert, lediglich im zweiten Szenario zeigen sich keine Unterschiede zum Vergleichsmodell. Für die einzelnen Szenarien ergeben sich um bis zu 4,5 % verringerte Produktionszeiten. Dies ist vor allem dadurch begründet, dass aufgrund der Rekonfigurationsmöglichkeiten des Referenzmodells in den entsprechenden Planungsperioden der Szenarien geeignete Planungsparameter berücksichtigt werden. Bei dem entwickelten System zur Produktionsplanung werden die Anpassungen der Funktionalitäten und die Skalierbarkeit der Produktionskapazitäten folglich durch Rekonfigurationen gewährleistet.

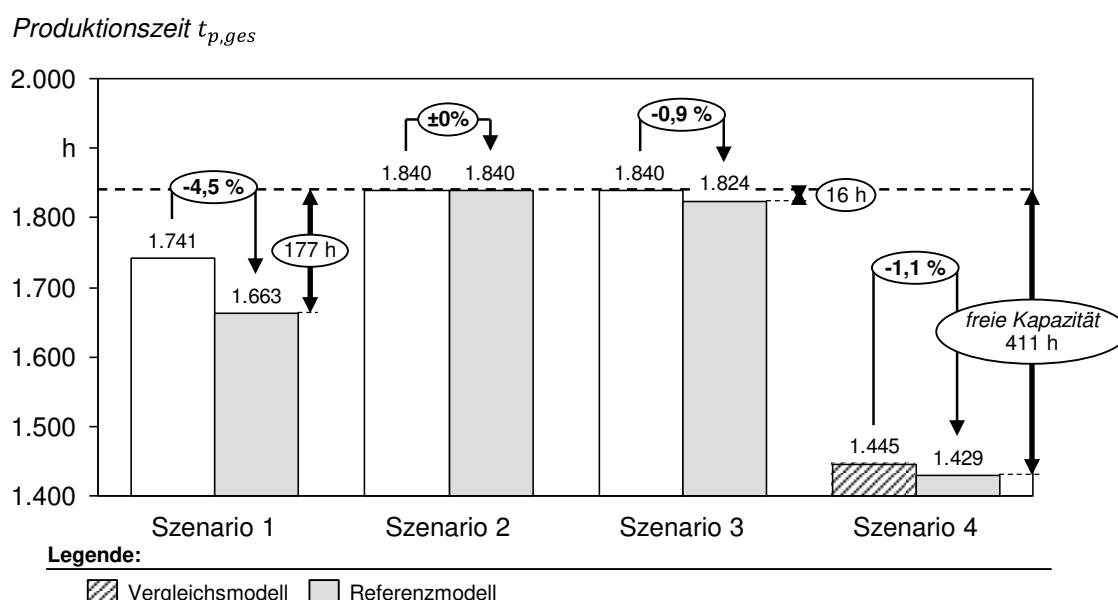


Abbildung 53: Produktionszeiten und freie Kapazitäten des Referenz- und des Vergleichsmodells für die Produktionsszenarien

Darüber hinaus lässt sich feststellen, dass die gesamte *freie Kapazität*, d. h. die Differenz zwischen verfügbarer Arbeitszeit (1.840 Stunden) und benötigter Produktionszeit, in den jeweiligen Produktionsszenarien für das Referenzmodell durchgehend höher ausfällt als beim Vergleichsmodell. Eine Erhöhung der freien Kapazität lässt sich im Falle des entwickelten Referenzmodells dadurch erklären, dass die Leerzeiten zur Reduzierung der Produktionskosten und zur Vermeidung von Lagerkosten in Kauf genommen werden. Dahingegen arbeitet das Vergleichsmodell bei auftretenden Nachfragespitzen an der Kapazitätsgrenze. Die freien Kapazitäten können zur weiteren Produktion von Produkten eingesetzt werden und somit zur Erzielung zusätzlicher Umsatzerlöse dienen. Beispielswei-

8 Anwendungsbeispiel und Bewertung

se lassen sich die freien Kapazitäten durch die Planung mit dem Referenzmodell zwischen 4,1 % im vierten und 78,8 % im ersten Szenario steigern.

Zur Bewertung der *Auslastung* wurden die arithmetischen Mittelwerte der Simulationsergebnisse der Szenarien berechnet (vgl. Abbildung 54). Grundsätzlich stellt die Auslastung das Verhältnis von faktischer und maximal realisierbarer Leistung eines Systems dar (LÖDDING 2008). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist die maximal mögliche Arbeitsleistung des Produktionssystems die maximale Maschinen- bzw. Betriebszeit in Höhe von 153,33 Stunden je Makroperiode. Für die Realisierung niedriger Herstellkosten streben produzierende Unternehmen in der Regel nach einer möglichst hohen Auslastung, um die Investitions- und laufenden Betriebskosten auf möglichst viele Produktionsaufträge verteilen zu können (WIENDAHL 2010). Gleichzeitig führt eine hohe Auslastung jedoch zu hohen Beständen, langen Durchlaufzeiten und zur Verringerung der Termintreue. Infolgedessen verliert diese Zielgröße für produzierende Unternehmen zunehmend an Relevanz (LÖDDING 2008). Es lässt sich feststellen, dass mithilfe des Referenzmodells die Auslastung um 0,3 % bis 5,6 % reduziert werden kann. Als Folge sind durch das Referenzmodell geringere Durchlaufzeiten und niedrigere Lagerbestände realisierbar (vgl. KURBEL 2005).

Mittlere Auslastung A_m

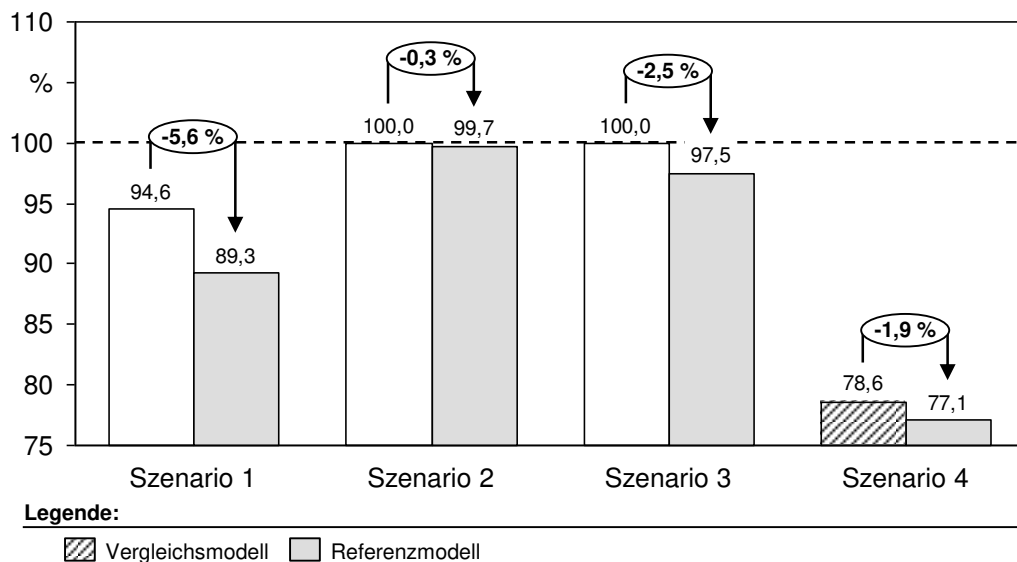


Abbildung 54: Mittlere Auslastung des Referenz- und des Vergleichsmodells für die Produktionsszenarien

Durch die Positionierung des Produktionssystems in einem geeigneten Betriebspunkt wird durch das Referenzmodell die *Produktivität* für die Szenarien eins bis drei gesteigert. Dieser Zusammenhang geht aus Abbildung 55 hervor. Als Pro-

duktivität wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit das Verhältnis von Ausbringungsmenge (= Produktionsleistung) und der zeitlichen Länge des gesamten Planungszeitraumes (= Einsatz) definiert. Die Berücksichtigung von Rekonfigurationen und die damit verbundenen frühzeitigen Anpassungen der Planungsparameter für das Produktionssystem ermöglichen die Steigerung der Produktivität. Aus diesem Grund lag die Produktivität bei den Planungsergebnissen des Referenzmodells in den Szenarien eins bis drei um 22,8 % bis 71,7 % über dem Wert des Vergleichsmodells. Im vierten Produktionsszenario zeigen sich dahingegen keine Produktivitätssteigerungen, da die statischen Planungsdaten des Vergleichsmodells für diesen Anwendungsfall zu guten Planungsergebnissen führen.

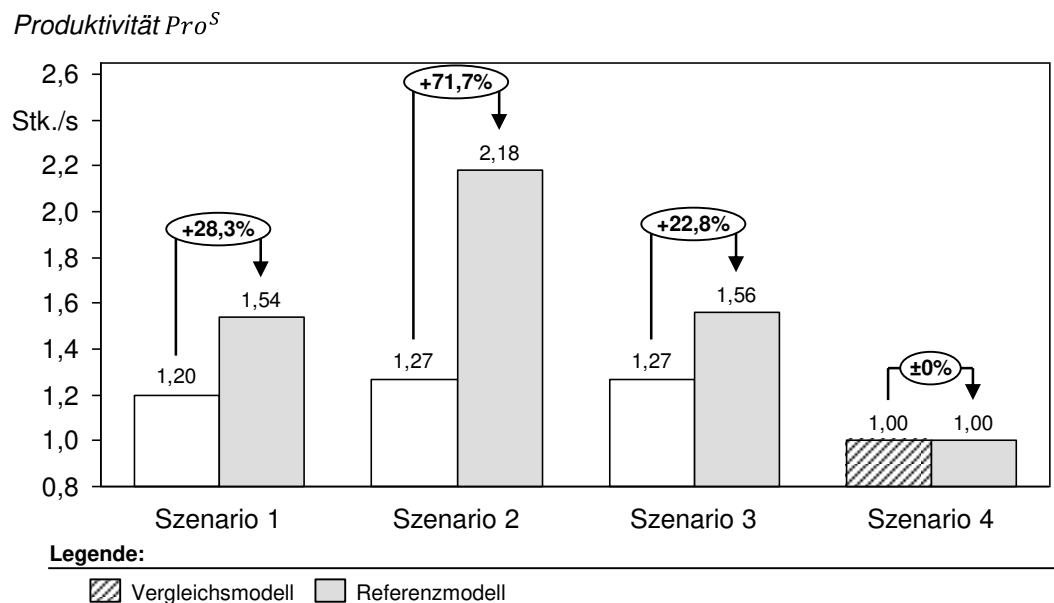


Abbildung 55: Produktivität des Referenz- und des Vergleichsmodells für die Produktionsszenarien

Darüber hinaus hat sich in den Planungsergebnissen des vorherigen Abschnittes gezeigt, dass die *Lagerbestände* für das Referenzmodell reduziert werden können (vgl. Abbildung 56). Das entwickelte Planungssystem ist durch die Integration der Skalierbarkeit in der Lage, die Produktions- und die Nachfragemenge zu synchronisieren und kann folglich die Lagerbestände verringern. Des Weiteren können mithilfe des Referenzmodells die Lagerbestände prädiktiv geplant und zur Bewältigung von Nachfragespitzen genutzt werden. Zusammenfassend können die Lagerbestände durch das Referenzmodell in Relation zur konventionellen Produktionsplanung um bis zu 79,9 % gesenkt werden. Infolgedessen können die Flexibilität gesteigert und die Bindung von Eigenkapital reduziert werden (vgl. KURBEL 2005).

8 Anwendungsbeispiel und Bewertung

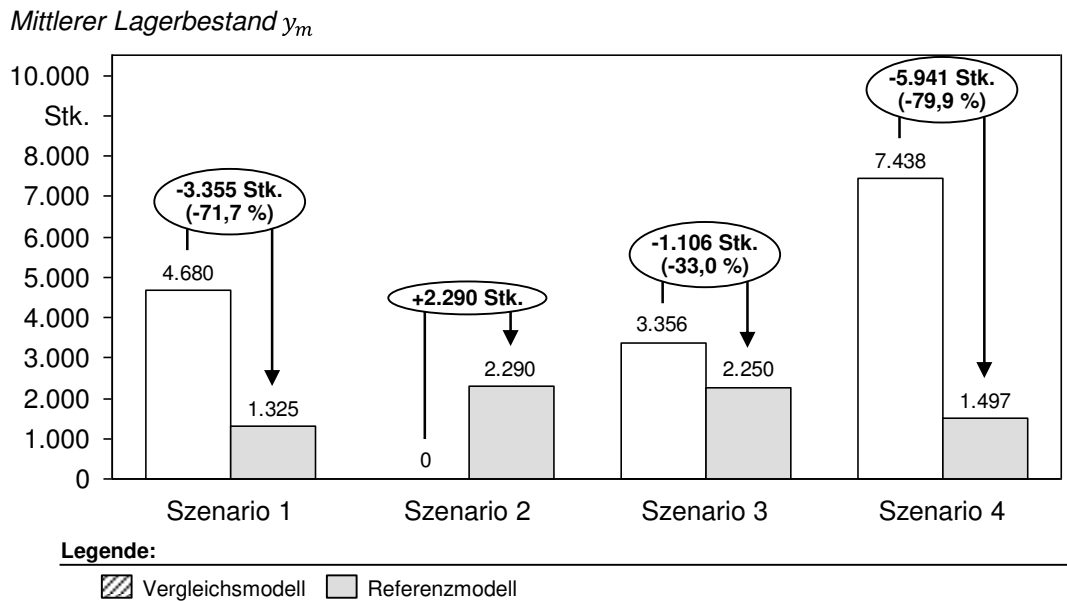






Abbildung 56: Mittlere Lagerbestände des Referenz- und des Vergleichsmodells für die Produktionsszenarien

Die Planungsergebnisse des Referenzmodells haben gezeigt, dass diese zum einen die Skalierbarkeit der Kapazitäten und zum anderen eine deutliche Reduzierung der einzuplanenden Produktionszeiten bei gleichzeitiger Produktivitätssteigerung ermöglichen. Des Weiteren werden die notwendigen Lagerbestände signifikant reduziert, was sich positiv auf die Durchlaufzeiten und auf die erreichbare Termintreue auswirken kann. Zudem bieten die aus der Differenz zwischen Produktionszeit und maximaler Arbeitszeit resultierenden freien Kapazitäten Potenziale zur Erzielung zusätzlicher Umsatzerlöse. Dahingegen muss das Vergleichsmodell die Produktionsplanung mit einer fehlerhaften Parametrierung und statischen Planungsdaten durchführen. Dies resultiert in vielen Fällen in fehlerhaften Planungsergebnissen. Infolgedessen müssen die Lagerbestände erhöht und Überstunden zur Deckung der Nachfrage eingeplant werden. Zusammenfassend fördert das System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme die Verbesserung produktionsrelevanter Kennzahlen durch die Möglichkeit, Rekonfigurationen in der Produktionsplanung adäquat zu berücksichtigen. Einhergehend mit einer optimalen Nutzung der Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme kann damit eine Steigerung der Leistungsfähigkeit realisiert werden.

8.5 Bewertung

8.5.1 Anforderungsbezogene Bewertung

Die im Rahmen der simulationsbasierten Untersuchung ermittelten Ergebnisse zeigen den Mehrwert des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme auf. In diesem Zusammenhang kann die anforderungsgerechte und prädiktive Berücksichtigung der notwendigen Kapazitäten in den Planungsergebnissen als wesentlicher Nutzen des Systems zur Produktionsplanung dargestellt werden. Die hierbei relevanten Rekonfigurationsvorgänge tragen unter Berücksichtigung der Rekonfigurationsaufwände maßgeblich zur Steigerung der Anpassungsfähigkeit von produzierenden Unternehmen bei. Im Rahmen des vorliegenden Abschnitts wird daher die Bewertung der in Kapitel 4 dargelegten Anforderungen an ein System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme vorgenommen (siehe Tabelle 12).

Anforderungen	Erfüllungsgrad
Adaptionsfähigkeit und Übertragbarkeit	
Konfigurationsabhängige Beschreibung von Produktionssystemen	
Zuordnung und Auswahl von Konfigurationen	
Integration der Skalierbarkeit in die Produktionsplanung	

Legende:



-  Anforderung nahezu vollständig erfüllt
-  Anforderung größtenteils erfüllt

Tabelle 12: Bewertung des Erfüllungsgrades der Anforderungen

Die Anforderung der *Adaptionsfähigkeit und Übertragbarkeit* wird von dem entwickelten Planungssystem erfüllt, da für einen anderen Anwendungsfall lediglich die Modellierung und die Strukturierung der Eingangsdaten als Anpassungsmaßnahmen vorgenommen werden müssen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, weitere Planungsdaten, wie z. B. Qualitätsdaten, im Rahmen der Produktionsplanung zu berücksichtigen und somit das System zu adaptieren. Weiterhin können neue Planungsfunktionalitäten, wie z. B. eine konkrete Maschinenbelegung, aus dem konfigurationsspezifischen Produktionsplan mit geringen Aufwänden abgeleitet werden. Des Weiteren kann die Integration in betriebliche Planungsabläufe durch die verwendeten Softwarewerkzeuge (z. B. Microsoft Excel[®]) gewährleistet werden. Da die Modellierung und die Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme allgemeingültig definiert wurden,

8 Anwendungsbeispiel und Bewertung

ist davon auszugehen, dass die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf unterschiedliche Anwendungsfälle und Branchen gegeben ist. Des Weiteren können unternehmensspezifische Randbedingungen und Zielgrößen im Rahmen des Systems zur Produktionsplanung berücksichtigt werden.

Mithilfe der Anwendung der Modellierungs- und Beschreibungsansätze kann die *konfigurationsabhängige Beschreibung von Produktionssystemen* sichergestellt werden. Exemplarisch für die Erfüllung der Anforderungen sind die Strukturierungsansätze sowie die Modellierung von Rekonfigurationsvorgängen anhand des Petri-Netz-basierten Ansatzes zu nennen. Darüber hinaus ermöglicht die Unterscheidung zwischen einer System- und einer Ressourcenkonfiguration die Betrachtung unterschiedlicher Konfigurationen im Planungsablauf. Durch die Einteilung in technologische und planerische Informationen können die Konfigurationen zudem für die Anwendung in der Produktionsplanung beschrieben werden. An dieser Stelle sei vor allem das Klassifikationsschema zur Abbildung von konfigurationsabhängigen Ressourcenfähigkeiten genannt, das auf Einteilungen von Fertigungs- und Montageprozessen aufgebaut ist.

Die Anforderung der *Zuordnung und Auswahl von Konfigurationen* wird im Rahmen der Methode zur Produktionsplanung durch den entwickelten Technologieabgleich erfüllt. Durch den Einsatz dieses Abgleichs ist es möglich, Ressourcenkonfigurationen den einzelnen Arbeitsvorgängen der vorliegenden Produktionsaufträge zuzuordnen und somit die Auswahlmöglichkeiten für die nachfolgenden Planungsschritte bereitzustellen. Darüber hinaus wurde eine Beschreibung des Rekonfigurationsaufwandes entwickelt, welche zudem als Rekonfigurationsmatrix in der Produktionsplanung zur Berechnung der konfigurationsabhängigen Kapazitätsbelastungsprofile verwendet wird. Durch die definierten Maßnahmen zur Anpassung der Konfigurationen hinsichtlich der Technologien und der Kapazität wird des Weiteren sichergestellt, dass kontextspezifische Eingriffsmöglichkeiten im Planungsprozess zur Erweiterung des Konfigurationsbereichs bereitgestellt werden können.

Die *Integration der Skalierbarkeit in die Produktionsplanung* wird insbesondere durch die in Kapitel 6 dargelegte Beschreibung der Skalierbarkeit rekonfigurierbarer Produktionssysteme erreicht. Im Speziellen kann mithilfe dieser Ansätze die Skalierbarkeit im Rahmen der Methode zur Produktionsplanung, wie z. B. bei der Kapazitätsabstimmung oder der Produktionsablaufplanung, durchgehend integriert werden. Exemplarisch ist an dieser Stelle die Beschreibung konfigurationsabhängiger Bearbeitungs- und Durchlaufzeiten zu nennen, aus denen z. B.

konfigurationsabhängige Belastungsprofile abgeleitet werden können. Hiermit wird die substanzielle Grundlage für die Skalierbarkeit der Produktionskapazitäten geschaffen. Die Integration und Anwendung der Skalierbarkeit wurde darüber hinaus im Rahmen der simulationsgestützten Validierung demonstriert.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch die Erfüllung der in Kapitel 4 dargelegten Anforderungen an ein System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme die übergeordnete Zielsetzung sowie die hierfür notwendigen Teilziele (vgl. Abschnitt 1.2) vollständig erfüllt werden.

8.5.2 Wirtschaftliche Bewertung

8.5.2.1 Allgemeines

Eine wirtschaftliche Bewertung des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme lässt sich bedingt allgemeingültig vornehmen, da diese von einer Vielzahl an unternehmensspezifischen Faktoren und Rahmenbedingungen abhängt. Beispielsweise zählen hierzu die Kenntnisse im Bereich der Modellierung und Spezifikation rekonfigurierbarer Produktionssysteme oder im Bereich des Operations Research. Im Allgemeinen wird die wirtschaftliche Bewertung einer Investition durch eine Betrachtung der *Aufwände* und dem gegenüberstehenden *Nutzen* durchgeführt.

Als Grundlage für eine wirtschaftliche Bewertung können die mit der Einführung eines Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme verbundenen *Aufwände* durch einmalige und laufende Kosten dargestellt werden. Des Weiteren lassen sich diese Kostenarten in sach- und personenbezogene Investitionskosten unterteilen. In diesem Zusammenhang umfassen die *einmaligen Kosten* u. a. die Investitionen für die Hard- und Software. Hierunter fallen z. B. die Anschaffung von Simulations-PCs sowie die Beschaffung der notwendigen Optimierungssoftware für die Umsetzung der Planungsmethode. Zusätzlich sind personenbezogene Investitionen zu berücksichtigen, wie Personalkosten für Entwicklungs- und Modellierungstätigkeiten (z. B. Beschreibung der Ressourcen), Schulungen für den Umgang mit dem Planungssystem sowie die Integration in bestehende Planungssysteme (z. B. Programmierung von Schnittstellen). Die *laufenden Kosten* schließen alle Aufwendungen ein, die für den Betrieb des Systems zur Produktionsplanung erforderlich sind. Diese umfassen u. a. Lizenzgebühren, die Personalkosten zur Aktualisierung der Planungsdatenbasis (z. B. Konfigurationsalternativen) sowie die Administration des Planungssystems.

8 Anwendungsbeispiel und Bewertung

Der Einsatz des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme resultiert in unterschiedlichen quantitativen und qualitativen Nutzenaspekten. Für eine monetäre Bewertung des Planungssystems gilt es in einem ersten Schritt, den *quantitativen Nutzen* zu evaluieren. In diesem Kontext können die charakteristischen Kennzahlen der in Abschnitt 8.4.5 dargestellten Simulationsstudien in den Fokus der Betrachtungen gestellt und als adäquate Basis für die Bewertung des quantitativen Nutzens angesehen werden. Beispielsweise können durch die Integration der Skalierbarkeit in die Produktionsplanung die notwendigen Produktionszeiten reduziert und die freien Kapazitäten in der Planung gesteigert werden. Darüber hinaus stellen die Reduzierung der Lagerbestände und der notwendigen Überstunden zur Deckung des Nachfragebedarfs weitere Effekte dar, die monetär quantifizierbar sind. Überdies lässt sich für den *qualitativen Nutzen* vor allem die gesteigerte Transparenz hinsichtlich der Fähigkeiten und Anpassungsbedarfe eines Produktionssystems anführen. Hiermit können im Rahmen der Produktionsplanung zusätzliche Nutzenaspekte generiert werden. Durch eine vorausschauende Berücksichtigung von Rekonfigurationen in der Planung können beispielsweise Rekonfigurationszeiten und -aufwände reduziert werden. Ein Produktionsstillstand kann folglich frühzeitig vermieden werden. Der dadurch realisierte erhöhte Nutzungsgrad eines rekonfigurierbaren Produktionssystems ermöglicht es zudem, die Eigenschaften dieser Systeme bereits frühzeitig bei Produktionsentscheidungen in Betracht zu ziehen. Diese resultierenden Nutzenpotenziale sind jedoch nur bedingt monetär quantifizierbar.

Für eine vollständige monetäre Bewertung des Aufwandes und des Nutzens ist ausgehend von den vorigen Ausführungen eine umfangreiche Analyse unternehmensspezifischer Faktoren und Rahmenbedingungen erforderlich. Eine allgemeingültige Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme kann daher an dieser Stelle nicht erfolgen. Nachfolgend soll dennoch eine beispielhafte monetäre Bewertung des Systems zur Produktionsplanung anhand der durchgeführten Simulationsstudien durchgeführt werden. Hierbei werden die erforderlichen Aufwände realitätsnah geschätzt und die quantifizierbaren Nutzenaspekte des Planungssystems mithilfe der Simulationsergebnisse ermittelt.

8.5.2.2 Wirtschaftlichkeitsrechnung am Anwendungsbeispiel

Die monetäre Bewertung der beispielhaften Umsetzung wird im Folgenden anhand der Produktionsszenarien des Anwendungsbeispiels dargestellt. Die darin enthaltenen Zahlenwerte sind realitätsnah, aber aufgrund der fehlenden Informa-

tionen teilweise geschätzt oder stammen aus Expertengesprächen. Dementsprechend soll die nachfolgende Wirtschaftlichkeitsrechnung lediglich die wirtschaftlichen Auswirkungen des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme illustrieren.

Für die Diskussion der Wirtschaftlichkeit des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme wird als *Referenzszenario* die Implementierung des Systems zur Produktionsplanung für die oben aufgeführten Produktionsszenarien (vgl. Abschnitt 8.4.3) definiert. Dahingegen wird im *Vergleichsszenario* eine konventionelle Produktionsplanung für die jeweiligen Szenarien durchgeführt. Für die Umsetzung und den Betrieb dieses Vergleichsszenarios fallen keine Investitionen an.

Die einmaligen *Investitionskosten* zur Realisierung des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme teilen sich in Sach- und Personalkosten auf (vgl. Tabelle 13). Die Sachkosten setzen sich zum einen aus den Investitionen für die Anschaffung der Optimierungssoftware und zum anderen aus den Aufwendungen für die notwendige Hardware zusammen. Insgesamt ergeben sich Sachkosten in Höhe von etwa 26.500 Euro.

Einmalige Investitionskosten			
Sachkosten			
Position	Menge	Stückkosten [EUR]	Gesamtkosten [EUR]
IT-Hardware (PC, Bildschirm, etc.)	2	1.500,00	3.000,00
Optimierungssoftware	1	23.500,00	23.500,00
Summe Sachkosten			26.500,00
Personalkosten			
Position	Personentage (PT)	Kosten/PT [EUR]	Gesamtkosten [EUR]
Hardware-Installation	2	600,00	1.200,00
Beschreibung und Spezifikation des Produktionssystems	10	1.100,00	11.000,00
Integration der Methode zur Produktionsplanung	10	1.100,00	11.000,00
Schulung der Produktionsplaner	5	1.100,00	5.500,00
Summe Personalkosten			28.700,00
Summe Investitionskosten			55.200,00

Tabelle 13: Ermittlung der Investitionskosten für die Umsetzung und Inbetriebnahme des Referenzszenarios (Expertenschätzung)

Des Weiteren fallen bei den Personalkosten Aufwendungen für die Installation der Hardware, die Entwicklungs- und Modellierungstätigkeiten, die Integration

8 Anwendungsbeispiel und Bewertung

in bestehende Planungssysteme sowie initiale Schulungen für die Produktionsplaner an. Für das Referenzszenario werden insgesamt Personalkosten in Höhe von 28.700 Euro veranschlagt. In der Summe belaufen sich die einmaligen Investitionskosten für die Umsetzung des Referenzszenarios somit auf 55.200 Euro. Dahingegen sind für die Implementierung des Vergleichsszenarios keine Investitionskosten zu berücksichtigen.

Die *laufenden Betriebskosten* belaufen sich für das Referenzszenario auf 15.200 Euro pro Jahr. Diese setzen sich zum einen aus Kosten für die Pflege und Aktualisierung der Planungsdaten des Planungssystems (z. B. Erweiterung der Konfigurationsalternativen) sowie zum anderen aus den anfallenden Lizenzgebühren für die Optimierungssoftware zusammen. In Tabelle 14 sind die geschätzten Betriebskosten im Referenzszenario dargestellt.

Laufende Betriebskosten			
Position	Menge oder PT	Kosten pro Einheit [EUR]	Gesamtkosten [EUR]
Lizenzgebühren pro Jahr [Stück]	1	2.000,00	2.000,00
Pflege und Aktualisierung der Planungsdaten [PT]	8	1.100,00	8.800,00
Pflege der Schnittstellen zu den Planungssystemen [PT]	4	1.100,00	4.400,00
Summe Betriebskosten pro Jahr			15.200,00

Tabelle 14: Ermittlung der laufenden Betriebskosten im Referenzszenario (Expertenschätzung)

Für die Quantifizierung des Nutzens des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme ist es erforderlich, die möglichen Einsparungen zu ermitteln. Hierfür werden die im Rahmen der Simulationsstudien ermittelten Ergebnisse der jeweiligen Produktionsszenarien herangezogen (vgl. Abschnitt 8.4.5). Die hierbei ermittelten Nutzenpotenziale lassen sich vor allem auf die Integration der konfigurationsabhängigen Planungsdaten in die Produktionsplanung zurückführen. Im Speziellen kann das Referenzmodell im Rahmen der Planungsergebnisse die notwendigen Produktionszeiten durch eine korrekte Parametrierung reduzieren. Dahingegen kann das Vergleichsmodell die Nachfrage in vielen Fällen nicht komplett in der Planung berücksichtigen. Zur Deckung der Nachfrage müssen in der konventionellen Produktionsplanung folglich Überstunden eingeplant werden. Als Ergebnis der simulationsbasierten Untersuchung der Produktionsszenarien wurde festgestellt, dass für die Bewältigung der Nachfrage durch das Vergleichsmodell insgesamt bis zu 1.313 Stunden an zusätzlicher Produktionszeit eingeplant werden müssen. Diese berechnen sich aus der Takt-

zeit des Vergleichsmodells und der resultierenden Fehlmenge. Die zeitliche und monetäre Einsparung des Referenzmodells lässt sich folglich mithilfe der notwendigen Überstunden beziffern. Multipliziert mit dem Stundensatz der Standardkonfiguration in Höhe von 120 Euro pro Stunde (Expertenschätzung) ergibt sich der wirtschaftliche Vorteil aus der Produktionszeit für die entsprechenden Produktionsszenarien. In Summe ergeben sich für die Produktionsszenarien Einsparungen von bis zu 157.560 Euro (vgl. Tabelle 16).

Einsparungen								
Produktionszeit								
	Szenario 1		Szenario 2		Szenario 3		Szenario 4	
Position	Referenz	Vergleich	Referenz	Vergleich	Referenz	Vergleich	Referenz	Vergleich
Überstunden [h]	-	493	-	1.313	-	420	-	0
Zeitvorteil Referenzmodell [h]	493		1.313		420		0	
Kostensatz [EUR/h]	120,00							
Summe Produktion [EUR]	59.160,00		157.560,00		50.400,00		0,00	
Freie Kapazitäten								
Produktionszeit [h]	1.663	1.741	1.840	1.840	1.824	1.840	1.429	1.445
Freie Kapazität [h]	177	99	0	0	16	0	411	395
Differenz Kapazität [h]	78		0		16		16	
Mögliche Absatzmenge [Stk.]	29.872		0		6.128		6.128	
Umsatzerlös [EUR/Stk.]	0,50							
Summe Umsatzerlös [EUR]	14.936,00		0,00		3.064,00		3.064,00	
Lagerbestand								
Mittlerer Lagerbestand [Stk.]	1.325	4.680	2.290	0	2.250	3.356	1.497	7.438
Wert des Produktes [EUR]	25,00							
Lagerkostensatz [%]	15,0							
Lagerkosten [EUR]	4.968,75	17.550,00	8.587,50	0,00	8.437,50	12.588,00	5.613,75	27.892,56
Summe Lager [EUR]	12.581,25		-8.587,50		4.147,50		22.278,75	
Summe [EUR]	86.677,25		148.972,50		57.611,50		25.342,75	
Jährlicher Rückfluss [EUR]	71.477,25		133.772,50		42.411,50		10.142,75	

Tabelle 15: Ermittlung der Einsparungen aus den Produktionszeiten, freien Kapazitäten und Lagerbeständen

Des Weiteren können die freien Kapazitäten zur Erzielung zusätzlicher Umsatzerlöse genutzt werden. In diesem Zusammenhang wird davon ausgegangen, dass der durchschnittliche Umsatzerlös pro Ventil 0,50 Euro beträgt. Infolgedessen können durch das Referenzmodell bis zu 14.936 Euro mehr erzielt werden. Einen erheblichen Anteil an der Reduzierung der Gesamtkosten haben außerdem die Lagerbestände. Für die Berechnung der Lagerkosten wird der Wert eines Produktes auf 25 Euro taxiert. Zudem wird für beide Planungsmodelle ein Lagerkostensatz von 15 % angenommen. Eine etwaige Lagervergrößerung, die aufgrund der erhöhten Bestände des Vergleichsmodells notwendig sein könnte, wird nicht weiter betrachtet. Bis auf das zweite Szenario, bei dem das Vergleichsmodell wegen der hohen Nachfrage keinen Lagerbestand aufbauen kann, ergeben sich

8 Anwendungsbeispiel und Bewertung

durch das Referenzmodell Einsparungen bei den Lagerkosten zwischen 4.147,50 Euro und 22.278,75 Euro. Zusammenfassend ergeben sich für die untersuchten Produktionsszenarien durch das Referenzmodell jährliche Einsparungen in Höhe von 25.342,75 Euro bis 148.972,50 Euro. Vermindert um die laufenden Betriebskosten in Höhe von 15.200 Euro kann somit durch das System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme ein jährlicher Rückfluss zwischen 10.142,75 Euro und 133.772,50 Euro erzielt werden.

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Anwendungsbeispiels wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Amortisationsrechnung durchgeführt. Grundsätzlich kann mithilfe dieses Verfahrens die sogenannte Amortisationszeit (t_{AZ}) berechnet werden, d. h. diejenige Zeitdauer, die notwendig ist, bis die Einsparungen die einmaligen Investitionskosten kompensiert haben (PAPE 2011). Im Speziellen erfolgt die Berechnung der Amortisationszeit für das Beispiel durch Bildung des Quotienten aus den Investitionskosten und dem jährlichen Rückfluss. Die Amortisationszeit für das System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme liegt für die Produktionsszenarien zwischen 0,41 Jahren (151 Tage) und 5,44 Jahren (vgl. Tabelle 16).

Position	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Investitionskosten [EUR]	55.200,00			
Jährlicher Rückfluss [EUR]	71.477,25	133.772,50	42.411,50	10.142,75
Amortisationszeit t_{AZ} [a]	0,77	0,41	1,30	5,44
Amortisationszeit t_{AZ} [d]	282	151	475	1.986

Tabelle 16: Ermittlung der Amortisationszeiten für die Szenarien

Im Speziellen können mit dem System zur Produktionsplanung insbesondere für diejenigen Produktionsszenarien, die durch eine gesteigerte Nachfrage, häufige Bedarfsschwankungen oder Funktionsänderungen gekennzeichnet sind, geringere Amortisationszeiten realisiert werden. Dies ist dadurch begründet, dass für diese Szenarien einerseits die Skalierbarkeit der Kapazitäten die Synchronisation der Produktions- mit der Nachfragemenge bei gleichzeitiger Reduzierung der Lagerbestände ermöglicht und andererseits Funktionsänderungen prädiktiv durch Rekonfigurationen in den Planungsergebnissen berücksichtigt werden. Grundsätzlich hat sich nach Ablauf der Amortisationszeit der einmalige Investitionsaufwand über den jährlichen Rückfluss refinanziert. Bei Annahme einer Nutzungsdauer des Systems von 6 Jahren kann die Amortisationszeit für alle Produktionsszenarien als ökonomisch sinnvoll eingestuft werden (VOEGELE & SOMMER 2011).

Die anforderungsbezogene Bewertung des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme hat gezeigt, dass die Anforderungen an das Planungssystem vollständig erfüllt werden. Des Weiteren wurde im Rahmen der Bewertung der Wirtschaftlichkeit dargestellt, dass mit dem Planungssystem für das Anwendungsbeispiel ein wirtschaftlicher Vorteil realisiert werden kann. Hierfür ist allerdings eine nahezu vollständige Ermittlung und Analyse der unternehmensspezifischen Kosten und Nutzenaspekte notwendig.

8.6 Fazit

In dem vorliegenden Kapitel wurden die Anwendung des Systems zur Produktionsplanung sowie die simulationsbasierte Umsetzung und Validierung anhand eines realen Anwendungsbeispiels dargestellt. Im Speziellen wurde mit der Durchführung unterschiedlicher Simulationsstudien der Nutzen des Systems zur Produktionsplanung quantifiziert. Grundsätzlich können mit dem Planungssystem die Produktionszeiten und Lagerbestände bei einer gleichzeitigen Steigerung der Produktivität reduziert werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse konnte für die jeweiligen Produktionsszenarien eine erfolgreiche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme durchgeführt werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme entwickelt, das die Integration der Skalierbarkeit von Kapazitäten sowie die Anpassung von Funktionalitäten in der PPS ermöglicht. Die spezifischen Rahmenbedingungen für produzierende Unternehmen am Hochlohnstandort Deutschland zeigen, dass aufgrund von Verkürzungen der Produkt- und Technologiezyklen und der zunehmenden Nachfrage nach individuellen Produkten ein turbulentes Umfeld vorzufinden ist. Um nachhaltig erfolgreich zu sein, müssen produzierende Unternehmen ihre bestehenden Produktionskonzepte mit einer zunehmenden Änderungshäufigkeit anpassen. Rekonfigurierbare Produktionssysteme gelten in diesem Zusammenhang als eine technische Möglichkeit, proaktiv und schnell auf die veränderten Anforderungen des Marktes einzugehen. Ihre spezifischen Eigenschaften ermöglichen die Skalierbarkeit der Produktionskapazitäten sowie die Anpassung der systemseitigen Funktionalitäten. Im Gegensatz dazu weisen die zur Produktionsplanung bereits verfügbaren Systeme nicht das Maß an Veränderungsfähigkeit auf, das für die Planung und Steuerung der Produktionsabläufe mit rekonfigurierbaren Produktionssystemen notwendig ist.

Vor dem Hintergrund der Ausgangssituation wurde der relevante Stand der Technik und Forschung aufgezeigt. Hierbei wurden schwerpunktmäßig Ansätze zur Modellierung von Produktionssystemen sowie zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme analysiert. Anschließend erfolgten die Ableitung des resultierenden Handlungsbedarfs und die Formulierung von Anforderungen an eine Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme. Darauf aufbauend wurde für die Integration der Skalierbarkeit und die Anpassung der Funktionalität rekonfigurierbarer Produktionssysteme ein System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme entwickelt. Das System besteht aus der Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme sowie der Methode zur Produktionsplanung.

Die Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme ermöglicht die Abbildung konfigurationsabhängiger Eigenschaften für die PPS. Grundlegend wird das Verhalten eines rekonfigurierbaren Produktionssystems durch eine Petri-Netz-basierte Modellierung abgebildet und für die Produktions-

planung nutzbar gemacht. Mithilfe der Stellen des Konfigurationsnetzes werden die Konfigurationen eines Systems oder einer Produktionsressource repräsentiert. Die produktionstechnischen Fähigkeiten einzelner Konfigurationen können zudem anhand eines Klassifikationsschemas spezifiziert werden. Darüber hinaus kann eine Bewertung des Aufwandes für Rekonfigurationsvorgänge sowie deren Abbildung in einer Rekonfigurationsmatrix vorgenommen werden. Als Grundlage für die Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme dient die Skalierbarkeit, die aus Sicht der Produktionsplanung durch konfigurationsabhängige Bearbeitungs- bzw. Taktzeiten beschrieben wird.

Die Methode zur Produktionsplanung bildet das wesentliche Element des Planungssystems. Die Methode besteht hierbei aus der Produktionsbedarfs-, der Ressourcen- und der Produktionsablaufplanung. Die erste Funktion der Methode besteht in der Aufnahme und Beschreibung der produktseitigen Anforderungen sowie der Rahmenbedingungen. Die Zuordnung von Konfigurationen und Arbeitsvorgängen wird dabei durch einen Technologieabgleich realisiert. Sollten Rekonfigurationen zur Erweiterung des Konfigurationsbereichs notwendig sein, so können sowohl der Rekonfigurationsbedarf ermittelt als auch Anpassungsmaßnahmen durchgeführt werden. Darauf aufbauend werden im Rahmen der Ressourcenplanung die Konfigurationsalternativen generiert sowie Möglichkeiten zur Kapazitätsabstimmung bereitgestellt. Die Verknüpfung der Ergebnisse der Produktionsbedarfs- und der Ressourcenplanung erfolgt anschließend durch eine Produkt-Konfigurations-Kompatibilitäts-Matrix. Abschließend wird in der Produktionsablaufplanung die Bestimmung der kostenminimalen Ressourcenkonfiguration vorgenommen. Aufgrund der Vielzahl an Entscheidungsvariablen basiert die Produktionsablaufplanung auf einem mathematischen Modell, das die Möglichkeit bietet, mit Methoden des Operations Research die Termine, die Losgrößen und die Reihenfolgen festzulegen.

Die Anwendung des Systems an einem realen Anwendungsbeispiel hat gezeigt, dass der industrielle Einsatz des Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme möglich ist. Die quantitativen Nutzenaspekte des Planungssystems wurden durch die Ergebnisse der simulationsgestützten Validierung belegt. Als Vergleichsmodell diente dabei eine konventionelle Planungsmethode, welche die Produktionsplanung mit statischen Planungsdaten und folglich mit einer in vielen Fällen fehlerhaften Parametrierung durchführt. Abschließend wurde dargestellt, dass das System zur Produktionsplanung die aufgestellten Anforderungen erfüllt und eine wirtschaftliche Anwendung möglich ist.

9.2 Ausblick

Das vorgestellte System zur Produktionsplanung wurde mit Fokus auf die durchgehende Integration der Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme in die Produktionsplanung entwickelt. Im Speziellen wurde dabei das Hauptaugenmerk auf die Skalierbarkeit der Produktionskapazitäten und die Anpassung von Funktionalitäten gerichtet. Ausgehend hiervon lassen sich zusätzliche Forschungsfelder identifizieren.

Unter Berücksichtigung der generierten Produktionsprogramme ist die Weitergabe und die Umsetzung der Planvorgaben durch eine zu adaptierende Produktionssteuerung, die insbesondere die kurzfristigen Anpassungs- und Rekonfigurationsmaßnahmen z. B. zur Behebung von Kapazitätsengpässen nutzen kann, ein vielversprechender Ansatz für zukünftige Forschungsarbeiten. In diesem Kontext nehmen vor allem die Bewertung, die Klassifikation und die Sequenzierung der Rekonfigurationsmaßnahmen und -vorgänge eine wichtige Rolle ein.

Für eine automatisierte Aktualisierung der Planungsdaten wird des Weiteren empfohlen, das Planungssystem um die Integration von Echtzeitdaten und Selbstbeschreibungen der Produktionsressourcen zu erweitern. Im Speziellen können planungsrelevante Informationen, die durch eine zunehmende vertikale und horizontale Vernetzung zur Verfügung stehen, zur Erweiterung der notwendigen Planungsdaten sowie zur automatischen Beschreibung der Konfigurationsalternativen genutzt werden. In diesem Zusammenhang gilt es, die Vielzahl an produktionsrelevanten Daten mithilfe entsprechender Datenverarbeitungsverfahren aufzubereiten und für die Produktionsplanung und -steuerung nutzbar zu machen.

10 Literaturverzeichnis

ABBASI & HOUSHMAND 2011

Abbasi, M.; Houshmand, M.: Production planning and performance optimization of reconfigurable manufacturing systems using genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 54 (2011) 1-4, S. 373-392.

ABDI 2009

Abdi, M. R.: Layout configuration selection for reconfigurable manufacturing systems using the fuzzy AHP. *International Journal of Manufacturing Technology and Management* 17 (2009) 1, S. 149-165.

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: *Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen.* München: Carl Hanser 2011. ISBN: 9783446425958.

ABELE & WÖRN 2009

Abele, E.; Wörn, A.: Reconfigurable Machine Tools and Equipment. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems.* London: Springer 2009, S. 111-125. ISBN: 9781848820661.

ABELE ET AL. 2006A

Abele, E.; Elzenheimer, J.; Liebeck, T.; Meyer, T.: Globalization and Decentralization of Manufacturing. In: Dashchenko, A. I. (Hrsg.): *Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories.* Berlin, New York: Springer 2006, S. 3-13. ISBN: 9783540293910.

ABELE ET AL. 2006B

Abele, E.; Liebeck, T.; Wörn, A.: Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 55 (2006) 1, S. 433-436.

ASL & ULSOY 2003

Asl, F. M.; Ulsoy, A. G.: Stochastic Optimal Capacity Management in Reconfigurable Manufacturing Systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 52 (2003) 1, S. 371-374.

AUST 1990

Aust, B.: *Ein Bewertungsverfahren für die Produktionsplanung bei auftragsorientierter Werkstattfertigung.* Diss. Universität Göttingen. 1990.

AZAB & ELMARAGHY 2007

Azab, A.; ElMaraghy, H. A.: Mathematical Modeling for Reconfigurable Process Planning. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56 (2007) 1, S. 467-472.

AZAB & NADERI 2015

Azab, A.; Naderi, B.: Modelling the problem of production scheduling for reconfigurable manufacturing systems. *Procedia CIRP* 33 (2015), S. 76-80.

AZAB ET AL. 2009

Azab, A.; ElMaraghy, H. A.; Samy, S. N.: Reconfiguring Process Plans: A New Approach to Minimize Change. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*. London: Springer 2009, S. 179-194. ISBN: 9781848820661.

BACKHAUS ET AL. 2012

Backhaus, J.; Hees, A.; Krug, S.; Hüttner, S.; Reinhart, G.: *Wandlungsfähigkeit in der Praxis kleiner und mittlerer Unternehmen*. VDI-Z (2012) 9, S. 91-93.

BAUERNHANSL 2014

Bauernhansl, T. (Hrsg.): *Wandlungsfähigkeit live. Sozio-technische Produktionssysteme erfolgreich gestalten*. Ludwigsburg: LOG X. ISBN: 9783932298516.

BENSMACHINE ET AL. 2011

Bensmaine, A.; Dahane, M.; Benyoucef, L.: Simulation-based NSGA-II approach for multi-unit process plans generation in reconfigurable manufacturing system. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): *16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFa)*. Toulouse, 05.-09. September 2011. Toulouse: IEEE 2011, S. 1-8.

BENSMACHINE ET AL. 2012

Bensmaine, A.; Dahane, M.; Benyoucef, L.: Process Plan Generation in Reconfigurable Manufacturing Systems Using AMOSA and TOPSIS. In: Theodor, B. (Hrsg.): *14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*. Bucharest, 23.-25. Mai 2012. Bucharest: Elsevier 2012, S. 560-565.

BENSMACHINE ET AL. 2013

Bensmaine, A.; Dahane, M.; Benyoucef, L.: A non-dominated sorting genetic algorithm based approach for optimal machines selection in reconfigurable manufacturing environment. *Computers & Industrial Engineering* 66 (2013) 3, S. 519-524.

BENSMARINE ET AL. 2014

Bensmaine, A.; Dahane, M.; Benyoucef, L.: A new heuristic for integrated process planning and scheduling in reconfigurable manufacturing systems. *International Journal of Production Research* 52 (2014) 12, S. 3583-3594.

BERLAK ET AL. 2004

Berlak, J.; Fauser, M.; Schubert, M.-A.: Fertigungsfeinplanung mit JobDISPO MES. *PPS Management* 9 (2004) 2, S. 45-48.

BI ET AL. 2008

Bi, Z. M.; Lang, S. Y. T.; Shen, W.; Wang, L.: Reconfigurable manufacturing systems: the state of the art. *International Journal of Production Research* 46 (2008) 4, S. 967-992.

BRECHER ET AL. 2011

Brecher, C.; Jeschke, S.; Schuh, G.; Aghassi, S.; Arnoscht, J.; Bauhoff, F.; Fuchs, S.; Jooß, C.; Karmann, O.; Kozielski, S.; Orilski, S.; Richert, A.; Roderburg, A.; Schiffer, M.; Schubert, J.; Stiller, S.; Tönissen, S.; Welter, F.: Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. In: Brecher, C. (Hrsg.): *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Berlin, Heidelberg: Springer 2011, S. 17-81. ISBN: 9783642206931.

BROWNE ET AL. 1984

Browne, J.; Dubois, D.; Rathmill, K.; Sethi, S. P.: Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS Magazine* 2 (1984) 2, S. 114-117.

BRUCCOLERI ET AL. 2005

Bruccoleri, M.; Lo Nigro, G.; Perrone, G.; Renna, P.; Noto La Diega, S.: Production planning in reconfigurable enterprises and reconfigurable production systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54 (2005) 1, S. 433-436.

BUFFA 1967

Buffa, E. S.: Aggregate planning for production. *Business Horizons* 10 (1967) 3, S. 87-97.

CARAMIA & DELL'OLMO 2006

Caramia, M.; Dell'Olmo, P.: Effective resource management in manufacturing systems. *Optimization algorithms for production planning*. London, New York: Springer 2006. ISBN: 1846280052.

CHALFOUN ET AL. 2013

Chalfoun, I.; Kouiss, K.; Huyet, A.-L.; Bouton, N.; Ray, P.: Proposal for a Generic Model Dedicated to Reconfigurable and Agile Manufacturing Systems (RAMS). *Procedia CIRP* 7 (2013), S. 485-490.

CIRP 2014

CIRP The International Academy for Production Engineering (Hrsg.): CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Berlin: Springer 2014. ISBN: 9783642206160.

CISEK 2005

Cisek, R.: Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2005. (Forschungsberichte *iwb*, Nr. 191).

CISEK ET AL. 2002

Cisek, R.; Habicht, C.; Neise, P.: Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 97 (2002) 9, S. 441-445.

DASHCHENKO 2006A

Dashchenko, A. I. (Hrsg.): Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories. Berlin, New York: Springer 2006. ISBN: 9783540293910.

DASHCHENKO 2006B

Dashchenko, O. A.: Computer Supported Decision Making System that Generates and Optimizes Layouts of Reconfigurable Manufacturing Equipment at the Early Stage of Design. In: Dashchenko, A. I. (Hrsg.): Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories. Berlin, New York: Springer 2006, S. 295-325. ISBN: 9783540293910.

DEIF & ELMARAGHY 2006

Deif, A. M.; ElMaraghy, W.: A Systematic Design Approach for Reconfigurable Manufacturing Systems. In: ElMaraghy, H. A. et al. (Hrsg.): Advances in Design. London: Springer 2006, S. 219-228. ISBN: 1846280044.

DEIF & ELMARAGHY 2007

Deif, A. M.; ElMaraghy, W.: Investigating optimal capacity scalability scheduling in a reconfigurable manufacturing system. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 32 (2007) 5-6, S. 557-562.

DHUPIA ET AL. 2007

Dhupia, J.; Powalka, B.; Katz, R.; Ulsoy, A. G.: Dynamics of the arch-type reconfigurable machine tool. International Journal of Machine Tools and Manufacture 47 (2007) 2, S. 326-334.

DIN 8580

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth 2003.

DOHMS 2001

Dohms, R.: Methodik zur Bewertung und Gestaltung wandlungsfähiger, dezentraler Produktionsstrukturen. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Shaker 2001.

DOMSCHKE & DREXL 2007

Domschke, W.; Drexl, A.: Einführung in Operations Research. Mit 63 Tabellen. 7. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 3540709487.

DOU ET AL. 2009

Dou, J.; Dai, X.; Meng, Z.: Graph theory-based approach to optimize single-product flow-line configurations of RMS. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 41 (2009) 9-10, S. 916-931.

DOU ET AL. 2011

Dou, J.; Dai, X.; Meng, Z.: A GA-based approach for optimizing single-part flow-line configurations of RMS. Journal of Intelligent Manufacturing 22 (2011) 2, S. 301-317.

DRABOW 2006

Drabow, G.: Modulare Gestaltung und ganzheitliche Bewertung wandlungsfähiger Fertigungssysteme. Diss. Universität Hannover. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2006. (Berichte aus dem IFW, Band 05/2006).

EGUIA ET AL. 2011

Eguia, I.; Lozano, S.; Racero, J.; Guerrero, F.: A methodological approach for designing and sequencing product families in Reconfigurable Disassembly Systems. Journal of Industrial Engineering and Management 4 (2011) 3, S. 418-435.

EGUIA ET AL. 2013

Eguia, I.; Racero, J.; Guerrero, F.; Lozano, S.: Cell formation and scheduling of part families for reconfigurable cellular manufacturing systems using Tabu search. SIMULATION 89 (2013) 9, S. 1056-1072.

ELMARAGHY 2006

ElMaraghy, H. A.: Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. International Journal of Flexible Manufacturing Systems 17 (2006) 4, S. 261-276.

ELMARAGHY 2007

ElMaraghy, H. A.: Reconfigurable Process Plans For Responsive Manufacturing Systems. In: Cunha, P. F. et al. (Hrsg.): Digital Enterprise Technology. Boston: Springer 2007, S. 35-44. ISBN: 9780387498638.

ELMARAGHY & WIENDAHL 2009

ElMaraghy, H.; Wiendahl, H.-P.: Changeability - An Introduction. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. London: Springer 2009, S. 3-24. ISBN: 9781848820661.

ELMASRY ET AL. 2014

Elmasry, S. S.; Youssef, A. M.; Shalaby, M. A.: Investigating Best Capacity Scaling Policies for Different Reconfigurable Manufacturing System Scenarios. Procedia CIRP 17 (2014), S. 410-415.

EVERSHEIM 2002

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik. 4. Aufl. Berlin: Springer 2002. ISBN: 3540420169.

FANDEL ET AL. 1994

Fandel, G.; François, P.; Gubitz, K.-M.: PPS-Systeme. Grundlagen, Methoden, Software, Marktanalyse. Berlin, Heidelberg: Springer 1994. ISBN: 9783662093955.

GALÁN 2008

Galán, R.: Hybrid Heuristic Approaches for Scheduling in Reconfigurable Manufacturing Systems. In: Kacprzyk, J. et al. (Hrsg.): Metaheuristics for Scheduling in Industrial and Manufacturing Applications. Berlin: Springer 2008, S. 211-253. ISBN: 9783540789840.

GEIGER 2015

Geiger, F.: System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2015. (Forschungsberichte *iwb*, Nr. 311).

GLASER ET AL. 1991

Glaser, H.; Geiger, W.; Rohde, V.: PPS - Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Konzepte, Anwendungen. Wiesbaden: Gabler 1991.

GOULD 1998

Gould, L. S.: Introducing APS: Getting production in lock step with customer demand. Automotive Manufacturing & Production 110 (1998) 5, S. 54-58.

GÜNTHNER ET AL. 2006

Günthner, W. A.; Wilke, M.; Zäh, M. F.; Aull, F.; Rudolf, H.: Produktion individualisierter Produkte. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Individualisierte Produkte-Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. 1. Aufl. Berlin: Springer 2006, S. 63-88. ISBN: 9783540255062.

GYULAI ET AL. 2014A

Gyulai, D.; Kádár, B.; Kovács, A.; Monostori, L.: Capacity management for assembly systems with dedicated and reconfigurable resources. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63 (2014) 1, S. 457-460.

GYULAI ET AL. 2014B

Gyulai, D.; Kádár, B.; Monostori, L.: Capacity Planning and Resource Allocation in Assembly Systems Consisting of Dedicated and Reconfigurable Lines. *Procedia CIRP* 25 (2014), S. 185-191.

HACKSTEIN 1989

Hackstein, R.: *Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Ein Handbuch für die Betriebspraxis.* 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. 1989. ISBN: 3184009246.

HALLER 1999

Haller, M.: *Bewertung der Flexibilität automatisierter Materialflusssysteme der variantenreichen Grossserienproduktion.* Diss. Technische Universität München. München: Utz 1999.

HEES & REINHART 2015

Hees, A.; Reinhart, G.: Approach for Production Planning in Reconfigurable Manufacturing Systems. *Procedia CIRP* 33 (2015), S. 70-75.

HEES ET AL. 2015

Hees, A.; Zellner, K.; Reinhart, G.: Produktionsplanung in RMS. System für die Planung von Produktionsabläufen in rekonfigurierbaren Produktionssystemen (RMS). *wt Werkstattstechnik online* 105 (2015) 4, S. 209-214.

HEES ET AL. 2016A

Hees, A.; Lipp, L.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Konfigurationsmanagement für rekonfigurierbare Produktionssysteme. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (2016) 1-2, S. 11-14.

HEES ET AL. 2016B

Hees, A.; Lipp, L.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: System for Production Planning of Reconfigurable Manufacturing Systems. In: University of Stellenbosch (Hrsg.): *International Conference on Competitive Manufacturing (COMA)*. Stellenbosch, 27.-29. Januar 2016. Stellenbosch: 2016, S. 345-350.

HEES ET AL. 2016C

Hees, A.; Bayerl, C.; Van Vuuren, B.; Schutte, C.S.L.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: A production planning method to optimally exploit the potential of reconfigurable manufacturing systems. In: CIRP (Hrsg.): 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME). Neapel, 20.-22. Juli 2016. Neapel: CIRP 2016.

HEGER 2007

Heger, C. L.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2007. (Berichte aus dem IFA, Band 01/2007).

HEISEL & MEITZNER 2002

Heisel, U.; Meitzner, M.: Technische Wissensbibliothek zur Rekonfigurierung von Fertigungssystemen. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 97 (2002) 7/8, S. 397-399.

HEISEL & MEITZNER 2004

Heisel, U.; Meitzner, M.: Rekonfigurierbare Bearbeitungssysteme. Modulare Werkzeugmaschinenysteme zur Anpassung an den Produktlebenszyklus. wt Werkstattstechnik online 94 (2004) 10, S. 517-520.

HERNÁNDEZ 2003

Hernández, R.: Systematik und Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verl. 2003. (Fortschritt-Berichte VDI: Band 149, Reihe 16, Technik und Wirtschaft).

HILLIER & LIEBERMAN 2010

Hillier, F. S.; Lieberman, G. J.: Introduction to operations research. 9. Aufl. New York: McGraw-Hill 2010.

ISO/DIS 10303-214

ISO/DIS 10303-214: Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 214: Application protocol: Core data for automotive mechanical design processes: 2003.

JACOB 2008

Jacob, O.: ERP Value. In: Jacob, O. (Hrsg.): ERP Value. Signifikante Vorteile mit ERP-Systemen. Berlin: Springer 2008, S. 1-22. ISBN: 3540744401.

JAEHN & PESCH 2014

Jaehn, F.; Pesch, E.: Ablaufplanung. Einführung in Scheduling. Berlin, Heidelberg: Springer 2014. ISBN: 9783642544385.

JAIN & PALEKAR 2005

Jain, A.; Palekar, U. S.: Aggregate production planning for a continuous reconfigurable manufacturing process. *Computers & Operations Research* 32 (2005) 5, S. 1213-1236.

JANORSCHKE & PRITZEL 2009

Janorschke, B.; Pritzel, C.: Wandlungsfähigkeit. In: Schenk, M. (Hrsg.): Industrielle Dienstleistungen und Internationalisierung. One-stop services als erfolgreiches Konzept. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2009, S. 409-438. ISBN: 9783834913593.

JOVANE ET AL. 2009

Jovane, F.; Westkämper, E.; Williams, D. J. (Hrsg.): The manuFuture road. Towards competitive and sustainable high-adding-value manufacturing. Berlin: Springer 2009. ISBN: 9783540770114.

KAGERMANN ET AL. 2013

Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J.: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. Berlin: 2013.

KARL 2014

Karl, F.: Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2014. (Forschungsberichte *iwb*, Nr. 298).

KARL ET AL. 2012

Karl, F.; Reinhart, G.; Zäh, M. F.: Planning of Reconfigurations on Manufacturing Resources. *Procedia CIRP* 3 (2012), S. 608-613.

KIRCHNER ET AL. 2003

Kirchner, S.; Winkler, R.; Westkämper, E.: Unternehmensstudie zur Wandlungsfähigkeit von Unternehmen. *wt Werkstattstechnik online* 93 (2003) 4, S. 254-260.

KIRCHER ET AL. 2004

Kircher, C.; Seyfarth, M.; Wurst, K.-H.: Modellbasiertes Rekonfigurieren von Werkzeugmaschinen. *wt Werkstattstechnik online* 94 (2004) 5, S. 179-183.

KLEIN & SCHOLL 2004

Klein, R.; Scholl, A.: Planung und Entscheidung. Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse. München: Vahlen 2004. ISBN: 3800630605.

KLEINE ET AL. 2008

Kleine, O.; Kinkel, S.; Jäger, A.: Flexibilität durch Technologieeinsatz? – Nutzung und Erfolgswirkung flexibilitätsfördernder Technologien. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2008, S. 78-92. ISBN: 9783939026969.

KLETTI 2007

Kletti, J.: Manufacturing Execution Systems (MES). Berlin: Springer 2007. ISBN: 9783540280101.

KLETTI & SCHUMACHER 2011

Kletti, J.; Schumacher, J.: Die perfekte Produktion. Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT). Berlin: Springer 2011. ISBN: 9783642138447.

KLUGE 2011

Kluge, S.: Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme. Diss. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter 2011. (IPA-IAO Forschung und Praxis, Nr. 510).

KNOCHE 2005

Knoche, K.: Generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Shaker 2005. (Berichte aus der Produktionstechnik, Band 05/2005).

KOREN 2006

Koren, Y.: General RMS Characteristics. Comparison with Dedicated and Flexible Systems. In: Dashchenko, A. I. (Hrsg.): Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories. Berlin, New York: Springer 2006, S. 27-46. ISBN: 9783540293910.

KOREN 2013

Koren, Y.: The rapid responsiveness of RMS. International Journal of Production Research 51 (2013) 23-24, S. 6817-6827.

KOREN & SHPITALNI 2010

Koren, Y.; Shpitalni, M.: Design of reconfigurable manufacturing systems. Journal of Manufacturing Systems 29 (2010) 4, S. 130-141.

KOREN ET AL. 1999

Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F.; Moriwaki, T.; Pritschow, G.; Ulsoy, G.; Van Brussel, H.: Reconfigurable Manufacturing Systems. CIRP Annals - Manufacturing Technology 48 (1999) 2, S. 6-12.

KURBEL 2003

Kurbel, K.: Produktionsplanung und -steuerung. Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen. 5. Aufl. München, Wien: Oldenbourg 2003. ISBN: 3486272993.

KURBEL 2005

Kurbel, K.: Produktionsplanung und -steuerung. Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen. 6. Aufl. München: Oldenbourg 2005. ISBN: 3486575783.

LANDERS ET AL. 2001

Landers, R. G.; Min, B.-K.; Koren, Y.: Reconfigurable Machine Tools. CIRP Annals - Manufacturing Technology 50 (2001) 1, S. 269-274.

LAPPE ET AL. 2014

Lappe, D.; Toonen, C.; Scholz-Reiter, B.: Kapazitätssteuerung auf Basis von Werkzeugmaschinen. Durchlaufzeitharmonisierung in der Werkstattfertigung durch den Einsatz rekonfigurierbarer Werkzeugmaschinen. Industrie Management 30 (2014) 5, S. 17-22.

LAU 2010

Lau, C.: Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2010. (Forschungsberichte *iwb*, Nr. 238).

LI & XIE 2006

Li, A.; Xie, N.: A Robust Scheduling for Reconfigurable Manufacturing System Using Petri Nets and Genetic Algorithm. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, 21.-23. Juni 2006. Dalian: IEEE, S. 7302-7306.

LI ET AL. 2012

Li, G. Q.; Mitrouchev, P.; Wang, Y.; Brissaud, D.; Lu, L. X.: Evaluation of the logistic model of the reconfigurable manufacturing system based on generalised stochastic Petri nets. International Journal of Production Research 50 (2012) 22, S. 6249-6258.

LILES & HUFF 1990

Liles, D. H.; Huff, B. L.: A computer based production scheduling architecture suitable for driving a reconfigurable manufacturing system. Computers & Industrial Engineering 19 (1990) 1-4, S. 1-5.

LINDEMANN & BAUMBERGER 2006

Lindemann, U.; Baumberger, G. C.: Individualisierte Produkte. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. 1. Aufl. Berlin: Springer 2006, S. 7-18. ISBN: 9783540255062.

LÖDDING 2008

Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Berlin, Heidelberg: Springer 2008. ISBN: 3540202323.

LOOS 1999

Loos, P.: Grunddatenverwaltung und Betriebsdatenerfassung als Basis der Produktionsplanung und -steuerung. In: Corsten, H. et al. (Hrsg.): Einführung in das Produktionscontrolling. München: Vahlen 1999, S. 227-252. ISBN: 3800623226.

LORENZER 2011

Lorenzer, T.: Wandelbarkeit in der Serienfertigung durch rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen. Dissertation ETH Zürich. 2011.

LOTTER 2012

Lotter, E.: Hybride Montagesysteme. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl. Berlin: Springer 2012, S. 167-194. ISBN: 3642290604.

MEHRABI ET AL. 2002

Mehrabi, M. G.; Ulsoy, A. G.; Koren, Y.; Heytler, P.: Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems. Journal of Intelligent Manufacturing 13 (2002), S. 135-146.

MÖLLER 2008

Möller, N.: Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2008. (Forschungsberichte *iwb*, Nr. 212).

MÖRTL 2008

Mörzl, M.: Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2008. (Forschungsberichte *iwb*, Nr. 219).

MORYSON 2004

Moryson, R.: Die systematische, rechnerunterstützte Prozessauswahl und -kettenerstellung in der Grobplanungsphase der Produktionsplanung. Düsseldorf: VDI-Verl. 2004. (Fortschritt-Berichte VDI: Band 388, Reihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren).

MÜLLER-MERBACH 1992

Müller-Merbach, H.: Operations-Research. Methoden und Modelle der Optimalplanung. 3. Aufl. München: Vahlen 1992.

NEHZATI ET AL. 2012

Nehzati, T.; Ismail, N.; Aziz, A.; Hosseini, S. A.: Research Outline on Reconfigurable Manufacturing System Production Scheduling Employing Fuzzy Logic. International Journal of Information and Electronics Engineering 2 (2012) 5, S. 813-816.

NEUMANN & MORLOCK 2002

Neumann, K.; Morlock, M.: Operations-Research. 2. Aufl. München: Carl Hanser 2002. ISBN: 3446221409.

NOURELFATH ET AL. 2003

Nourelfath, M.; Ait-kadi, D.; Isaac Soro, W.: Availability modeling and optimization of reconfigurable manufacturing systems. Journal of Quality in Maintenance Engineering 9 (2003) 3, S. 284-302.

NYHUIS 2008

Nyhuis, P. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2008. ISBN: 9783939026969.

NYHUIS & WIENDAHL 2003

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. 2. Aufl. Berlin: Springer 2003. ISBN: 9783662084182.

NYHUIS ET AL. 2009

Nyhuis, P.; Fronia, P.; Pachow-Frauenhofer, J.; Wulf, S.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. wt Werkstattstechnik online 99 (2009) 4, S. 205-210.

OSTGATHE 2012

Ostgathe, M.: System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2012. (Forschungsberichte *iwb*, Nr. 265).

PACHOW-FRAUENHOFER 2012

Pachow-Frauenhofer, J.: Planung veränderungsfähiger Montagesysteme. Diss. Universität Hannover. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2012. (Berichte aus dem IFA, Band 01/2012).

Literaturverzeichnis

PANTFÖRDER ET AL. 2014

Pantförder, D.; Mayer, F.; Diedrich, C.; Göhner, P.; Weyrich, M.; Vogel-Heuser, B.: Agentenbasierte dynamische Rekonfiguration von vernetzten intelligenten Produktionsanlagen - Evolution statt Revolution. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer 2014, S. 145-158. ISBN: 9783658046811.

PAPE 2011

Pape, U.: Grundlagen der Finanzierung und Investition. Mit Fallbeispielen und Übungen. München: Oldenbourg 2011. ISBN: 9783486598421.

PILLER 1997

Piller, F. T.: Individualität von der Stange: Mass Customization. Harvard Business Manager 3 (1997) 19, S. 15-26.

PILLER & STOTKO 2003

Piller, F. T.; Stotko, C. M.: Mass Customization und Kundenintegration: Neue Wege zum innovativen Produkt. Düsseldorf: Symposion-Verlag 2003.

PLÜMER 2003

Plümer, T.: Logistik und Produktion. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag 2003. ISBN: 3486274708.

POCHET & WOLSEY 2006

Pochet, Y.; Wolsey, L. A.: Production planning by mixed integer programming. New York, Berlin: Springer 2006. ISBN: 9780387334776.

PRIESE 2007

Priese, J.: Verfahren zur durchgehenden dezentralen Planung in Werkstattstrukturen. Diss. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter 2007. (ISW-Forschung und Praxis, Nr. 169).

PRIESE & WIMMER 2008

Priese, L.; Wimmer, H.: Petri-Netze. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

PRINZ ET AL. 2012

Prinz, A.; Mandel, J.; Bauernhansl, T.: Wandlungsrelevante Faktoren in produzierenden Unternehmen. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 4, S. 156-161.

PRITSCHOW ET AL. 2009

Pritschow, G.; Wurst, K.-H.; Kircher, C.; Seyfarth, M.: Control of Reconfigurable Machine Tools. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Changeable and reconfigurable manufacturing systems. London: Springer 2009, S. 71-100. ISBN: 9781848820661.

RASCH 2000

Rasch, A. A.: Erfolgspotential Instandhaltung. Theoretische Untersuchung und Entwurf eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements. Berlin: Erich Schmidt 2000. (Duisburger betriebswirtschaftliche Schriften, Nr. 21).

REINHART 2000

Reinhart, G.: Im Denken und Handeln wandeln. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): ... nur der Wandel bleibt. Wege jenseits der Flexibilität. München: Utz 2000, S. 17-40. ISBN: 9783896759238.

REINHART & ZÄH 2003

Reinhart, G.; Zäh, M.: Marktchance Individualisierung. Berlin: Springer 2003. ISBN: 9783540005940.

SCHUTZRECHT DE 10 2006 032 121 A1

SCHUTZRECHT DE 10 2006 032 121 A1 (10.01.2008). teamtechnik Maschinen und Anlagen GmbH Pr.: 04.07.2006 Reinisch, H.; Weiler, T.: Bearbeitungsvorrichtung.

REISIG 2010

Reisig, W.: Petrinetze. Modellierungstechnik, Analysemethoden, Fallstudien. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010. ISBN: 9783834812902.

REN ET AL. 2007

Ren, S. C.; Xu, D.; Wang, F.; Tan, M.: Timed event graph-based cyclic reconfigurable flow shop modelling and optimization. International Journal of Production Research 45 (2007) 1, S. 143-156.

SAAD ET AL. 2002

Saad, S. M.; Baykasoglu, A.; Gindy, Nabil N. Z.: An integrated framework for reconfiguration of cellular manufacturing systems using virtual cells. Production Planning & Control 13 (2002) 4, S. 381-393.

SAXENA & JAIN 2012

Saxena, L. K.; Jain, P. K.: A model and optimisation approach for reconfigurable manufacturing system configuration design. International Journal of Production Research 50 (2012) 12, S. 3359-3381.

SCHOLZ-REITER ET AL. 2008

Scholz-Reiter, B.; de Beer, C.; Freitag, M.; Hamann, T.; Rekersbrink, H.; Tervo, J. T.: Dynamik logistischer Systeme. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer 2008, S. 109-138. ISBN: 9783540756415.

SCHUH & WESTKÄMPER 2006

Schuh, G.; Westkämper, E.: Liefertreue im Maschinen- und Anlagenbau. Stand, Potenziale, Trends. Stuttgart: 2006. ISBN: 392669002X.

SCHUH & STICH 2012

Schuh, G.; Stich, V.: Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS. 4. Aufl. Berlin: Springer 2012. ISBN: 9783642254222.

SCHUH ET AL. 2014

Schuh, G.; Schmidt, C.; Hering, N.: Produktionsbedarfsplanung. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsmanagement. Handbuch Produktion und Management 5. 2. Aufl. Berlin: Springer 2014, S. 151-196. ISBN: 9783642542879.

SCHULZ ET AL. 1995

Schulz, J.; Weigelt, M.; Mertens, P.: Verfahren der Rechnergestützten Produktionsfeinplanung. Ein Überblick. Wirtschaftsinformatik 37 (1995) 6, S. 594-608.

SETHI & SETHI 1990

Sethi, A.; Sethi, S.: Flexibility in manufacturing: A survey. International Journal of Flexible Manufacturing Systems 2 (1990) 4, S. 289-328.

SHABAKA & ELMARAGHY 2007

Shabaka, A. I.; ElMaraghy, H. A.: Generation of machine configurations based on product features. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 20 (2007) 4, S. 355-369.

SHABAKA & ELMARAGHY 2008

Shabaka, A. I.; ElMaraghy, H. A.: A model for generating optimal process plans in RMS. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 21 (2008) 2, S. 180-194.

SON ET AL. 2001

Son, S.-Y.; Olsen, T. L.; Yip-Hoi, D.: An approach to scalability and line balancing for reconfigurable manufacturing systems. Integrated Manufacturing Systems 12 (2001) 7, S. 500-511.

SPATH & SCHOLTZ 2007

Spath, D.; Scholtz, O.: Wandlungsfähigkeit für eine wirtschaftliche Montage in Deutschland. Aktuelle Erkenntnisse und anstehende Forschungsfragen. Industrie Management 23 (2007) 2, S. 61-64.

SPATH ET AL. 2008

Spath, D.; Rally, P.; Scholtz, O.: Geschäftsstrategien und wandlungsfähige Montagen. wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 9, S. 675-680.

SPICER 2002

Spicer, P.: A design methodology for scalable machining systems. Diss. University of Michigan, USA. 2002.

SPICER ET AL. 2002

Spicer, P.; Koren, Y.; Shpitalni, M.; Yip-Hoi, D.: Design Principles for Machining System Configurations. CIRP Annals - Manufacturing Technology 51 (2002) 1, S. 275-280.

STATISTISCHES BUNDESAMT 2015A

Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch Deutschland 2015. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt 2015.

STATISTISCHES BUNDESAMT 2015B

Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Arbeitsmarkt. Erwerbstätige im Inland nach Wirtschaftssektoren.

<<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/LangeReihen/Arbeitsmarkt/Irerw013.html>> - 22.12.2015.

STEINWASSER 1997

Steinwasser, P.: Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozessplanung. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Bamberg: Meisenbach 1997. (Fertigungstechnik - Erlangen, Nr. 63).

TANG 2005

Tang, L.: Design and reconfiguration of RMS for part family. Diss. University of Michigan, USA. 2005.

TOLIO & VALENTE 2006

Tolio, T.; Valente, A.: An Approach to Design the Flexibility Degree in Flexible Manufacturing Systems. In: University of Limerick (Hrsg.): 16th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM). Limerick, 26.-28. Juni 2006. Limerick: University of Limerick 2006.

TOONEN ET AL. 2014

Toonen, C.; Lappe, D.; Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.: Kapazitätsanpassungen durch Werkzeugmaschinen. Einsatz rekonfigurierbarer Werkzeugmaschinen für die Kapazitätssteuerung in der Fertigung. wt Werkstattstechnik online 104 (2014) 4, S. 244-249.

TRANSCHEL ET AL. 2011

Transchel, S.; Minner, S.; Kallrath, J.; Löhndorf, N.; Eberhard, U.: A hybrid general lot-sizing and scheduling formulation for a production process with a two-stage product structure. International Journal of Production Research 49 (2011) 9, S. 2463-2480.

UNGER 1998

Unger, U. J.: Beitrag zur Produktionsplanung und -steuerung komplexer Produkte in wandlungsfähigen Unternehmensstrukturen. Diss. Technische Universität Braunschweig. 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier 1998.

VDI 1992

VDI: Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung. Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. 1992. ISBN: 3184010066.

VDI-RICHTLINIE 2815 Blatt 1

VDI-Richtlinie 2815 Blatt 1: Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung - Einführung, Grundlagen. Düsseldorf: Beuth 1978.

VDI-RICHTLINIE 2860

VDI-Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Berlin: Beuth 1990.

VDI-RICHTLINIE 5600 Blatt 1

VDI-Richtlinie 5600 Blatt 1: Fertigungsmanagementsysteme. Manufacturing Execution Systems (MES). Berlin: Beuth 2007.

VDMA-EINHEITSBLATT 66412-1

VDMA-Einheitsblatt 66412-1: Manufacturing Execution Systems (MES) Kennzahlen. Berlin: Beuth 2009.

VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION 1978

Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (REFA): Methodenlehre des Arbeitsstudiums. München: Carl Hanser 1978. ISBN: 3446127046.

VOEGELE & SOMMER 2011

Voegele, A. A.; Sommer, L.: Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure. Kostenmanagement im Engineering. München: Carl Hanser 2011. ISBN: 9783446426177.

WANG & KOREN 2012

Wang, W.; Koren, Y.: Scalability planning for reconfigurable manufacturing systems. Journal of Manufacturing Systems 31 (2012) 2, S. 83-91.

WESTKÄMPER ET AL. 2000

Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. *wt Werkstattstechnik online* 90 (2000) 1/2, S. 22-26.

WIENDAHL 2009

Wiendahl, H.-H.: Adaptive Production Planning and Control – Elements and Enablers of Changeability. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*. London: Springer 2009, S. 197-212. ISBN: 9781848820661.

WIENDAHL ET AL. 2005

Wiendahl, H.-H.; Wiendahl, H.-P.; von Cieminski, G.: Stolpersteine der PPS. Symptome - Ursachen - Lösungsansätze. *wt Werkstattstechnik online* 95 (2005) 9, S. 717-725.

WIENDAHL 1997

Wiendahl, H.-P.: *Fertigungsregelung. Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells : 42 Tabellen*. München: Carl Hanser 1997. ISBN: 3446190848.

WIENDAHL 2002

Wiendahl, H.-P.: *Wandlungsfähigkeit. Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik*. *wt Werkstattstechnik online* 92 (2002) 4, S. 122-127.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 7. Aufl. München: Carl Hanser 2010. ISBN: 9783446418783.

WIENDAHL ET AL. 2002

Wiendahl, H.-P.; Hernández, R.; Grienitz, V.: Planung wandlungsfähiger Fabriken. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 97 (2002) 1/2, S. 12-17.

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 - Manufacturing Technology* 56 (2007) 2, S. 783-809.

WURST ET AL. 2006

Wurst, K.-H.; Heisel, U.; Kircher, C.: (Re)konfigurierbare Werkzeugmaschinen – notwendige Grundlage für eine flexible Produktion. *wt Werkstattstechnik online* 96 (2006) 5, S. 257-265.

XIAOBO ET AL. 2000A

Xiaobo, Z.; Jiancai, W.; Zhenbi, L.: A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system Part 1: A framework. *International Journal of Production Research* 38 (2000) 10, S. 2273-2285.

XIAOBO ET AL. 2000B

Xiaobo, Z.; Wang, J.; Luo, Z.: A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system Part 2: Optimal configurations. *International Journal of Production Research* 38 (2000) 12, S. 2829-2842.

XIAOBO ET AL. 2001

Xiaobo, Z.; Wang, J.; Luo, Z.: A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system Part 3: Optimal selection policy. *International Journal of Production Research* 39 (2001) 4, S. 747-758.

YOUSSEF & ELMARAGHY 2006A

Youssef, A. M.; ElMaraghy, H. A.: Assessment of manufacturing systems reconfiguration smoothness. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 30 (2006) 1-2, S. 174-193.

YOUSSEF & ELMARAGHY 2006B

Youssef, A. M.; ElMaraghy, H. A.: Modelling and optimization of multiple-aspect RMS configurations. *International Journal of Production Research* 44 (2006) 22, S. 4929-4958.

YOUSSEF & ELMARAGHY 2007

Youssef, A. M.; ElMaraghy, H. A.: Optimal configuration selection for Reconfigurable Manufacturing Systems. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 19 (2007) 2, S. 67-106.

YOUSSEF & ELMARAGHY 2008

Youssef, A. M.; ElMaraghy, H. A.: Performance analysis of manufacturing systems composed of modular machines using the universal generating function. *Journal of Manufacturing Systems* 27 (2008) 2, S. 55-69.

YU ET AL. 2013

Yu, J.-M.; Doh, H.-H.; Kim, J.-S.; Kwon, Y.-J.; Lee, D.-H.; Nam, S.-H.: Input sequencing and scheduling for a reconfigurable manufacturing system with a limited number of fixtures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67 (2013) 1-4, S. 157-169.

ZÄH ET AL. 2005A

Zäh, M. F.; Möller, N.; Vogl, W.: Symbiosis of Changeable and Virtual Production-The Emperor's New Clothes or Key Factor for Future Success? In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV). München, 22.-23. September 2005. München: Utz 2005, S. 3-10. ISBN: 9783831605408.

ZÄH ET AL. 2005B

Zäh, M. F.; Möller, N.; Sudhoff, W.: A Framework for the valuation of Changeable Manufacturing Systems. CIRP 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing Systems. Ann Arbor, 10.-12. Mai 2005. Ann Arbor: 2005.

ZÄH ET AL. 2006

Zäh, M. F.; Franzkowiak, M.; Rimpau, C.; Hoffmann, H.; Träger, M.: Innovative Strategien für die Produktion der Zukunft. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Tagungsband Münchener Kolloquium 2006. Garching, 09.-10. März 2006. München: Utz 2006, S. 109-133.

ZÄPFEL & BRAUNE 2005

Zäpfel, G.; Braune, R.: Moderne Heuristiken der Produktionsplanung. Am Beispiel der Maschinenbelegung. München: Vahlen 2005. ISBN: 3800632381.

ZHANG & RODRIGUES 2009

Zhang, L.; Rodrigues, B.: Modelling reconfigurable manufacturing systems with coloured timed Petri nets. International Journal of Production Research 47 (2009) 16, S. 4569-4591.

11 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) sowie an der Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) in den Jahren von 2012 bis 2016 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten. In diesen wurden unter anderem Fragestellungen zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme untersucht. Entstandene Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit. Im Folgenden sind die Studienarbeiten in alphabetischer Reihenfolge des Nachnamens der Autoren aufgeführt.

Studierende/r	Studienarbeit
Lipp, Leon	Konfigurationsmanagement für rekonfigurierbare Produktionssysteme, eingereicht im Dezember 2015. Teile der Studienarbeit sind in die Abschnitte 6.2.4, 6.2.5, 6.3.2, 6.3.3, 7.3.3 und 7.3.4 eingegangen.
Merkel, Lukas	Entwicklung konfigurationsabhängiger Planungsdaten für rekonfigurierbare Produktionssysteme, eingereicht im Dezember 2014. Teile der Studienarbeit sind in die Abschnitte 6.2.3 und 6.2.4 eingegangen.
Zellner, Kilian	Entwicklung einer Methode zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme, eingereicht im November 2014. Teile der Studienarbeit sind in die Abschnitte 7.3.4, 7.3.5 und 7.4.5 eingegangen.
