

System zur kurzfristigen Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

Johannes be Isa

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

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Boris Lohmann

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

Die Dissertation wurde am 02.12.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 21.03.2023 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	ii
Abkürzungsverzeichnis	vii
Verzeichnis der Formelzeichen	ix
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung.....	3
1.3 Forschungsansatz und Aufbau der Arbeit.....	6
2 Grundlagen	13
2.1 Übersicht	13
2.2 Wertschöpfung in Produktionsnetzwerken	13
2.2.1 Produktionssystem und -prozess	13
2.2.2 Organisation von Produktionsnetzwerken	16
2.3 Wandlungsfähigkeit der Produktion	19
2.3.1 Wandlungstreiber	21
2.3.2 Wandlungsbefähiger.....	24
2.3.3 Typen der Wandlungsfähigkeit	25
2.4 Management von Produktionsnetzwerken.....	30
2.4.1 Konfiguration und Koordination von Produktionsnetzwerken.....	31
2.4.2 Funktionale Strukturierung von Planungsaufgaben	32
2.4.3 Optimierungsalgorithmen zur Entscheidungsunterstützung	33
2.5 Informationssysteme in der Produktion.....	36

2.6	Fazit.....	37
3	Stand der Technik und Forschung	39
3.1	Übersicht	39
3.2	Analyse und Einordnung relevanter Ansätze.....	39
3.2.1	Allgemeine Ansätze.....	39
3.2.2	Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken.....	44
3.2.3	Ansätze zur Produktionsplanung von Produktionsnetzwerken.....	47
3.2.4	Ansätze für multikriterielle Optimierungsprobleme	50
3.3	Forschungsdefizit und Handlungsbedarf	52
4	Konzeption des Systems	55
4.1	Übersicht	55
4.2	Anforderungsanalyse	56
4.2.1	Allgemeine Anforderungen.....	56
4.2.2	Spezielle Anforderungen.....	58
4.3	Betrachtungsumfang	59
4.4	Lösungsansatz	61
5	Modellierung der Elemente zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken.....	65
5.1	Übersicht	65
5.2	Modellierung der Informationsstruktur.....	65
5.2.1	Objektorientierter Modellierungsansatz.....	66
5.2.2	Modelle für Produktspezifikationen und Auftragsinformationen	69
5.2.3	Semantische Beschreibung des Netzwerkmodells	71
5.2.4	Modell für standortübergreifende Logistik	72

5.3	Elemente zur Bestimmung von Netzwerkkonfigurationen.....	74
5.3.1	Netzwerkbildung	74
5.3.2	Auswahl und Struktur des Optimierungsalgorithmus	76
5.3.3	Virtuelle Kapazitätsgrenze	81
5.3.4	Dynamische Preisbildungsverfahren.....	84
5.4	Fazit.....	87
6	Methode zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken	89
6.1	Übersicht.....	89
6.2	Globale Produktionsprogrammplanung	90
6.2.1	Auftragskonsolidierung.....	90
6.2.2	Ableitung der Prozessliste	92
6.2.3	Anforderungs-Fähigkeits-Abgleich.....	94
6.3	Netzwerkbedarfsplanung	95
6.3.1	Planung der Kapazitäten im Netzwerk.....	96
6.3.2	Mathematisches Modell zur Skalierung von Produktionskapazitäten	98
6.4	Netzwerkbedarfsallokation	107
6.4.1	Optimierungsalgorithmus zur Generierung von Netzwerkkonfigurationen.....	108
6.4.2	Erweiterungen des Optimierungsalgorithmus.....	114
6.4.3	Bewertung und Auswahl der Netzwerkkonfiguration	115
6.5	Fazit.....	117
7	Industrielle Anwendung und prototypische Realisierung	119
7.1	Übersicht.....	119

7.2	Pilotanwendung des entwickelten Systems	120
7.2.1	Anwendungsszenario.....	120
7.2.2	Produktionsnetzwerk und Herstellungsprozesse	120
7.2.3	Planung kundenindividueller Aufträge	122
7.2.4	Logistikbeziehungen und verwendete Transportmittel	123
7.3	Simulationstechnische Umsetzung und Validierung	124
7.3.1	Prototypische Implementierung	124
7.3.2	Planungsmodelle.....	125
7.3.3	Testplan und Produktionsszenarien.....	126
7.4	Analyse und Diskussion der Ergebnisse	129
7.5	Fazit.....	134
8	Bewertung des Systems	135
8.1	Anforderungsbezogene Bewertung.....	135
8.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	136
8.2.1	Aufwand	136
8.2.2	Nutzen.....	138
8.3	Verallgemeinerte Bewertung	139
9	Zusammenfassung und Ausblick	145
9.1	Zusammenfassung.....	145
9.2	Ausblick	147

Inhaltsverzeichnis

10	Literaturverzeichnis	149
11	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	172
12	Abbildungsverzeichnis	175
13	Tabellenverzeichnis	177
14	Anhang.....	178

Abkürzungsverzeichnis

APS	Advanced Planning and Scheduling
BOM	Bill of Material
BOP	Bill of Processes
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer-aided design
CIM	Computer-integrated manufacturing
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DLZ	Durchlaufzeit
EBIT	Earnings Before Interest and Tax
engl.	englisch
ERP	Enterprise Ressource Planning
et al.	et alii (und andere)
etc.	et cetera (und so weiter)
GA	Genetic Algorithm
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
InnoCyFer	Integrierte Gestaltung und Herstellung kundeninnovativer Produkte in cyber-physischen Fertigungssystemen
IoT	Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnik
MES	Manufacturing Execution System

Abkürzungsverzeichnis

MTO	Make-to-Order
MTS	Make-to-Stock
NP (Komplexitätsklasse)	Nichtdeterministisch polynomiell
NSGA	Nondominated Sorting Genetic Algorithm
OT	Operational Technology
PJ	Personenjahr
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
PSZ	Produktionsszenario
RMS	Reconfigurable Manufacturing Systems
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCM	Supply Chain Management
u. a.	unter anderem
UML	Unified Modelling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel

Verzeichnis der Formelzeichen

ASM_t^{Chro}	<i>Averaged-Surge-Multiplier für Chromosom in Periode t</i>
C	<i>Herstellkosten</i>
CAP_F	<i>Freies Kapazitätsangebot</i>
$CAP_{v,lim}$	<i>Virtuelle Kapazitätsgrenze</i>
CD	<i>Kapazitätsbedarf</i>
CS	<i>Kapazitätsangebot</i>
C^L	<i>Logistikkosten</i>
C^P	<i>Produktionskosten</i>
C^R	<i>Rekonfigurationskosten</i>
C^{Total}	<i>Gesamtkosten</i>
$c_j^{P,N}$	<i>Produktionskostenfaktor der Normalkapazität von $TV_{Rr,j}$</i>
$c_j^{P,Z}$	<i>Produktionskostenfaktor der Zusatzkapazität von $TV_{Rr,j}$</i>
c_r^{Rk}	<i>Kostenfaktor zur Erstellung der RK r</i>
E	<i>Erlös</i>
ON	<i>Anzahl Bestellungen</i>
$OpsR$	<i>Operations Ratio</i>
$OpsR_{a,i,j,l}$	<i>Anteil des mit $TV_{Rr,j}$ hergestellten $TV_{Aa,i}$ von Teillos l des WP a</i>
$P(A)_i$	<i>Bestellwahrscheinlichkeit Planungsperiode i</i>

Verzeichnis der Formelzeichen

$\overline{P(A)}$	<i>Durchschnittliche Bestellwahrscheinlichkeit</i>
PO	<i>Produktionsauftrag</i>
p_k^D	<i>Fälligkeitstermin des PO k</i>
p_k^E	<i>Fertigstellungsperiode des PO k</i>
$p_{k,a-1,l}^E$	<i>Fertigstellungsperiode des Teilloses l von WP a-1 aus PO k</i>
$p_{k,a,l}^S$	<i>Startperiode des Teilloses l von WP a aus PO k</i>
q	<i>Anzahl der Produkte</i>
q_k	<i>Auftragsmenge des PO k</i>
RK	<i>Ressourcenkonfiguration</i>
RN	<i>Anzahl Anfragen</i>
$SM_{def,t,i}$	<i>Definierter Surge Multiplier in Periode t</i>
t_j^P	<i>Produktionszeit zur Durchführung des WP_a mit TV_{Rr,j}</i>
TV_{Aa}	<i>Technologievektor des Arbeitsvorgangs</i>
TV_{Rr}	<i>Technologievektor der Ressourcenkonfiguration</i>
WP	<i>Arbeitsvorgang</i>

Indexmengen und Indizes

$a \in A$	<i>Menge der WP eines PO</i>
$i \in I$	<i>Menge der TV_{Aa} eines PO</i>
$j \in J$	<i>Menge der TV_{Rr}</i>
$k \in K$	<i>Menge der PO</i>
$l \in L$	<i>Menge der Teillose eines PO</i>
$m \in M$	<i>Menge der Module</i>
$p \in P$	<i>Menge der Arbeitsplätze</i>
$r \in R$	<i>Menge der RK</i>
$t \in T$	<i>Menge der Planungsperioden</i>

Binäre Entscheidungsvariablen

$V_{m,j,t}$	<i>1, wenn Modul m in Periode t für $TV_{Rr,j}$ rekonfiguriert wird, sonst 0</i>
$W_{m,j,t}$	<i>1, wenn Modul m in Periode t ein $TV_{Rr,j}$ zugeordnet ist, sonst 0</i>
$X_{i,t}$	<i>1, wenn $TV_{Aa,i}$ in Periode t Zusatzkapazität belegt, sonst 0</i>
$Y_{p,t}$	<i>1, wenn in Periode $t-1$ an Arbeitsplatz p eine andere RK verwendet wird, sonst 0</i>
$Z_{i,j,l}$	<i>1, wenn $TV_{Aa,i}$ in Periode t einem $TV_{Rr,j}$ zugeordnet ist, sonst 0</i>

Hinweis: Aus Gründen der Lesbarkeit wird in dieser Arbeit bei Personenbezeichnungen die männliche Form gewählt, es ist jedoch immer die weibliche Form mitgemeint.

1 Einleitung

„Nichts ist so beständig wie der Wandel.“ Heraklit von Ephesus

Diese Erkenntnis des Wandels als einen beständigen Prozess, die dem griechischen Philosophen Heraklit von Ephesus um 500 v.Chr. zugeschrieben wird, ist heute immer noch ein bedeutendes Forschungsthema unterschiedlicher Disziplinen (HELD 1980). Dies resultiert u. a. aus dem Interesse am weltweiten Handel von Produkten und Dienstleistungen. Insbesondere der gegenwärtige Wandel von Märkten und Systemen stellt die Wirtschaft vor immer neuen und großen Herausforderungen (EASLEY & KLEINBERG 2010). Die Entwicklung von Sonderwirtschaftszonen, internationalen Handelsabkommen zwischen Industriestaaten sowie feste Wirtschaftsräume und Währungsunionen fördern dabei durch geringe bzw. nicht vorhandene Zölle und Abgaben den globalen Handel (UNCTAD 2020). Doch auch Handelsabkommen und Wirtschaftsräume selbst befinden sich im ständigen Wandel und sind nicht zwingend dauerhaft, wie das letzte Jahrzehnt belegt hat (LANGE 2018). Die Geschäftsberichte weltweit agierender Unternehmen zeigen, dass auch in schwierigen Marktsituationen hohe Investitionen in globale Produktionsnetzwerke getätigt werden, um diese flexibel zu gestalten und effizient zu betreiben (BMW 2020, DAIMLER 2020, THYSSENKRUPP 2020). Diese Arbeit soll einen Beitrag zur Bestimmung der Netzwerkkonfiguration und zum effizienten Betrieb dynamischer Produktionsnetzwerke innerhalb des kurzfristigen Planungshorizonts leisten.

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Das Internet, welches vor über drei Jahrzehnten entstand, basiert auf dem Ansatz des Internetwork (ABBATE 1999). Dieses Konzept fußt dabei auf einem System von verbundenen Netzwerken. Jene Art der Vernetzung brachte neue Informations- und Kommunikationsmedien hervor, die dem Welthandel einen bis dato unbekanntem Auftrieb bescherten (THIEMANN 2013). Die Analysen des World Investment Report der UNCTAD der letzten 30 Jahre verdeutlichen einen starken Trend zur Produktion in globalen Netzwerken. Welche Relevanz diese Produktionsnetzwerke haben, lässt sich durch einen Blick auf die weltweiten Tochtergesellschaften von international agierenden Unternehmen erkennen. Diese Unternehmen verzeichnen seit 1990 eine Versechsfachung der Wertschöpfung auf 8.000 Mrd. \$ für das Jahr 2019 (UNCTAD 2020). Diese multinationalen Unternehmen gestalten

1 Einleitung

und koordinieren mit ihren Tochtergesellschaften und Partnern komplexe Wertschöpfungsnetzwerke, dabei macht dieser grenzüberschreitende Handel von Vorleistungsgütern und Produkten nach UNCTAD Analysen über 80 % des Welthandels aus. Die zwei Jahrzehnte zwischen 1990 und 2010 weisen ein starkes Wachstum von 6 % bzw. 9 % auf. Im Gegensatz dazu zeigt das letzte Jahrzehnt mit durchschnittlich 2,7 % ein kontinuierliches, jedoch moderates Wachstum auf (UNCTAD 2020). Insbesondere in Krisensituationen werden globale Produktionsnetzwerke und damit einhergehende komplexe Lieferketten hinterfragt (HOFFER 2018, KNITTERSCHEIDT & FRÖNDHOFF 2021). Die Entkopplung weltweiter Wertschöpfungsketten führen nach Analysen von EPPINGER ET AL. zu Wohlfahrtsverlusten (2021). Die Investitionskosten für die Rückverlagerung sowie die laufenden Herstellkosten sind in der Regel zu hoch. Die mit einer Rückverlagerung einhergehende marktseitige Erhöhung der lokalen Reichweite ist im heutigen Zeitalter ein eher nachgelagertes Argument. Zielführender ist die Frage wie globale Produktionsnetzwerke robuster sowie agiler und somit resilienter gestaltet werden können (ACATECH 2021). Das Internet ermöglicht es, Produkte weltweit sehr einfach zu vertreiben. Hierdurch können aus Sicht der Produzenten neue Märkte schnell und verhältnismäßig einfach erschlossen werden (THIEMANN 2013). Hingegen können lokal vorherrschende Stellungen von etablierten Unternehmen nicht immer gehalten werden, da auch neue Wettbewerber diese virtuellen Vertriebsmöglichkeiten nutzen und bisher unbekannte Regionen ohne lokales Personal bedienen können. Außerdem führt das beschriebene Phänomen zu weiteren Nachfrageschwankungen am Markt. Erhöhter Wettbewerb erschwert es Unternehmen, ihre Absätze und somit benötigte Kapazitäten zielgerecht abzuschätzen. Geringe Wachstumsraten in vielen Industriestaaten, bedingt durch eine stagnierende Binnennachfrage, lassen sich teils durch eine hohe Marktsättigung erklären. Solche gesättigten Märkte führen wiederum zu einer vermehrten Nachfrage nach kundenindividuellen Produkten (REINHART 2017). Die Herstellung kundenindividueller Produkte widerstrebt jedoch dem bisherigen klassischen industriellen Ansatz der Massenproduktion (PILLER 2006). Weiterhin fordert der Markt immer kürzere Lieferzeiten und eine hohe Termintreue (WIENDAHL 2010). Diese neuen Rahmenbedingungen führen zu höherer Komplexität und zu steigenden Anforderungen an die zukünftige Produktion (WIENDAHL 2010). Um diesen gestiegenen Anforderungen zu begegnen und die Komplexität zu beherrschen, bedarf es ebenfalls des Einsatzes neuer digitaler Technologien (VEREECKE & DE MEYER 2009). Durch das global verfügbare Internet sowie neue Informations- und Kommunikationstechnologien, wie beispielsweise innovative Cloud Computing Ansätze, ist eine weitere

Vernetzung der einzelnen Produktionsstandorte zu hochintegrierten Produktionsnetzwerken möglich (REINHART 2017). Nach der gemeinsamen Studie zu Manufacturing Execution Systems 2017/2018 des Fraunhofer IPA und der Trovarit AG werden verstärkt MES mit Multi-Site Funktionalitäten entwickelt und im Produktionsnetzwerkumfeld eingesetzt. Diese Systeme dienen der tieferen Vernetzung der Standorte auf Ebene der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) zur Abbildung standortübergreifender Leistungsdatenvergleiche und kurzfristiger Verlagerungen bei Kapazitätsengpässen (WIENDAHL ET AL. 2018). Auch der durch vier renommierte produktionstechnische Forschungseinrichtungen in Aachen, Augsburg, Hamburg und Hannover gemeinsam erstellte PPS-Report 2017/2018 zeigt, dass über 45 % der 123 befragten Unternehmen in Deutschland einen Wechsel bzw. große Veränderungen der Produktionsplanungssysteme in den nächsten ein bis zwei Jahren planen (NYHUIS ET AL. 2018).

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Globale Produktionsnetzwerke bieten hohes Potenzial, die beschriebene Volatilität der Nachfrage im Weltmarkt auszugleichen (LANZA ET AL. 2018). Die Herausforderungen der Produktionsplanung von Produktionsnetzwerken sind hierbei jedoch vielfältig.

Bestehende Produktionsnetzwerke weisen heutzutage eher starre und veränderungsträge Strukturen auf. Nach WIENDAHL stellt diese hohe Trägheit von Produktionsnetzwerken eine der wesentlichen Herausforderungen global agierender Unternehmen dar (2010). Netzwerke sind häufig historisch gewachsen. Es bestehen zwar Bemühungen, diese heterogenen Netzwerkstrukturen durch Standardisierung zu vereinheitlichen, jedoch werden sie nicht tiefgreifend umgesetzt. Aus jener Trägheit der Produktionsnetzwerke resultiert ebenfalls die mangelnde Reaktionsfähigkeit auf Veränderungen des Marktes. Diese können neben Technologiesprünge auch Veränderungen im Konsumentenverhalten und dadurch resultierende kurzfristige Schwankungen der Kapazitätsnachfrage mit sich bringen. Insbesondere Unternehmen aus historisch stabilen Absatzmärkten mangelt es an der Fähigkeit sich schnell zu wandeln, da vor Jahrzehnten eine hohe Ausprägung dieser Kompetenz nicht erforderlich war. Die fehlende Wandlungsfähigkeit erschwert es diesen Unternehmen die Anpassung an ein agileres Marktumfeld aktiv vorzunehmen.

1 Einleitung

Bisherige Forschungsaktivitäten im Bereich der Produktionsnetzwerke behandeln häufig die Gestaltung und damit strategische Aspekte; beispielsweise die strategische Einführung neuer Technologien in Netzwerken (MOSER 2018, HOCHDÖRFFER 2018, SAGER 2019), die langfristige Migration von Produkten in unterschiedliche Standorte. Die mangelnde Reaktionsfähigkeit von Produktionsnetzwerken auf kurzfristig eintretende Ereignisse, wie beispielsweise die Vervielfachung der Nachfrage innerhalb weniger Tage, wird bei dieser strategischen Betrachtungsweise jedoch nicht abgedeckt. Die Umsetzung dieser Maßnahmen hilft langfristig die Wandlungsfähigkeit zu erhöhen und damit wettbewerbsfähig zu sein, jedoch kann kurz- und mittelfristig aus diesen Ansätzen für den operativen Betrieb des Produktionsnetzwerkes kaum ein Vorteil gezogen werden.

Die fehlende Berücksichtigung und Abbildung der heterogenen Produktionsfähigkeiten im Netzwerk stellt ein weiteres Problem in der Verteilung von Produktionsaufträgen innerhalb eines Produktionsnetzwerkes dar (GRUNDMANN 2008). Produktionsstandorte weisen i. d. R. Maschinen und Anlagen unterschiedlichen Alters, Herstellers und Technologien an den jeweiligen Standorten auf. Die Abbildung dieser technischen Fähigkeiten jedes Standorts auf der Produktionsnetzwerkebene ist jedoch nötig, um automatisierte Planungen und systematische Entscheidungen für die Annahme eines kundenindividuellen Produkts zu treffen (WIEDEMANN & ZÄH 2011). Weiterhin wurde der standardisierte Umgang mit kundenindividuellen Produkten in der industriellen Serien- und Massenproduktion noch nicht hinreichend untersucht. Bei der Kapazitätsplanung solcher Aufträge im Netzwerk bedarf es eines systematischen Vorgehens zum Umgang mit kurzfristigen Stornierungen von individuellen Produkten.

Eine weitere Herausforderung stellen kürzer werdende Produktlebenszyklen dar. Vor Jahrzehnten noch überdauerte der Herstellungszeitraum eines Produkts bzw. einer Produktfamilie den Abschreibungs- bzw. Nutzungszeitraum der benötigten Produktionsanlagen. Dies hat sich in den letzten Jahrzehnten maßgeblich geändert. Kürzere Produktlebenszyklen, nicht nur in der schnelllebigen Elektronikindustrie, führen dazu, dass Herstellungszeiträume von Produkten teilweise wenige Monate betragen, bevor diese von der nächsten Produktgeneration abgelöst werden (REINHART & ZÜHLKE 2017). Die Fähigkeit unterschiedliche Produkte bis zu einem gewissen Grad auf flexiblen Anlagen zu fertigen, und damit einen Produktmix abzubilden, ist gefragt. Dies erfordert jedoch einen modularen Aufbau von Produktionsanlagen und -systemen, um durch Hinzufügen, Entfernen und Austausch von Modulen eine Rekonfigurationsfähigkeit und damit eine schnelle Adaption der Systeme zu erlangen. Die Forschung zur Wandlungsfähigkeit der Produktion

durch Rekonfiguration von Maschinen, Anlagen oder Fertigungslinien ist hierbei vielschichtig (WIENDAHL ET AL. 2007). Die meisten Ansätze befassen sich mit der physischen Rekonfiguration innerhalb eines Produktionsbereiches. Um die oben beschriebenen Herausforderungen jedoch umfassend zu bewältigen, bedarf es der ganzheitlichen Betrachtung des Produktionsnetzwerkes einschließlich der Logistik. Dabei sollte nicht nur die physische Rekonfiguration von Modulen, sondern insbesondere die logische Rekonfiguration des Netzwerkes und der Logistikbeziehungen betrachtet werden. Hierzu benötigt man eine standortübergreifende Produktionsplanung, welche jedoch eine neue Herausforderung darstellt (WIENDAHL ET AL. 2018). Weiterhin bedarf es einer semantischen Beschreibung der Fähigkeiten und Standorte. Auch kurzfristig adaptierbare Lieferbeziehungen der einzelnen Standorte im Netzwerk zueinander müssen möglich sein.

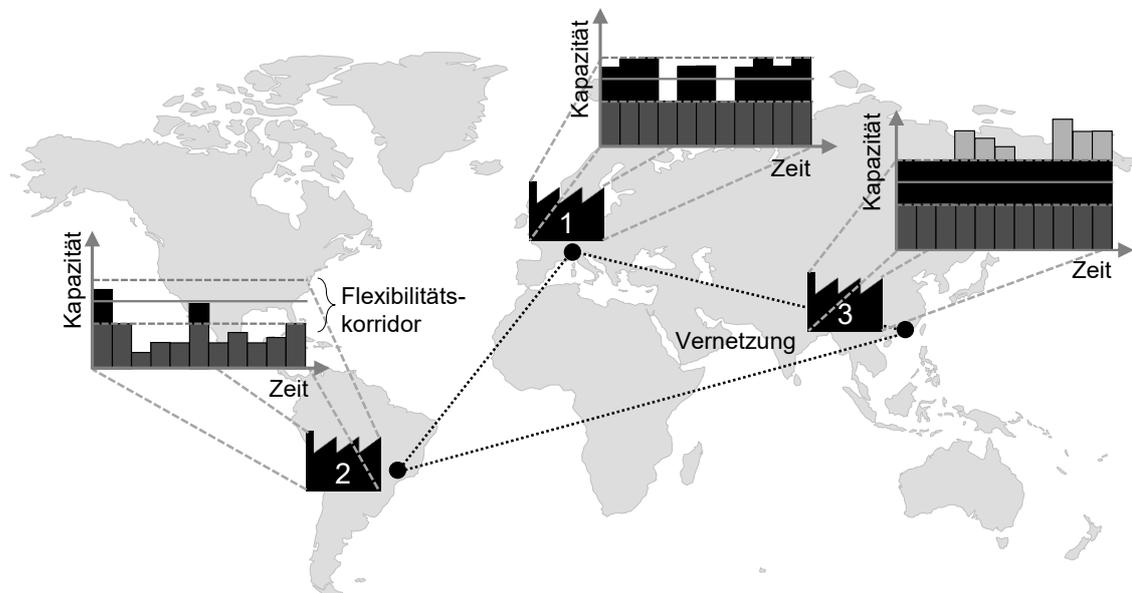


Abbildung 1: Exemplarisches dynamisches Produktionsnetzwerk

Produktionsnetzwerke bieten durch eine flexiblere Aufgabenverteilung Vorteile und somit auch eine zweckmäßigere Kapazitätsauslastung auf Ebene des Netzwerkes, wodurch Synergien des economies of scale und economies of scope genutzt werden können (PFOHL 2004, MEYER 2008). Bislang fehlten jedoch Bemühungen, die Themen Produktionsplanung, Wandlungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken und Cloud Computing in einem gemeinsamen Ansatz zu vereinen.

Das Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es, einen Beitrag zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken zu leisten, um Unternehmen in stark schwankenden Märkten im wirtschaftlichen Betrieb der vorhandenen Produktionskapazi-

1 Einleitung

täten zu unterstützen (Abbildung 1). Hierzu soll ein System zur kurzfristigen Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken entwickelt und erprobt werden. Durch den Einsatz des entwickelten Systems können Produktionsnetzwerke effizienter ausgelastet werden und dadurch geringere Gesamtproduktionskosten erzielt werden. Dabei sollen die Fähigkeiten der einzelnen Standorte des Netzwerks durch semantische Beschreibungen in Datenmodellen dargestellt werden. Dies bildet die Grundlage zur automatisierten Durchführung zukünftiger Auftrags- und Produktionsnetzwerkzuordnungen und folglich schneller sowie transparenter Entscheidungen.

Die folgenden forschungsleitenden Fragen dienen der Erreichung der zuvor erläuterten Zielsetzung:

- 1) Wie erfolgt die kurzfristige Kapazitätsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken?
- 2) Wie lässt sich der technische Anforderungs-Fähigkeits-Abgleich auf Produktionsnetzwerkebene abbilden?
- 3) Wie sind die Datenmodelle zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken zu gestalten?
- 4) Wie lassen sich Anreize für globale kostenminimale Netzwerkkonfigurationen gestalten?

Diese Fragestellungen leiten die vorliegende Arbeit und bilden die Grundlage für das System zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken.

1.3 Forschungsansatz und Aufbau der Arbeit

Zur wissenschaftstheoretischen Einordnung der vorliegenden Arbeit eignet sich insbesondere die verbreitete Wissenschaftssystematik nach ULRICH & HILL (1976). Diese Systematik ermöglicht es, menschliches Denken, das nach bestimmten Regeln erfolgt, Wissenschaftskategorien zuzuordnen. Hierdurch lassen sich fachspezifische Probleme zielgerichtet durch die Anwendung bestimmter Fragemethoden und Untersuchungsansätze lösen. Nach ULRICH & HILL wird zwischen Formal- und Realwissenschaften unterschieden, in der folgenden Abbildung 2 als Haus der Wissenschaft dargestellt.

Die vorliegende Arbeit ist dabei den Realwissenschaften zuzuordnen. Diese unterscheiden sich wiederum in reine Grundlagenwissenschaften und in angewandte

1.3 Forschungsansatz und Aufbau der Arbeit

Handlungswissenschaften. Erstere beschäftigen sich mit der Erklärung von empirischen Wirklichkeitsausschnitten, wobei die Entwicklung von Erklärungsmodellen im Vordergrund steht. Die angewandten Handlungswissenschaften hingegen stellen die Analyse der menschlichen Handlungsalternativen und damit die Entwicklung von Entscheidungsmodellen in das Zentrum der Forschung. (ULRICH & HILL 1976, S. 305)

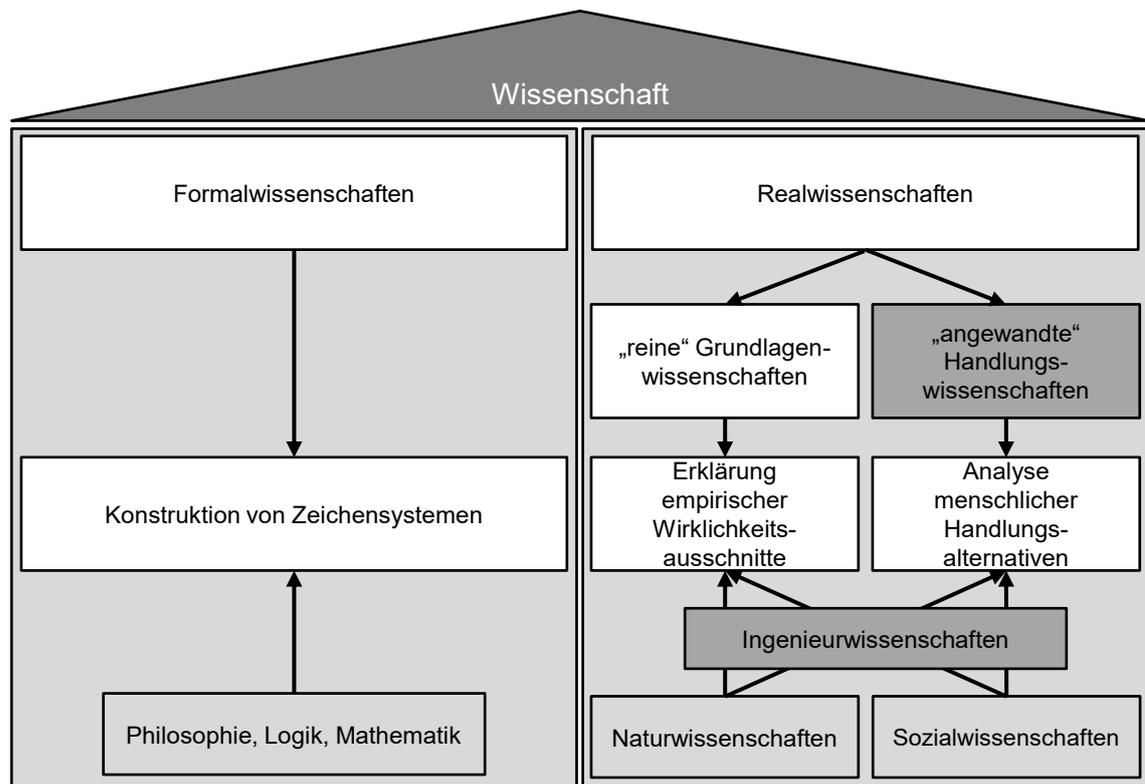


Abbildung 2: Wissenschaftssystematik und Einordnung der Arbeit (in Anlehnung an ULRICH & HILL 1976)

Durch den hohen Anwendungsbezug der oben beschriebenen Zielsetzung dieser Arbeit erfolgt die wissenschaftstheoretische Einordnung zu den angewandten Handlungswissenschaften. Neben der wissenschaftstheoretischen Einordnung unterstützt der Forschungsprozess die Entwicklung eines heuristischen Bezugsrahmens. Dieser dient der Verdeutlichung der Zusammenhänge und der systematischen Erkenntnisgewinnung (BREM 2018, S.30). Der Bezugsrahmen fungiert somit als Methode, um ein Problem strukturiert zu beschreiben. Für den Philosophen KARL POPPER (1969) beginnt die Erkenntnis schon mit der Auseinandersetzung mit Problemen, wie folgendes Zitat verdeutlicht.

1 Einleitung

“Die Erkenntnis beginnt nicht mit Wahrnehmungen oder Beobachtungen oder der Sammlung von Daten oder von Tatsachen, sondern sie beginnt mit Problemen” (POPPER 1969, S. 104).

Die Entwicklung des Bezugsrahmens bedingt die aktive Auseinandersetzung mit Problemen und leistet einen Beitrag zur Erkenntnisgewinnung. Kern des heuristischen Bezugsrahmens der vorliegenden Arbeit ist die Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken, wie Abbildung 3 veranschaulicht. Weiterhin wurden zum Kern des heuristischen Bezugsrahmens Objekte, Eigenschaften und Zustände auf einer abstrakten Ebene in Beziehung gebracht. Durch das Einnehmen unterschiedlicher Perspektiven sollten sich differenzierte Antworten ergeben, die über die initialen Annahmen hinausgehen. Die Schnittstelle zur Eigenschaft der Wandlungsfähigkeit drückt den Bedarf aus, bestehende historisch gewachsene Produktionsnetzwerkstrukturen dynamischer zu gestalten, um auf die Volatilität des Marktes schnell zu reagieren. Daher ist die Wandlungsfähigkeit auch stark an globale Märkte gekoppelt. Eine intelligente Kapazitätsplanung kann eine schnelle Skalierung von standortübergreifenden Ressourcen bewerkstelligen, dazu bedarf es jedoch neben der logistischen auch der informationstechnischen Vernetzung der Standorte.

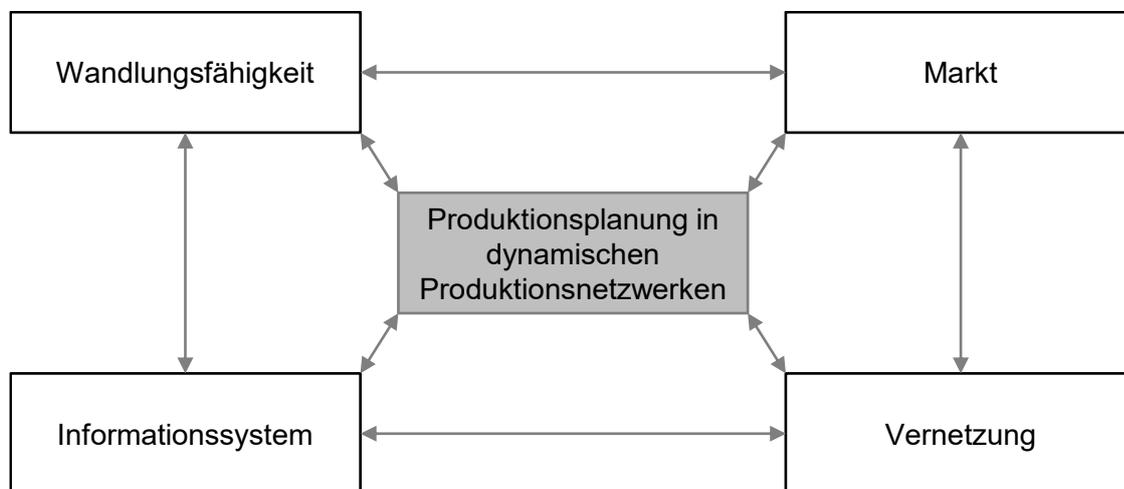


Abbildung 3: Heuristischer Bezugsrahmen der Arbeit

Neue Informations- und Kommunikationstechnologien ermöglichen heute mit einfachen Möglichkeiten und geringen Investitionsmitteln eine Vernetzung der unterschiedlichen Produktionssysteme. Zur Abbildung der Fähigkeiten der einzelnen Produktionssysteme und -standorte werden weiterhin vernetzte Informationssysteme mit standardisierten Datenmodellen benötigt. Der Vernetzungsgrad beeinflusst dabei die kurzfristigen Produktionsplanungsmöglichkeiten wesentlich. Zur

Verdeutlichung der Wechselwirkungen der Elemente des Bezugsrahmens wurden bidirektionale Schnittstellen in Abbildung 3 verwendet.

Die Diskussion, wie Forschungsprozesse zu gestalten sind und wie Erkenntnisgewinn erfolgt, ist Teil der Wissenschaftstheorie und stellt dabei selbst ein Wissenschaftsgebiet dar. Je nach Forschungsgebiet eignen sich unterschiedliche Forschungsprozesse, um zu einem systematischen Erkenntnisgewinn zu gelangen. TOMCZAK (1992) beschreibt den Forschungsprozess als explorativen Forschungszyklus. Ausgehend vom Bezugsrahmen wird das theoretische Vorverständnis strukturiert. Diese unvermeidlich subjektive Darstellung muss hinterfragt werden und durch Fragen an die Realität überprüft werden. Ziel ist dabei zu identifizieren, ob es sich tatsächlich um ein relevantes Problem der Praxis handelt. Aus der Präzisierung der theoretischen Perspektive zeigt sich der Bezugsrahmen samt der Problemstellung. Das sich aus der Analyse des Bezugsrahmens ergebende Potenzial kann durch systematische Datenerhebung und -analyse genutzt werden. Der Perspektivenwechsel und iterative Durchgang des beschriebenen Forschungszyklus ergründet den Bezugsrahmen und fördert das Verständnis und die Beherrschung der dargestellten Problemsituation. (TOMCZAK 1992, S. 84)

Auch der Forschungsprozess angewandter Wissenschaften nach ULRICH & FLURI (1984) startet mit der Erfassung und Strukturierung praxisrelevanter Probleme, anschließend erfolgt in unterschiedlichen Schritten wiederholt ein Perspektivenwechsel mit Theorie- und Praxisbezug. Neben den wissenschaftstheoretischen Konzepten aus dem deutschsprachigen Raum erscheint auch die Design Research Methodology nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009) in den anwendungsorientierten Ingenieurwissenschaften als vielversprechendes Forschungskonzept. Wie aus Abbildung 4 erkenntlich ist, besteht das Konzept aus vier Phasen, die iterativ durchlaufen werden.

Research Clarification (RC) ist die erste Phase und dient dazu, die Problemstellung zu erfassen sowie den aktuellen Stand der Forschung und Technik zu ergründen. Hierzu wurden in dieser Arbeit mehrere Forschungsmethoden der Sekundärforschung angewandt. Aus dieser RC-Phase resultiert eine realistische Zielsetzung der Forschungsarbeit. Dabei wurden vier forschungsleitende Fragen entwickelt, wie in Abschnitt 1.2 erläutert.

In der Phase Descriptive Study I (DS-I) wird auf Basis der Zielsetzung und der Forschungsfragen eine vertiefte Literaturanalyse durchgeführt. Dieses Vorverständnis formt das theoretische Problem, das noch nicht ausreichend erforscht wurde. Zur umfassenden Beschreibung dieser unzureichenden Problemdefinition

1 Einleitung

bedarf es eines tieferen Verständnisses. Um einer subjektiven Sichtweise auf das Problem vorzubeugen und ein tieferes Verständnis zu erlangen, sollte bei der Betrachtung und Beschreibung des Problems stets ein Perspektivenwechsel erfolgen (TOMCZAK 1992). Durch Gespräche mit Experten aus der Industrie und Erfahrungen aus der Umsetzung von Forschungs- und Industrieprojekten konnte im Rahmen dieser Arbeit Erfahrungswissen systematisch gewonnen werden und ein Perspektivenwechsel erfolgen.

In der Phase Prescriptive Study konnte dieses Erfahrungswissen mittels einer kreativen Implementierung unter Anwendung der morphologischen Analyse genutzt und mit theoretischen Aussagen verknüpft werden (KUBICEK 1977).

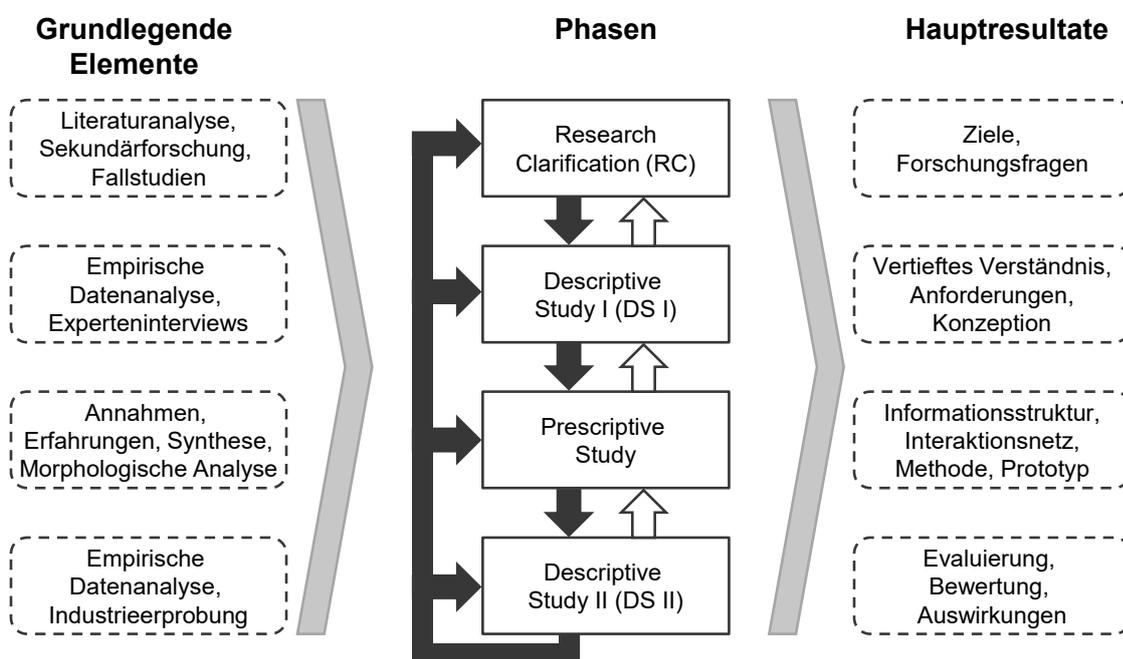


Abbildung 4: Angewandter Forschungsansatz nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009)

In der Descriptive Study II (DS-II) Phase wird das entwickelte System zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken innerhalb einer Pilotanwendung evaluiert. Dabei können Erkenntnisse und Auswirkungen auf die Problemstellung aus der Beobachterrolle reflektiert werden. Ziel dieser Phase ist im ersten Schritt die Bewertung der grundsätzlichen Anwendbarkeit und im zweiten Schritt die Wirtschaftlichkeit der entwickelten Lösung. Das iterative Durchlaufen der einzelnen Phasen stellt dabei eine sukzessive Konkretisierung des Forschungsgegenstandes dar (TOMCZAK 1992). Es führt damit von einer abstrakt theoretischen

Beschreibung des Bezugsrahmens zu einem scharfen System zur Produktionsplanung unter der Berücksichtigung der Herausforderungen von bestehenden historisch gewachsenen Produktionsnetzwerken.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in neun Hauptkapitel. Der Aufbau dieser Kapitel ist in Abbildung 5 ersichtlich. In Kapitel 1 wird die Ausgangssituation, in der sich Industriebetriebe heutzutage bewegen, beschrieben. Ferner wird in diesem Kapitel auch die Motivation des Themenfeldes dargestellt, hierzu gehört auch die Beschreibung der Problemstellungen und Herausforderungen. Das Kapitel schließt mit der Zielsetzung und den Forschungsfragen dieser Arbeit. Innerhalb des Kapitels 2 werden die Grundlagen für das Verständnis dieser Arbeit beschrieben. Hierzu gehören grundlegende Begriffsdefinitionen, die Beschreibung der Organisationsstruktur von Produktionsnetzwerken sowie die dazugehörigen Produktionssysteme und -prozesse. Auch die Wandlungstreiber und -befähiger sowie die Typen der Wandlungsfähigkeit in der Produktion werden hier beschrieben. Weitere essenzielle Grundlagen bilden das Management von Produktionsnetzwerken und die Informationssysteme in der Produktion. Kapitel 3 stellt die getätigten Untersuchungen zum aktuellen Stand der Technik und der Forschung umfassend dar. Hierbei werden u. a. bestehende Ansätze aus der Modellierung veränderbarer Produktionsnetzwerke, Ansätze der Produktionsplanung in der auftragsbezogenen Produktion sowie Ansätze der Termin- und Kapazitätsplanung von Produktionsnetzwerken intensiv diskutiert. Diese werden weiterhin auf eine mögliche Adaptierbarkeit der vorliegenden Fragestellungen analysiert und bewertet. Aus den Erkenntnissen dieser Recherche und Diskussion wird abschließend der Handlungsbedarf abgeleitet. Das System zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken wird in drei Hauptkapiteln entwickelt. In Kapitel 4 erfolgt die Konzeptionierung und Anforderungsanalyse des Systems auf Basis der zuvor dargestellten Handlungsbedarfe. Innerhalb des Kapitels 5 wird die Informationsstruktur sowie die benötigten Modelle zur Systembeschreibung dargestellt. Hierzu gehört die Modellierung von Auftragsinformationen, die strukturierte Beschreibung von Logistikvorgängen sowie die Modellierung des Produktionsnetzwerkes. Weiterer essenzieller Teil des Systems ist die entwickelte Methode zur Produktionsplanung. Die Beschreibung dieser erfolgt in Kapitel 6. Das entwickelte System wird in Kapitel 7 prototypisch innerhalb einer industriellen Pilotanwendung eines international operierenden Unternehmens erprobt. In Kapitel 8 erfolgt die Bewertung des Systems einschließlich einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Die vorliegende Arbeit schließt in Kapitel 9 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

1 Einleitung

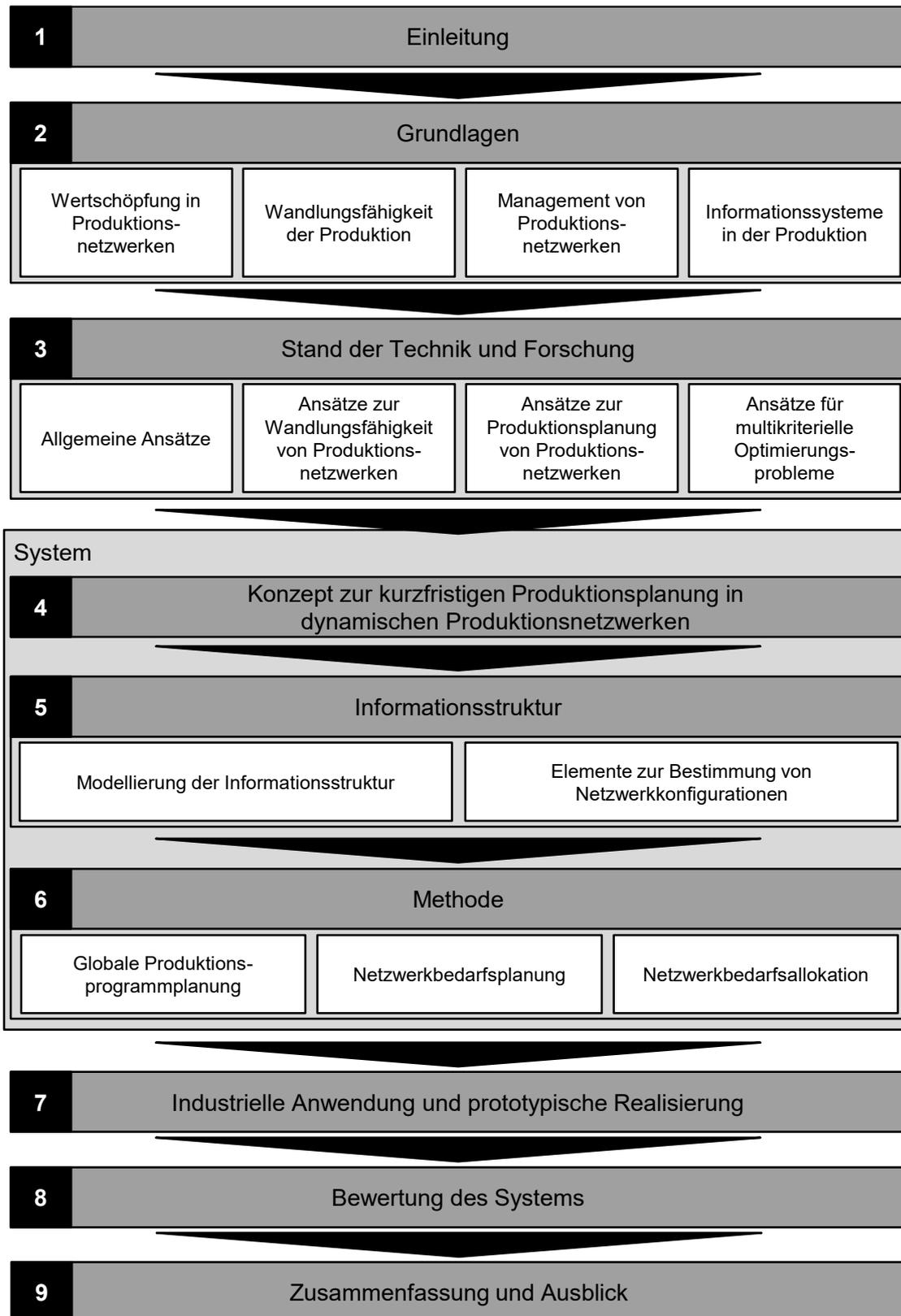


Abbildung 5: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen

2.1 Übersicht

Im folgenden Kapitel sollen auf Basis der zuvor erläuterten Ausgangssituation und Problemstellung die wesentlichen Grundlagen im Bereich der Wertschöpfung in Produktionsnetzwerken beschrieben werden.

In Abschnitt 2.2 erfolgt die Einordnung und Beschreibung von Wertschöpfung in Produktionsnetzwerken sowie die Organisationsstrukturen dieser Netzwerke. In Abschnitt 2.3 werden die Formen der Veränderung der Produktion beschrieben. Hierzu erfolgen Definitionen zu essenziellen Begriffen wie Wandlungsfähigkeit, Flexibilität und Rekonfiguration, die zum Verständnis dieser Arbeit unabdinglich sind. In Abschnitt 2.4 wird das Produktionsmanagement von Netzwerken dargestellt. Dazu gehören insbesondere die zeitliche Betrachtung der Planungsaufgaben, die Ermittlung der Herstellkosten, aber auch die algorithmenbasierte Entscheidungsunterstützung. Der Abschnitt 2.5 beschreibt die Informationsplanungssysteme in der Produktion und schließt damit das Kapitel der Grundlagen ab.

2.2 Wertschöpfung in Produktionsnetzwerken

2.2.1 Produktionssystem und -prozess

Der Begriff der Produktion kann aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden. Die geläufige Definition nach GUTENBERG (1983) erklärt den Produktionsbegriff über die Kombination unterschiedlicher Produktionsfaktoren (Arbeitskraft, Betriebsmittel, Werkstoffe) zur Erzeugung von Sachgütern und Dienstleistungen (Produkten). Ein anderer Ansatz ist die Betrachtung der Produktion als Wertschöpfung. Dieses Verständnis berücksichtigt nach WESTKÄMPER (2006) nicht nur den Herstellungsprozess, sondern alle Prozesse im Produktlebenslauf (EVERSHEIM 2002, CZICHOS 2015). Die Produktionstätigkeit stellt somit einen Wertschöpfungsprozess dar. Für diese Arbeit wird die Sichtweise nach WESTKÄMPER ausgewählt. In Abbildung 6 sind die Ebenen eines produzierenden Unternehmens aufgeführt. Der operative Produktionsprozess im Sinne von WIENDAHL ET AL. (2007) erfolgt auf Arbeitsplatzebene. Auf dieser unteren Ebene fußt die direkte Wertschöpfung im produzierenden Gewerbe. Auf den oberen Ebenen, die sich

2 Grundlagen

nicht immer scharf voneinander abgrenzen lassen, finden überwiegend organisatorische und arbeitsvorbereitende Maßnahmen statt.

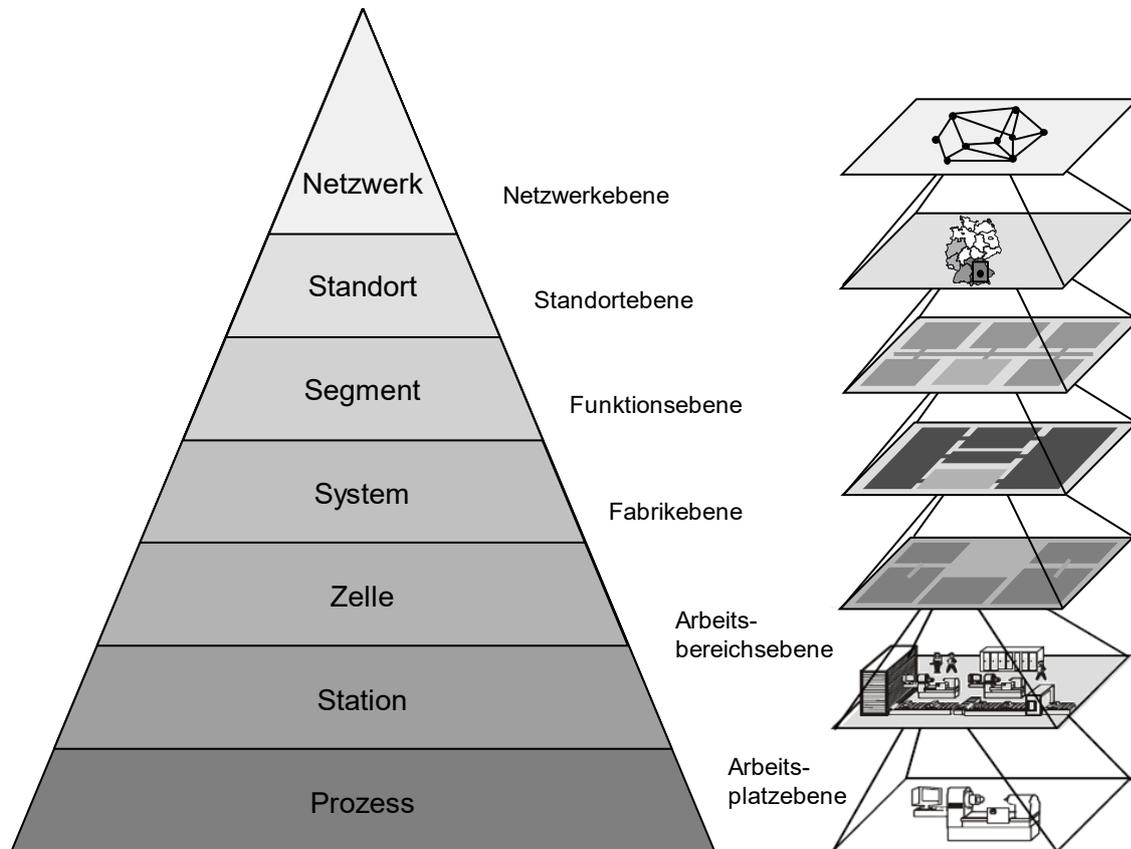


Abbildung 6: Produktionssystemebenen (in Anlehnung an WESTKÄMPER 2006, WIENDAHL ET AL. 2007)

Der Produktionsprozess schließt dabei Fertigungs-, Montage- und Transportvorgänge mit ein. Hierbei kommen unterschiedlichste Verfahren, Methoden und Abläufe zum Einsatz, die abstrahiert auch als Produktionstechnologien bezeichnet werden können. Nach der DIN 8580 lassen sich die Fertigungsverfahren in folgende sechs Hauptgruppen einteilen: Umformen, Urformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Ändern der Stoffeigenschaften. Montagevorgänge wiederum dienen dazu, aus Teilen bzw. Baugruppen Produkte mit höherer Komplexität in einer bestimmten Zeit herzustellen (WARNECKE 1992). Die VDI-RICHTLINIE 2860¹ definiert Montage als die Gesamtheit aller Vorgänge, die für den Zusammenbau von geometrischen Körpern unter Hinzunahme von formlosen Stoffen bestimmt sind. Nach LOTTER & WIENDAHL (2012) liegt der Kern der Montage im Wesentlichen

¹ Die VDI-Richtlinie 2860 Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole von 1990 wurde am Juni 2016 zurückgezogen. In dieser Arbeit wird daher die Montage-Klassifizierung von LOTTER & WIENDAHL (2012) verwendet.

2.2 Wertschöpfung in Produktionsnetzwerken

im Fügen (DIN 8580) und Handhaben (VDI-Richtlinie 2860). Dennoch werden nach der Klassifizierung der eben genannten Tätigkeiten dem Montieren drei weitere Hauptfunktionen zugeschrieben: Kontrollieren, Justieren und Sonderoperationen. Die Montage weist in der industriellen Produktion auch heute noch einen hohen Anteil an der Wertschöpfung auf, deshalb werden in dieser Arbeit neben Fertigungsprozessschritten auch Montagevorgänge berücksichtigt (LOTTER & WIENDAHL 2012).

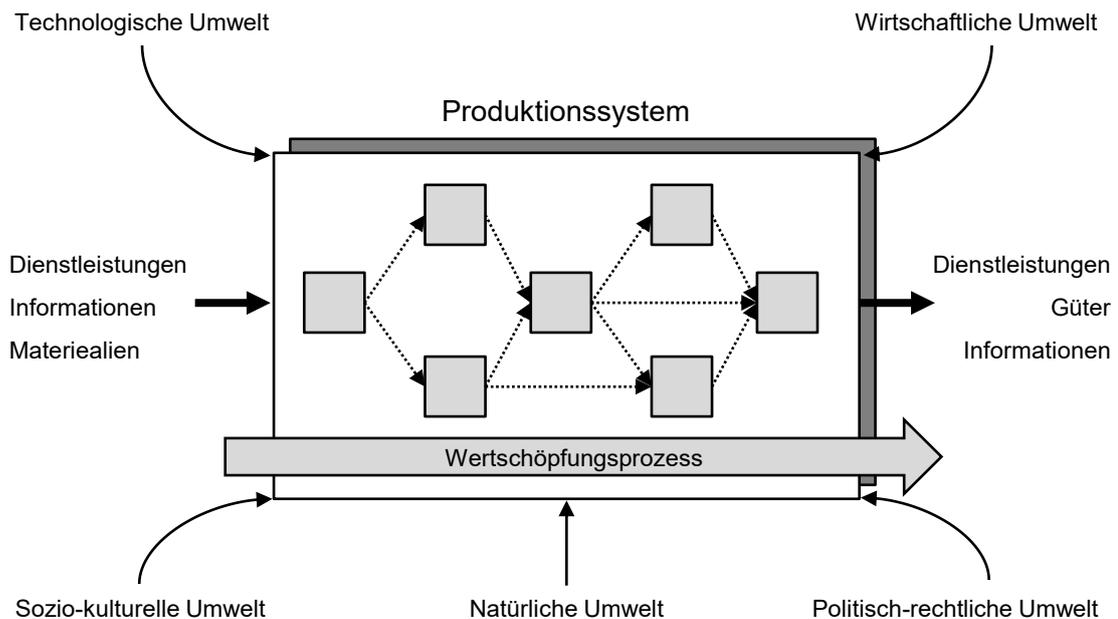


Abbildung 7: Produktionssystem und Wertschöpfungsprozess (in Anlehnung an DYCKHOFF 2006, GÜNTHER & TEMPELMEIER 2012)

Das Verständnis um den Begriff Produktionssysteme ist vielfältig. Zum einen werden darunter Managementphilosophien verstanden, die den Produktionssystembegriff nutzen, um Strategien, Prinzipien sowie Werte des Unternehmens zu formulieren und in Beziehung zu bringen. Vertreter und Entwickler dieses Verständnisses ist u. a. OHNO (1988) mit dem Toyota-Produktionssystem. Zum anderen wird der Begriff des Produktionssystems im Sinne der Produktionswirtschaft beschrieben, um den Transformationsprozess samt der Eingangs- und Ausgangsfaktoren darzustellen (DYCKHOFF & SPRENGLER 2007, GÜNTHER & TEMPELMEIER 2012). Die Abbildung 7 zeigt abstrahiert ein Produktionssystem nach dieser Auffassung mit verschiedenen Elementen und seiner Umgebung. Nach NYHUIS ET AL. (2008) handelt es sich bei einem Produktionssystem nicht um ein rein technisches, sondern vielmehr um ein soziotechnisches System. Da neben dem Zusammenwirken von Organisation, Ressourcen sowie Methoden insbesondere der Mensch wesentlicher Teil des funktionierenden Systems ist. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit

findet der Produktionssystembegriff im Sinne der Produktionstechnik Anwendung. Weiterhin kann eine Einordnung dieses Produktionssystembegriffs hinsichtlich organisatorischer und räumlicher Aspekte erfolgen. Diese Abgrenzung ist in der Literatur jedoch nicht eindeutig geregelt (HOCHDÖRFFER 2018). Nach gängiger Ansicht lässt sich das Produktionssystem nicht auf einen Standort isolieren, vielmehr werden die Transformationsprozesse des produzierenden Unternehmens standortübergreifend auf unterschiedlichen Ebenen betrachtet, wie Abbildung 6 zeigt (WIENDAHL ET AL. 2007, DYCKHOFF & SPRENGLER 2007, SCHUH & SCHMIDT 2014). Das Produktionssystem in diesem Sinne berücksichtigt somit die unterschiedlichen Ebenen einschließlich des Produktionsnetzwerkes holistisch. Diese Betrachtungsweise wird auch in der vorliegenden Arbeit angewendet.

2.2.2 Organisation von Produktionsnetzwerken

Innerhalb der Unternehmensnetzwerke nehmen die Produktionsnetzwerke eine besondere Rolle ein (HAAS & OBST 2012). Produktionsnetzwerke stellen das wesentliche Betrachtungsobjekt dieser Arbeit dar. Daher ist der folgende Abschnitt der detaillierten Betrachtung ihrer Eigenschaften und Strukturen gewidmet.

Nach SYDOW (1992), der die Evolution strategischer Netzwerke erforscht, werden Unternehmensnetzwerke durch stabile Beziehungen zwischen rechtlich selbstständigen, jedoch wirtschaftlich meist abhängigen Unternehmen charakterisiert. Diese Unternehmen bauen u. a. auf gegenseitige Verpflichtungen, Loyalität, Solidarität, Vertrauen und stehen sich eher kooperativ als kompetitiv gegenüber. Im Zusammenhang der Unternehmensnetzwerke wird häufig auch von strategischen Allianzen, Joint Ventures oder virtuellen Unternehmen gesprochen (WIENDAHL 2009). Die in dieser Arbeit fokussierte Eingrenzung auf die Produktion führt zu folgenden in der Literatur geläufigen Definitionen des Produktionsnetzwerkbegriffs. SHI & GREGORY (1998, S. 200) beschreiben Produktionsnetzwerke als „[...] *factory network with matrix connections, where each node (i.e. factory) affects the other nodes and hence cannot be managed in isolation*“. Diese Definition wurde zunächst formuliert, um die Vernetzung in unterschiedliche Richtungen als Matrix zu beschreiben und damit den Unterschied zur klassischen Fabrik mit einzelnen Verbindungen zu Lieferanten herauszustellen. RUDBERG & OLHAGER (2003) erklären darüber hinaus, dass eine Änderung bei einem Netzwerkpartner (Knoten) durch die Matrixverbindung nicht mehr isoliert, sondern ganzheitlich betrachtet werden muss. WIENDAHL & LUTZ (2002) bezeichnen das Produktionsnetzwerk hingegen als „[...] *cross-company cooperations. These networks go beyond customer-supplier relationships like logistic chains [...]*“. Diese Definition versteht

das Produktionsnetzwerk folglich als unternehmensübergreifende (cross-company) Struktur, die über die klassischen Kunden-Lieferanten-Beziehungen hinausgeht. Neben dieser interorganisationalen Sichtweise von WIENDAHL & LUTZ existieren ebenso intraorganisationale Betrachtungen (FERDOWS 1989, SHI & GREGORY 1998, THOMAS 2013).

Weiterhin finden sich in der Literatur Definitionen, die nicht die Organisationsform festlegen, sondern eher die Interdependenzen der Standorte und Ressourcen beschreiben (NEUNER 2009). Ferner findet sich die Bezeichnung internationales oder globales Produktionsnetzwerk. Hierbei handelt es sich um ein Netzwerk, das über mindestens zwei Länder verteilt ist (ABELE ET AL. 2008, MOSER 2018). Da dies heutzutage bei dem Großteil der Netzwerke der Fall ist, wird in der vorliegenden Arbeit auf diese Differenzierung verzichtet. In Forschungsansätzen von RÖHRS (2003) und NEUNER (2009) werden zudem u. a. folgende Begriffe mit ähnlicher Bedeutung definiert und abgegrenzt: Wertschöpfungsnetzwerke, Produktionsstättensystem, Produktionsverbund, Produktionswertschöpfungskette, international operations networks sowie international manufacturing networks.

Im deutschsprachigen Raum hat sich der Ausdruck des Produktionsnetzwerkes in der Wissenschaft über Jahrzehnte behauptet und findet auch in der Praxis Anwendung. Aus diesem Grund wird dieser Begriff in der vorliegenden Arbeit verwendet.

Generell können Produktionsnetzwerke auf unterschiedlichen Ebenen klassifiziert und typologisiert werden. Ein erster Ansatz zur Beschreibung und Strukturierung intraorganisationaler Netzwerke erfolgte nach BARTLETT (1993). Eine zweckmäßige Einteilung nach Skaleneffekten und Reichweite der Netzwerke sowie nach der Adaptierbarkeit an lokale Märkte und Investitionskosten entwickelte ABELE ET AL. (2008). Hieraus entstanden fünf Netzwerktypen, sogenannte Phänotypen, siehe Abbildung 8. Die *Weltfabrik* bezeichnet einen Standort, der die Produktpalette für den weltweiten Absatz liefert. Dieser Typ ist charakteristisch für hochspezialisierte Produkte. *Sequenziell oder konvergent* beschreibt die Konzentration entlang von Produktionsschritten. Der Typ *Netzwerkstruktur* stellt ein eng integriertes globales Netzwerk dar. Der Phänotyp *Lokale Produktion* verteilt die Produktion auf den lokalen Markt. Dieser Typ hat aus Umweltgründen in den letzten Jahren stark an Popularität gewonnen. Es wird dort produziert, wo die Produkte abgenommen und konsumiert werden. Der Typ *Hub and Spoke* stellt bis zu einem gewissen Produktionsschritt Bauteile und Komponenten zentral her. Die verbleibenden Arbeitsschritte erfolgen weltweit verteilt. Damit stellt dieser Typ ein Hybrid-Modell zwischen *Weltfabrik* und *Lokaler Produktion* dar. Neben diesen fünf

2 Grundlagen

Gruppen gibt es darüber hinaus noch weitere Einteilungen. Diese sind aber eher als Abwandlungen der bisher beschriebenen Phänotypen zu verstehen, z. B. die neun Netzwerktypen nach HAAS & OBST (2012).

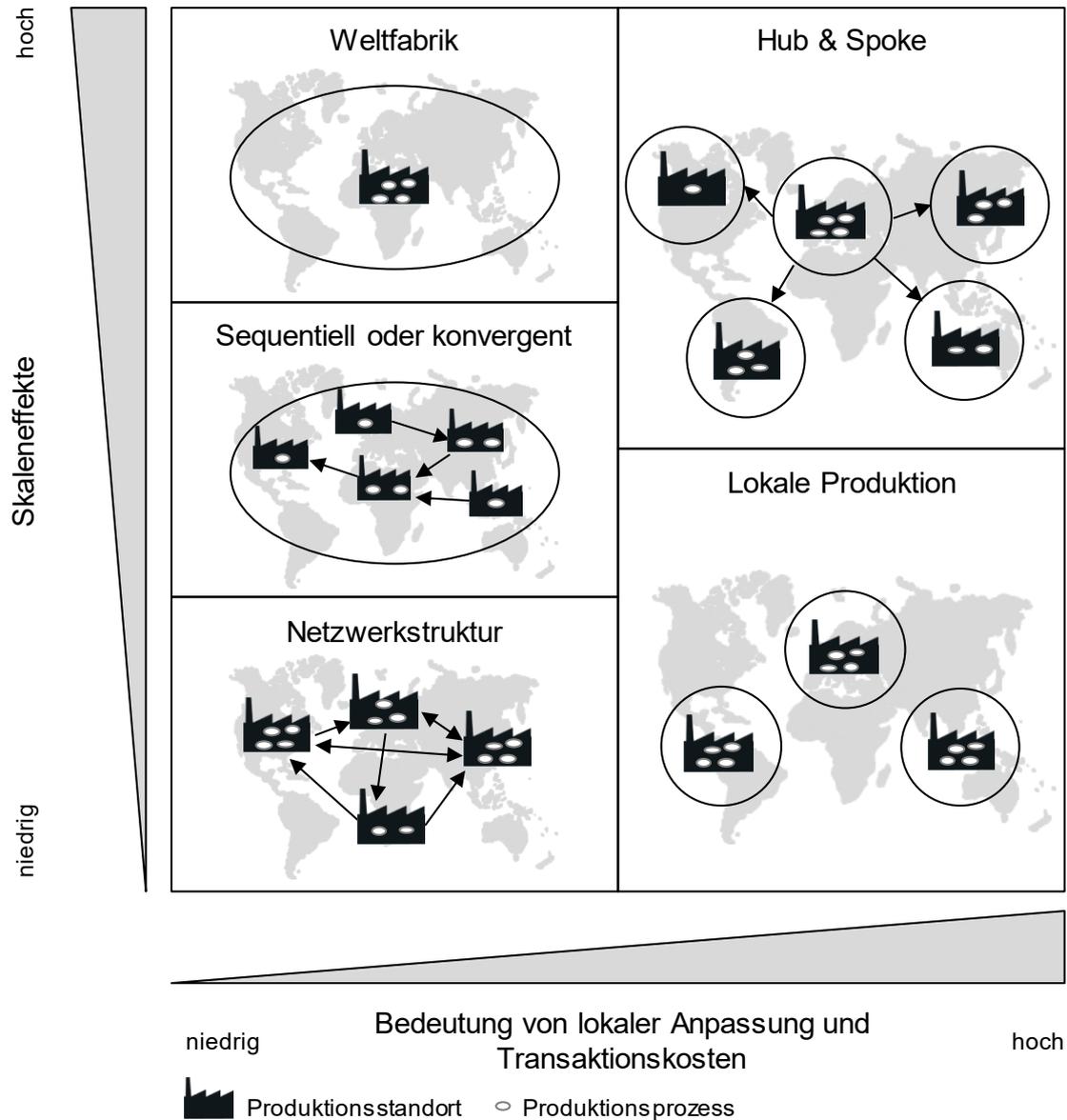


Abbildung 8: Phänotypen von Produktionsnetzwerken (in Anlehnung an ABELE ET AL. 2008)

RUDBERG & OLHAGER (2003) vertreten den Ansatz einer Klassifikation von Produktionsnetzwerken nach der Anzahl der Organisationen im Netzwerk und der Anzahl der Standorte pro Organisation.

Hieraus ergeben sich vier Klassen:

- Werk
- Supply Chain
- Unternehmensinternes Netzwerk
- Unternehmensübergreifendes Netzwerk

Die Klasse *Werk* ist charakterisiert durch einen Standort einer Organisation und stellt nur beschränkt ein Netzwerk dar. Die Betrachtung eines Standorts und mehrerer Organisationen wird von RUDBERG & OLHAGER als Klasse *Supply Chain* betrachtet. Diese Supply Chain Beschreibung ähnelt der Produktionsnetzwerkdefinition nach BUSCH & DANGELMEIER (2004), die verschiedene Organisationen betrachtet, welche ein Produkt an einem Standort erstellen, aber auch die Logistik zum Endkunden berücksichtigen. Das *unternehmensinterne Netzwerk* ist charakterisiert durch mehrere Standorte einer Organisation. Die Definition nach THOMAS (2013) beschreibt diese Klassifizierung treffend:

„Ein globales Produktionsnetzwerk besteht aus geographisch verteilten Standorten eines Unternehmens, die primär Fertigungs-, Montage- oder Entwicklungsaktivitäten durchführen“ (THOMAS 2013, S. 27).

Das *unternehmensübergreifende Netzwerk* besteht hingegen aus mehreren Standorten und mehreren Organisationen. Damit kennzeichnet diese Klasse die höchste Flexibilität, aber auch die höchste Komplexität sowie hohe Transaktions- und Koordinationsaufwendungen (HOCHDÖRFFER 2018).

In der vorliegenden Arbeit findet die obere Definition nach THOMAS (2013) sowie die Klassifizierung des unternehmensinternen Produktionsnetzwerkes nach RUDBERG & OLHAGER (2003) Anwendung.

2.3 Wandlungsfähigkeit der Produktion

In globalisierten Märkten müssen sich Unternehmen frühzeitig angemessen auf Änderungen des Marktes vorbereiten, um schnell agieren zu können (ABELE et al. 2008). Andernfalls fallen Unternehmen in einen von außen geführten Operationsmodus der Reaktion. Um diesen Zeitvorteil, der sich zwischen Agieren und Reagieren ergibt, für das Unternehmen zu nutzen, bedarf es einer speziellen Kompetenz. Diese Kompetenz lässt sich als organisatorische Fähigkeit zur eigenen Veränderung des Unternehmens beschreiben. Standorte und Ressourcen dieser Unter-

2 Grundlagen

nehmen müssen eine strukturelle Anpassungsfähigkeit besitzen. SCHUH & SCHMITT (2014) bezeichnen diese Kompetenz als Wandlungsfähigkeit. Ähnlich erläutern es NYHUIS ET AL. (2008) in ihrer Studie zu wandlungsfähigen Produktionssystemen.

„Nach Meinung namhafter Wissenschaftler und Industriemanager ist die Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen – definiert als Anpassung an das Unvorhersehbare – eine Eigenschaft, die es gilt, im Hinblick auf den Unternehmenserfolg zu identifizieren und zu gestalten“ (NYHUIS ET AL. 2008, S. 2).

In der Literatur finden sich aus den letzten zwei Jahrzehnten viele unterschiedliche Definitionen des Begriffs der Wandlungsfähigkeit (u. a. REINHART 2000, WESTKÄMPER ET AL. 2000, CISEK 2005, WIENDAHL ET AL. 2007, NYHUIS ET AL. 2008, TERKAJ ET AL. 2009, LANZA ET AL. 2018). Dies zeigt zum einen die Unschärfe des Begriffs, aber auch die Relevanz des Themas auf. Im Folgenden wird auf eine Definition näher eingegangen, um das Verständnis zu schärfen und eine Anwendung auf die Produktionsnetzwerke zu schaffen.

Im Jahr 2008 hat sich die Forschergruppe NYHUIS, REINHART & ABELE der Thematik intensiv angenommen und Grundlagen geschaffen. Hierbei wurden die schnell veränderlichen Rahmenbedingungen, sogenannte *Turbulenzen*, in denen Unternehmen in globalisierten Märkten agieren, beschrieben. Weiterhin wurde im Rahmen der Studie *Wandlungsfähige Produktionssysteme* der Ausdruck der Wandlungsfähigkeit wie folgt definiert.

„Wandlungsfähigkeit besteht also in dem Vermögen, auch über vorgehaltene Korridore hinaus Veränderungen in Organisation oder Technologie umsetzen zu können, ohne bestimmte, durch die Konzeption des Produktionssystems bereits fest vorgegebene Machbarkeitsgrenzen beachten zu müssen“ (NYHUIS ET AL. 2008, S. 14).

In den vorliegenden Abschnitten soll sowohl auf die Wandlungstreiber, die als Auslöser der Veränderung betrachtet werden können, als auch auf die Wandlungsbefähiger, die wiederum technische als auch organisatorische Lösungen für Unternehmen bieten, eingegangen werden. Weiterhin ist ein Verständnis der Formen der Veränderungsfähigkeit zur zweckmäßigen Anwendung der einzelnen Wandlungsbefähiger essenziell.

2.3.1 Wandlungstreiber

Auf Unternehmen aber auch auf Netzwerke, die als soziotechnisches System betrachtet werden können, wirken unterschiedlichste Einflüsse. Sich gegenseitig beeinflussende und damit auch häufig überlagernde Faktoren, die sich insbesondere im Netzwerk verstärken, haben ein turbulentes Umfeld zur Folge (CISEK 2005). Nach WESTKÄMPER & ZAHN (2009) können diese Einflüsse in interne und externe Faktoren differenziert werden. Zu den äußeren Faktoren zählen (1) globale Märkte mit verändertem Nachfrageverhalten durch eintretende Marktsättigung, (2) politische Faktoren, z. B. Einführung höherer Zölle oder stärkerer Regulierung, (3) umwelttechnische Faktoren, z. B. steigende Ressourcenverknappung und (4) gesellschaftliche Faktoren, z. B. Trends wie kundenindividualisierte Produkte. Diese externen Faktoren treiben Unternehmen zur Veränderung (NYHUIS ET AL. 2008). Neben den dargestellten äußeren Faktoren existieren nach WESTKÄMPER & ZAHN (2009) ebenfalls wichtige interne Faktoren wie ein wechselnder Bedarf an menschlicher Arbeitskraft, kürzere Produktlebenszyklen, neue Produktionstechnologien und -methoden sowie eine immer stärkere Vernetzung. Die beschriebenen internen und externen Faktoren erhöhen den Veränderungsdruck auf Unternehmen sowie Netzwerke und werden als Wandlungstreiber bezeichnet (WIENDAHL ET AL. 2007).

Der folgende Auszug stellt die Wichtigkeit auf äußere Einflüsse zu reagieren nochmals prägnant dar:

„[...] as living standards improve, it is increasingly evident that the era of mass production is being replaced by the era of market niches. The key to creating products that can meet the demands of a diversified customer base, is a short development cycle yielding low cost, high quality goods in sufficient quantity to meet demand. This makes flexibility an increasingly important attribute to manufacturing” (CHRYSSOLOURIS 2006, S.22).

Wie von CHRYSSOLOURIS beschrieben, nimmt die Relevanz der klassischen Massenproduktion stetig ab. Diese Produktionsstrategie ist charakterisiert durch hohe Skaleneffekte und daraus resultierenden niedrigen Preisen, somit prädestiniert für ungesättigte Märkte mit geringen Kundenanforderungen. Seit den 1990er Jahren steigt der Lebensstandard insbesondere in den Industriestaaten, dadurch sind starke Trends in Richtung kundenindividueller Produkte erkennbar (PILLER 2006). Ein Großteil der Unternehmen versucht, bis heute, mit einer immer stärker ansteigenden Zahl an Varianten auf diese veränderten Kundenbedürfnisse zu reagieren. Die kundenspezifische Produktion hat den Nachteil, dass diese häufig mit höheren Herstellkosten einhergeht und bisher eher in hochpreisigen Nischen lohnenswert

2 Grundlagen

erscheint. Dieser Herausforderung hat sich das Themengebiet des Mass Customization angenommen.

Erste Ideen des Mass Customization entstanden in den späten 1980er Jahren und gehen zurück auf Forschungsarbeiten von Davis (1987) sowie Pine (1993). Seit den 1990er Jahren stellen Mass Customization bzw. neue Kundenbedürfnisse die zentralen Wandlungstreiber für die Industrie dar.

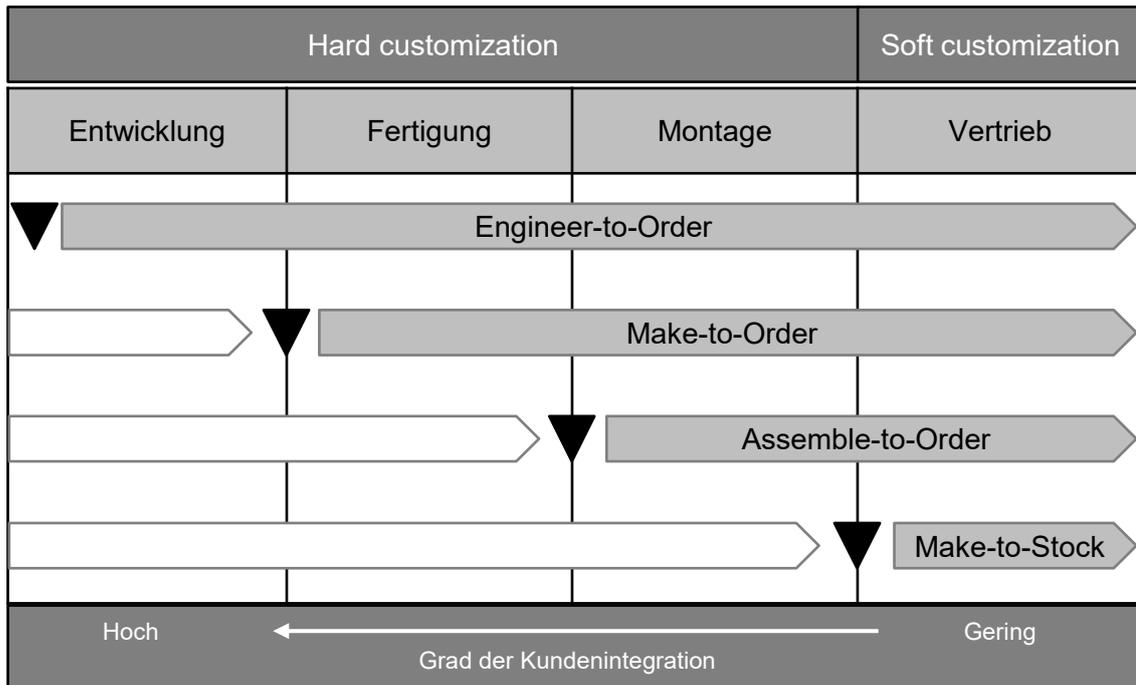
„Mass Customization of markets means that the same large number of customers can be reached as in the mass markets of the industrial economy, and simultaneously they can be treated individually as in the customized markets of preindustrial economies” (Davis 1996, S. 177).

Nach DAVIS (1996) ist es mit dem Konzept des Mass Customization möglich, die Vorteile der Massenproduktion mit den individuellen Kundenanforderungen zu koppeln und so kostengünstig zu produzieren. PILLER (2006) sieht dabei als Kern des Ansatzes die schnelle und umfassende Reaktion auf spezielle Kundenwünsche. Der Begriff Mass Customization kann aus zwei Blickwinkeln betrachtet werden, zum einen als Wettbewerbsstrategie oder aber als Fertigungstyp. Aus Sicht der Betriebswirtschaft lässt sich mit der Wettbewerbsstrategie Mass Customization neben dem Massenmarkt ein weiteres kundenspezifisches Segment erschließen. Es handelt sich bei dieser Sichtweise des Begriffs somit um eine Erweiterung des bisherigen Geschäftsmodells. Die produktionstechnische Betrachtung des Mass Customization versteht den Ansatz als weiteren eigenständigen Fertigungstypen neben den bisherigen Fertigungstypen der Einzel-, Varianten- und Massenfertigung (PILLER 2006). Durch den Fertigungstyp Mass Customization verliert die Variantenfertigung jedoch nicht an Relevanz, da die individuellen Produkte i. d. R. auf unterschiedliche Basisvarianten aufbauen. Der Ansatz des Mass Customization verfolgt eine sehr hohe Standardisierung in der frühen Wertschöpfungsphase und eine hohe Individualisierung in den späteren bzw. der letzten Phase.

Weiterhin wird der Ansatz wiederum klassifiziert in die zwei Stränge der Soft Customization und der Hard Customization (COATES & WOLF 1995, TSENG & PILLER 2003). Unter der Soft Customization wird eine vereinfachte Individualisierung am fertiggestellten Produkt verstanden. Die Eingriffstiefe des Kunden ist hierbei relativ beschränkt. Häufig werden hierunter Designelemente oder Softwareeinstellungen verstanden. Diese Anpassungen können u. a. auch im Vertrieb am Verkaufsprodukt durchgeführt werden (siehe Abbildung 9). Hard Customization hingegen erlaubt dem Kunden deutlich stärkeren Einfluss auf die Produkteigenschaften zu nehmen. Hierdurch verschiebt sich der Kundenentkopplungspunkt,

2.3 Wandlungsfähigkeit der Produktion

d. h. der Zeitpunkt, ab dem ein kundenanonymes Produkt einen dedizierten Kunden zugewiesen bekommt (siehe Abbildung 9). Technologisch und organisatorisch stellt Hard Customization deutlich höhere Anforderungen an die Anpassungsfähigkeit des Unternehmens dar. Neben veränderbaren Produktionssystemen und -netzwerken bedarf es des Einsatzes moderner Informations- und Kommunikationstechnologien, um die kundenspezifischen Wünsche in die Produktion zu übermitteln.



Legende:

- ▼ Kundenentkopplungspunkt
- ▶ Prognosebezogene Prozesse (kundenanonym)
- ▶ Kundenauftragsbezogene Prozesse

Abbildung 9: Kundenentkopplungspunkt und dazugehörige Individualisierungsansätze (in Anlehnung an PILLER & STOTKO 2003, OSTGATHE 2012)

Die steigende Relevanz der Zielgröße Wandlungsfähigkeit geht mit dem Trend des Mass Customization und der damit wachsenden Auftragsfertigung (Make-to-Order) einher. Die Bedeutung von Make-to-Order-, Assemble-to-Order- und Engineer-to-Order-Abwicklungsstrategien, im Vergleich zur klassischen Lagerfertigung (Make-to-Stock) im produzierenden Gewerbe in Deutschland, lässt sich auch dem PPS-Report 2017/2018 entnehmen (NYHUIS ET AL. 2018).

Der Ansatz des Mass Customization wird in dieser Arbeit verstärkt betrachtet, da die vorliegende Arbeit insbesondere auf die kurzfristige Produktionsplanung von kundenindividuellen Produkten in dynamischen Produktionsnetzwerken abzielt.

2.3.2 Wandlungsbefähiger

Im vorherigen Abschnitt wurden die Ursachen für Veränderungen von Organisationen umfassend erläutert. Es existieren bereits unterschiedlichste Ansätze und Methoden, um diesem Veränderungsdruck zu begegnen. Daher wird im Folgenden detailliert auf die spezifischen Fähigkeiten eingegangen, mithilfe derer Unternehmen technische und organisatorische Anpassungen vornehmen und auf diese Weise aktiv Veränderungen mitgestalten können.

Zunächst bedarf es jedoch eines Systems, um Einflussfaktoren wahrzunehmen und zu verarbeiten. Hierzu können nach CISEK ET AL. (2002) Rezeptoren als Empfangseinheit dienen. Das als Analogie aus der Biologie entwickelte Rezeptorenmodell dient dazu, das Unternehmensumfeld systematisch zu beobachten und Veränderungen der Einflussfaktoren in Form von Reizen zu empfangen. CISEK ET AL. (2002) definieren hierfür folgende sechs Rezeptoren: Produkt, Stückzahl, Zeit, Kosten, Qualität und Technologie. Die Verarbeitung der Information und damit die Interpretation des Einflusses auf die Rezeptoren erfolgt durch das Management (MÖLLER 2008). Veränderung ist somit ein aktiver Prozess, der durch äußere und innere Reize getriggert wird. Zur Umsetzung der beschriebenen Veränderungsmöglichkeiten bedarf es Eigenschaften, die zu einem Wandel befähigen (NYHUIS ET AL. 2008). Diese Eigenschaften sind Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität sowie Kompatibilität. Im Folgenden werden diese Eigenschaften als Wandlungsbefähiger bezeichnet (HERNÁNDEZ 2003). Die Universalität beschreibt die Dimensionierung und Gestaltung von Produkt- und Technologieanforderungen. Unter Mobilität wird, wie dem Ausdruck zu entnehmen ist, die örtlich uneingeschränkte Beweglichkeit von Objekten verstanden. Durch die Lageveränderung von Maschinen und Anlagen können beispielsweise neue Layoutmöglichkeiten in der Produktion geschaffen werden. REINHART & CISEK (2003) haben sich umfassend mit der Mobilität von Ressourcen befasst. Dabei wurden Mobilitätsaspekte innerhalb sowie außerhalb eines Standortes berücksichtigt und damit Voraussetzungen für temporäre Fabrikkonzepte geschaffen. Die Mitarbeitermobilität, d. h. die Bereitschaft von Mitarbeitern zeitweise in einem anderen Werk bzw. anderem Ort zu arbeiten, schafft hohes Potenzial der Auslastungsoptimierung. Der Befähiger Skalierbarkeit beschreibt die Fähigkeit, technische, räumliche und personelle

Kapazitäten schnell hoch- oder herunterzufahren. Modularität zeigt die Möglichkeit auf, standardisierte funktionsfähige Einheiten oder Elemente als Modul oder Komponente zu betrachten und schnell auszutauschen. Die Kompatibilität nimmt die letzten Jahre eine immer höhere Gewichtung ein und beschreibt die Vernetzungs- und Interaktionsmöglichkeit von Maschinen und Ressourcen, um planerisch oder steuernd einzugreifen. (NYHUIS ET AL. 2008)

2.3.3 Typen der Wandlungsfähigkeit

Nach WIENDAHL ET AL. (2007) kann die Wandlungsfähigkeit in fünf Typen klassifiziert werden. In Abhängigkeit der Produktebene sowie der entsprechenden Produktionsebene (siehe Abbildung 6) werden folgende fünf Typen definiert: Agilität, Transformierbarkeit, Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Umrüstbarkeit. Für das weitere Verständnis dieser Arbeit erscheinen die Typen Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit als relevant und werden im Folgenden näher beleuchtet.

2.3.3.1 Flexibilität

Mit dem Begriff Flexibilität wird im allgemeinen Sprachgebrauch häufig zum Ausdruck gebracht, dass ein Objekt oder Zustand nicht starr ist. Im produktionstechnischen Bereich wird der Terminus zur Beschreibung der Eigenschaft von Systemen verwendet. NYHUIS ET AL. (2008) bezeichnen ein Produktionssystem als flexibel, wenn es mit zu erwartenden Veränderungen umgehen kann. Beispiele für Veränderungen wären schwankende Stückzahlen oder Varianten innerhalb eines vorab festgelegten Korridors ohne größeren Aufwand (ZÄH ET AL. 2005).

Die weiter oben verwendete Definition der Wandlungsfähigkeit grenzt den Terminus der Wandlungsfähigkeit von der Flexibilität klar ab. Während die Flexibilität durch das geplante Vorhalten eines Handlungsspielraums einen Korridor definiert, ermöglicht die Wandlungsfähigkeit hingegen Veränderungen über den vorgehaltenen Korridor hinweg. Somit kann dies als Verschiebung des gesamten Korridors in beide Richtungen verstanden werden, wie in Abbildung 10 aufgeführt. Der wesentliche Vorteil von wandlungsfähigen Systemen besteht daher in der zukünftigen Perspektive, da Freiräume für nicht vorherbestimmte Funktionen und Fähigkeiten existieren. Dies ist insbesondere relevant für Produktionsnetzwerke, die charakterisiert sind durch Produkte mit kurzem Produktlebenszyklus oder einen hohen Anteil an kundenindividuellen Produkten. Hier müssen Freiräume für zukünftige Funktionen vorhanden sein, um den Auftrag in hoher Geschwindigkeit auszuführen. In Abbildung 10 sind Flexibilitätskorridore abgebildet, welche sich durch eine

2 Grundlagen

gewisse Breite kennzeichnen. Der Flexibilitätskorridor beschreibt die Produktionsanforderungen wie die Kapazität und die Stückzahl über die Zeit. Sofern beispielsweise die Kapazitätsnachfrage sich innerhalb des Korridors befindet, können die Produktionsaufträge betriebswirtschaftlich mit dem flexibel ausgelegten Produktionssystem realisiert werden.

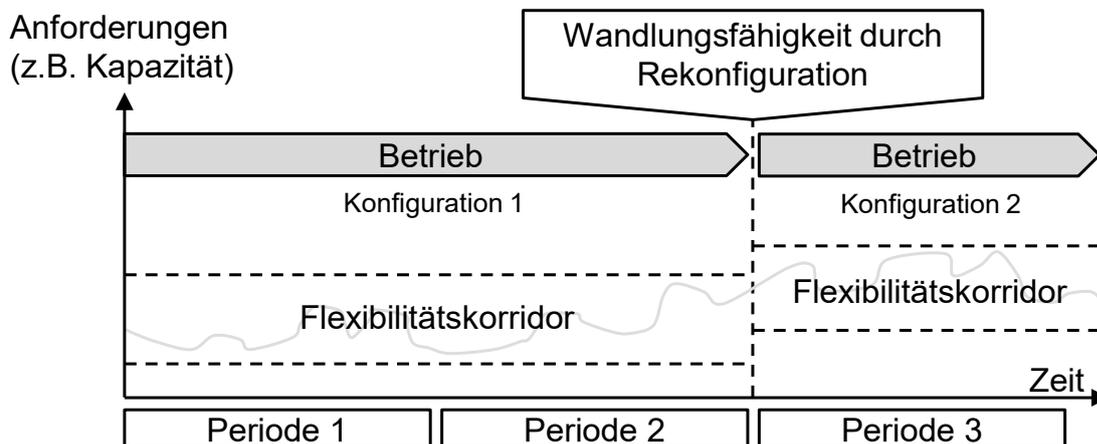


Abbildung 10: Zusammenhang Wandlungsfähigkeit, Flexibilität und Rekonfiguration (in Anlehnung an ZÄH ET AL. 2005, NYHUIS ET AL. 2008, SCHELLMANN 2012, HOCHDÖRFFER ET AL. 2016)

In der Literatur finden sich unterschiedliche Ansätze zur Beschreibung und Klassifizierung der Flexibilitätstypen. Der einfache und anwendungsnahe Ansatz von CHRYSSOLOURIS (2006) beschreibt Flexibilität in drei Kategorien (siehe Abbildung 11). Die Prozessflexibilität drückt die Fähigkeit aus, eine Reihe an Produkten durch unterschiedliche Fertigungsressourcen, -technologien, -methoden sowie unterschiedlicher Reihenfolgeplanung herzustellen. Die Produktflexibilität befähigt das Produktionssystem, eine Vielfalt von Produkten und Baugruppen mit den gleichen Ressourcen zu fertigen. Die Kapazitätsflexibilität erlaubt ein Hoch- und Herunterfahren des Volumens, um auf die schwankenden Bedarfe zu reagieren und dennoch in einem gewinnbringenden Betriebsmodus zu operieren (GOTTSCHALK 2005). Weiterhin kann Flexibilität auch auf einer zeitlichen Achse beschrieben werden und damit eine Bewertung des Umstellungsaufwandes darstellen. REINHART (2012) unterscheidet hierzu zwischen kurzfristiger und langfristiger Flexibilität. Zur Erreichung der beschriebenen Ziele ist nicht ausschließlich Technologieeinsatz nötig, sondern insbesondere Know-how und Erfahrungswissen sowie menschliche Fähigkeiten, um dies in der Organisation umzusetzen. (WIENDAHL ET AL. 2007)

Eine weitere nicht so praxisnahe, aber dafür sehr umfassende Klassifizierung des Flexibilitätsbegriffs in drei Grundtypen erfolgt durch SETHI & SETHI (1990). Nach ihrer Einteilung existieren zum einen Basis-Flexibilitätstypen wie Maschinenflexibilität, Materialflussflexibilität und Fertigungsflexibilität. Weiterhin werden System-Flexibilitätstypen beschrieben, dazu gehören Prozess-, Routen-, Produkt-, Volumen- und Expansionsflexibilität. Den letzten Grundtyp bilden die aggregierten Flexibilitätstypen, wie Programm-, Produktions- und Marktflexibilität, welche aus einer Kombination der vorherigen Systemtypen hervorgehen. Weiterführend sei auf ELMARAGHY (2006) verwiesen, der diese Einteilung nutzt und weiter spezifiziert. Auch SCHELLMANN (2012) hat sich intensiv mit den unterschiedlichen Flexibilitätsarten und insbesondere mit der Mengenfähigkeit in Produktionsnetzwerken beschäftigt. Ein weiterer wissenschaftlicher Ansatz den Begriff Flexibilität nach betrieblichen Bezugsobjekten zu klassifizieren, erfolgt durch GOTTSCHALK (2005). Dieser unterscheidet Ressourcen-orientierte und Zweck-orientierte Flexibilitätsbegriffe sowie Flexibilität als partnerschaftliche Kompetenz in Logistiknetzwerken.

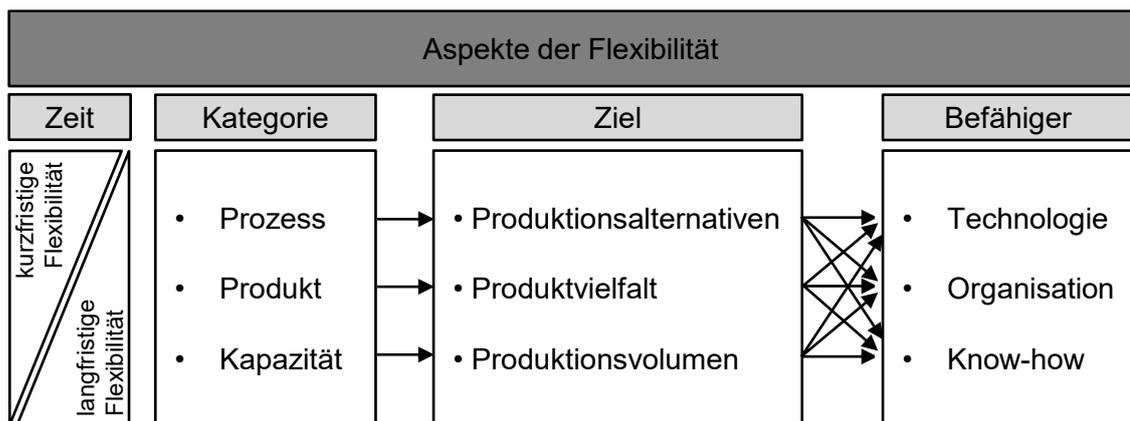


Abbildung 11: Aspekte der Flexibilität (in Anlehnung an CHRYSSOLOURIS 2006, REINHART 2012)

Eine Kombination aus dem Ansatz von CHRYSSOLOURIS (2006) und den Systemflexibilitätstypen nach SETHI & SETHI eignet sich für die Anwendung in Produktionsnetzwerken. Im Gegensatz zu HOCHDÖRFFER (2018), der ebenfalls einige Systemflexibilitätstypen nutzt, wird in vorliegender Arbeit neben Kapazitäts- und Prozessflexibilität auch die Produktflexibilität berücksichtigt. Diese soll dazu dienen, auch Produkten mit kurzen und unsicheren Produktlebenszyklen in der kurzfristigen Produktionsplanung Beachtung zu schenken (SETHI & SETHI 1990).

2.3.3.2 Rekonfigurierbarkeit

Nachdem der Zusammenhang zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in den vorherigen Abschnitten dargelegt wurde, befasst sich der folgende mit der Einführung und detaillierten Beschreibung der Rekonfigurierbarkeit.

Nach Analyse unterschiedlicher Definitionen wird Rekonfiguration meist als Prozess des Hinzufügens, Entfernens und Modifizierens von Maschinen, Ressourcen, Komponenten, Technologien oder ähnlichen Elementen beschrieben (u. a. KOREN ET AL. 1999, ELMARAGHY 2006, WIENDAHL ET AL. 2007, LORENZER 2011). Der Begriff der Rekonfiguration kann zudem in zwei große Äste unterteilt werden: zum einen in die physische, häufig auch harte Rekonfiguration und die logische, meist auch weiche Rekonfiguration genannt (u. a. ELMARAGHY 2006, WIENDAHL ET AL. 2007, GOYAL ET AL. 2012). Die untere Abbildung 12 veranschaulicht die Struktur nochmals detailliert. Während unter der harten Rekonfiguration beispielsweise eine physische Änderung des Produktionslayouts verstanden wird oder der Austausch von Maschinenkomponenten, beschreibt die weiche Rekonfiguration u. a. die organisatorische Anpassung von Planungsabläufen oder die Änderung des Softwareprogramms (WIENDAHL ET AL. 2007).

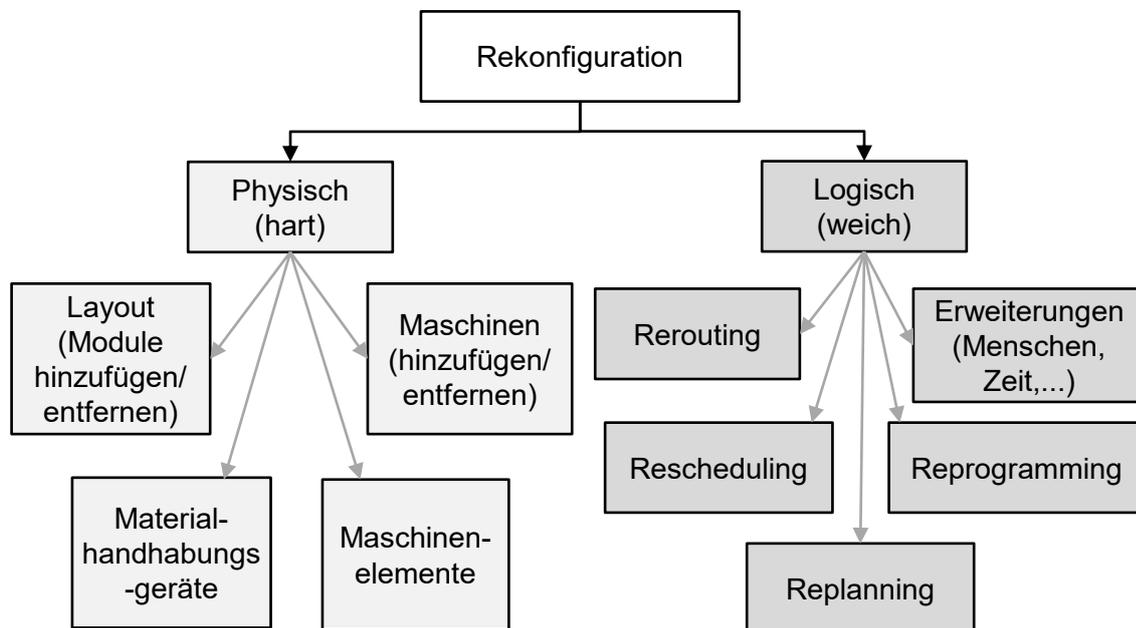


Abbildung 12: Strukturierung der Rekonfiguration in physisch und logisch (in Anlehnung an ELMARAGHY 2006, WIENDAHL ET AL. 2007, GOYAL ET AL. 2012)

Der Terminus der Rekonfiguration wurde im Produktionsumfeld sehr stark durch die Forschungstätigkeit von KOREN Ende der 1990er Jahre geprägt. Dieser hat sich

auf rekonfigurierbare Produktionssysteme fokussiert (engl. Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS)). Ziel war es, die Schwächen, u. a. die fehlende Flexibilität und Skalierbarkeit der bisherigen dedizierten Produktionssysteme (engl. Dedicated Manufacturing Lines), zu lösen. Dies wurde zuvor schon mit flexiblen Produktionssystemen (engl. Flexible Manufacturing Systems) versucht. Hierbei gelang es sowohl Flexibilität als auch Skalierbarkeit zu erzielen, jedoch zulasten der Kosten und der Produktivität. Die rekonfigurierbaren Produktionssysteme sollen, zusätzlich zu den Vorteilen der flexiblen Produktionssysteme, eine hohe Produktivität und eine Anpassbarkeit der Maschinenstruktur bieten (KOREN & SHPITALNI 2010).

Eine weitere Möglichkeit die Rekonfiguration zu strukturieren, kann hingegen auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen. Ein Ansatz von WIENDAHL ET AL. (2007) hierzu strukturiert die Veränderungsfähigkeitsklassen auf unterschiedliche Produktionsebenen. Demnach findet sich Rekonfiguration insbesondere auf den beiden Ebenen der Produktionszelle und -system wieder. Die Betrachtung des Rekonfigurationsaspekts auf diesen genannten Ebenen und ebenfalls auf der Maschinenebene wurde in den letzten Jahren tiefgründig erforscht (u. a. LORENZER 2011, WESTKÄMPER & LÖFFLER 2016). Auch HEES (2017) hat sich intensiv mit Forschungsansätzen zur Rekonfiguration von Produktionssystemen auf Maschinenebene beschäftigt. Hieraus stammt auch folgende treffende Beschreibung der Rekonfigurierbarkeit:

„[Rekonfigurierbarkeit wird] 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“ (HEES 2017, S. 12).

Diese Darstellung geht nochmals intensiv auf den Aspekt des Konfigurationswechsels ein. Eine Konfiguration stellt zunächst einen Produktionszustand dar. Der Wechsel von einer Konfiguration zur nächsten wird durch die Rekonfiguration beschrieben, solange dieser Prozessschritt reversibel, d. h. mit geringem Zeit- und Kosteneinsatz, realisierbar ist. Im Forschungsumfeld der Produktionsnetzwerke wurde der Rekonfigurationsaspekt bisher nur sehr eingeschränkt angewandt. Grund dafür könnte sein, dass die Produktionsnetzwerke traditionell auf einer stark strategischen Ebene betrachtet und erforscht werden. Das Themengebiet der Rekonfiguration hingegen findet sich eher im operativen Produktionsumfeld. Auch

HOCHDÖRFFER ET AL. (2016) beschreiben die Rekonfigurierbarkeit in einem Produktionsnetzwerk als Übergang von einem in den nächsten Konfigurationsstatus.

In der vorliegenden Arbeit wird die Rekonfigurierbarkeit auf zwei Ebenen berücksichtigt. Zum einen auf der Produktionssystemebene, hierbei wird der Aspekt der physischen Rekonfiguration verfolgt. Zum anderen wird die Fähigkeit der logischen Rekonfiguration erforscht und auf das Produktionsnetzwerk übertragen.

In diesem Abschnitt wurden Wandlungstreiber und -befähiger zur strukturellen Anpassungsfähigkeit von Organisationen sowie zwei Typen der Wandlungsfähigkeit erläutert. Hierdurch konnte die Relevanz der Kompetenz der Wandlungsfähigkeit sowie ein Basisverständnis geschaffen werden, dies ist für das weitere Verständnis der vorliegenden Arbeit essenziell.

2.4 Management von Produktionsnetzwerken

Grundsätzlich kommt dem Produktionsmanagement eine zentrale Aufgabe im Wertschöpfungsprozess in Netzwerken zu. SKINNER hat die Relevanz schon im Jahr 1964 erkannt und in seinem Report *Management of International Production* dargelegt. In der Literatur wurde das Themenfeld des Produktionsmanagements, als Teil der Produktionswirtschaft, seit Jahren sehr intensiv erforscht. Weiterführende Informationen finden sich hierzu u. a. in GUTENBERG (1983), ROHLOFF (1995), DYCKHOFF & SPENGLER (2007) sowie in der Schriftenreihe *Handbuch Produktion und Management*, herausgegeben von SCHUH & KAMPKER (2010).

DYCKHOFF & SPENGLER (2007) definieren den Produktionsmanagementbegriff als Konkretisierung der Unternehmensziele im Zuge der Leistungserbringung. Die Kernaufgabe ist dabei die zielorientierte Planung und Steuerung der Produktion. Die Planung wird hierbei als „*Willensbildung im Sinne einer zielgerichteten Festlegung zukünftigen Handelns*“ (DYCKHOFF & SPENGLER 2007, S.29) beschrieben und führt zur Sollvorgabe des Produktionsgeschehens. Folglich handelt es sich um einen Prozess des Vorherdenkens der Zukunft sowie der Ableitung von Aktivitäten (REINHART 2012). Die Umsetzung, Einhaltung und Kontrolle sowie Korrektur dieser Vorgaben wird als Steuerung bezeichnet. Nach SCHUH & SCHMIDT (2014) besteht die Aufgabe des Produktionsmanagements in der Gestaltung und Lenkung der Transformationsprozesse eines Unternehmens. Hierzu gehören die Planung, Überwachung und Steuerung der begrenzten betrieblichen Ressourcen: Mensch, Maschine, Material sowie Information (SCHUH & SCHMIDT 2014). Beide Definitionen zeigen den Zusammenhang zwischen Lenkungs- und Ausführungsinstanz

auf. Im weiteren Sinne beinhalten beide Erklärungen die Beschreibung des Regelkreises der Produktionsplanung und -steuerung. Dieser Regelkreis besteht aus Sollgrößen, auch Führungsgrößen genannt, die durch die Planung vorgegeben werden. Die Störgrößen (z. B. Maschinenausfälle) werden durch die Realität hinzugeführt, wodurch abweichende Ist-Zustände (Regelgrößen) resultieren. Die Steuerung regelt nun wieder nach, um die Abweichungen zwischen Sollvorgaben und Ist-Ergebnis auf ein Minimum zu reduzieren. Beide oben genannten Definitionen würdigen weiterhin die bedeutende Aufgabe und die damit einhergehende Verantwortung des Produktionsmanagements gegenüber der Unternehmensleitung.

Für das Verständnis der Grundlagen des Produktionsmanagements ist die Diskussion der Zielgrößen der Produktion unabdingbar. Neben den Herstellkosten, der Qualität und der Geschwindigkeit, hierbei sind nicht nur Durchlaufzeiten und Hochlaufzeiten gemeint, sondern auch die Innovationsgeschwindigkeit, stellt die Wandlungsfähigkeit eine immer wichtiger werdende Zielgröße dar (ABELE & REINHART 2011). Bei der Wandlungsfähigkeit, der auch in dieser Forschungsarbeit Gewichtung zukommt, geht es um das Vermögen, die Netzwerkstruktur schnell zu verändern, die bedarfsgerechte zügige Anpassung der Produktionskapazitäten sowie die kostengünstige kundenindividuelle Produktion.

2.4.1 Konfiguration und Koordination von Produktionsnetzwerken

Die Aktivitäten in Produktionsnetzwerken lassen sich zunächst in zwei Dimensionen unterteilen, die Konfiguration und die Koordination (PORTER 1989). Die Netzwerkkonfiguration bezeichnet somit den strukturellen Aufbau der weltweiten Unternehmensaktivitäten entlang der Wertschöpfungskette. Die Konfiguration stellt somit i. d. R. ein strategisches und damit langfristiges Unterfangen dar. Die Fragestellungen beschäftigen sich damit, wie das Netzwerk, unter Berücksichtigung von äußeren Faktoren, aufzustellen ist. Hierbei geht es häufig darum, welche Standorte strategisch weiter auszubauen oder zu verkleinern sind. Aber auch Entscheidungen von höchster Tragweite gehören dazu, wie die Eröffnung oder die Schließung von Standorten. Die Netzwerkkoordination bezeichnet die Abstimmung der einzelnen Aktivitäten der verteilten Standorte des Produktionsnetzwerkes aufeinander. Die Koordination beschäftigt sich daher mit dem Management von Netzwerken. Hierbei werden Fragestellungen behandelt, die in taktische und operative Ebenen einzuordnen sind.

Eine umfassende Literaturrecherche im Netzwerkkumfeld der beiden Dimensionen –Konfiguration und Koordination– erfolgte 2013 durch THOMAS. Die Recherche

ergab zum einen eine mehrheitlich getrennte Betrachtung dieser beiden Dimensionen. Weiteres Ergebnis war eine starke Dominanz von Veröffentlichungen im Bereich der Netzwerkkonfiguration, insbesondere bei der strategischen Betrachtung. Hierbei sei u. a. auf die produktionstechnischen Institute Aachen, Karlsruhe und St. Gallen verwiesen, die sich seit Jahren sehr intensiv mit diesen strategischen Aspekten beschäftigen (UDE 2010, FRIEDLI ET AL. 2013, MOSER 2014, MOSER 2018, PROTE 2018). Die Forschung zur kurz- und mittelfristigen Koordination von Produktionsnetzwerken ist seit 1980 kaum präsent (SCHLIFFENBACHER 2000, RUDORFER 2001, SUDHOFF 2008, THOMAS 2013). Einige Wissenschaftler weisen seit langem darauf hin, dass eine ganzheitliche Betrachtung, d. h. die Konfiguration und die Koordination von Netzwerken essenziell ist, um die Interdependenzen der Dimensionen zu berücksichtigen (PORTER 1989, SHI & GREGORY 1998, COLOTLA ET AL. 2003, EGGERT 2006, THOMAS 2013).

In dieser Arbeit wird die Koordination von Netzwerken intensiv untersucht, aber auch Ansätze zur kurzfristigen Konfiguration von Netzwerkstrukturen entwickelt. Dieser integrierte Ansatz wird gewählt, um der Komplexität von Entscheidungen im Umfeld der Produktionsnetzwerke gerecht zu werden. Strategische Aspekte wie beispielsweise Migrationspfade zur Eröffnung und Schließung von Standorten werden in dieser Arbeit nicht behandelt.

2.4.2 Funktionale Strukturierung von Planungsaufgaben

Die globale Produktion führt seit Jahren zu einer Reduzierung der Wertschöpfungstiefe an einzelnen Produktionsstandorten, aber zu immer komplexeren Produktionsnetzwerken (COLOTLA ET AL. 2003, PRINZ 2016). Hieraus resultieren vielfältigere Planungsaufgaben, um die Wertschöpfungsschritte lokal und global zu koordinieren. Daher weisen innerhalb des Produktionsmanagements insbesondere planerische Aufgaben eine hohe Relevanz in der Netzwerkbetrachtung auf. Die Literatur zeigt hier unterschiedliche Ansätze auf, wie diese Planungsaufgaben strukturiert werden können (WITTEK 2013, HOCHDÖRFFER 2018). Nach WITTEK (2013) können folgende funktionale Dimensionen gebildet werden. Neben den planerischen Aufgaben nach Unternehmensbereichen, z. B. Beschaffung, Produktion, Vertrieb, ist eine Strukturierung nach den Produktionssystemebenen z. B. nach WIENDAHL ET AL. (2007) geläufig (siehe Abbildung 6). Weiterhin ist die hierarchische Ordnung der Planung in Managementebenen (strategisch, taktisch, operativ) und Planungshorizonten (lang-, mittel- und kurzfristig) international sehr gängig (SCHÖNSLEBEN 2009, GÜNTHER & TEMPELMEIER 2012). Auch das Aachener PPS-Modell, das auf empirischen Erfahrungen beruht, kann nach der Erweiterung

um die Netzschicht als Ansatz zur Strukturierung der Netzwerkplanungsaufgaben berücksichtigt werden. Das Modell umfasst Aufgaben der Netzwerkkonfiguration, -absatzplanung und der -bedarfsplanung. Zur Netzwerkkonfiguration gehören die Aktivitäten rund um die Schaffung sowie die Auslegung des Netzwerks, diese strategischen Gesichtspunkte werden in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt. Die Netzwerkabsatzplanung, im engl. Collaborative Demand Planning, versucht eine genaue Aussage über das mengenmäßige Absatzpotenzial der Endprodukte zu treffen. Häufig werden neben Erfahrungswerten ebenfalls Prognosemodelle angewandt. Der Fokus dieser Arbeit liegt hingegen in der Netzwerkbedarfsplanung, diese gliedert sich wiederum in drei weitere Aufgabenbereiche. Den ersten Bereich bildet die Netzwerkkapazitätsplanung, hierbei werden vorhandene Kapazitäten, Ressourcen und Bestände mit dem erforderlichen Bedarf abgeglichen. Nach erfolgreicher Prüfung und Abgleich des Kapazitätsangebotes und -bedarfes erfolgt die Freigabe des Produktionsprogramms. Innerhalb des zweiten Aufgabenbereichs, der Netzwerkbedarfsallokation, erfolgt die Planung und Verteilung der Produkte bzw. Teilprodukte sowie der entsprechenden Mengen zu den Netzwerkpartnern. Diese Vorgaben werden anschließend von den einzelnen Standorten für ihre eigene lokale Produktionsprogramm- und Produktionsbedarfsplanung genutzt. Der dritte Bereich bildet die Netzwerkbeschaffungsplanung, Ziel ist die unternehmensweite Bündelung von Beschaffungsbedarfen. (SCHUH & STICH 2012)

Der Ansatz des Aachener PPS-Modells unternimmt den Versuch allumfassend gültig zu sein, dadurch erscheint es an einigen Stellen überfrachtet. Ferner ist die Morphologie des Fertigungstyps (siehe S. 22) relevant für die Anwendung, denn diese entscheidet über die notwendigen Prozesse und Planungsschritte.

In dieser Arbeit werden Planungselemente nach SCHUH & STICH (2012), WITTEK (2013) und HOCHDÖRFFER (2018) kombiniert und weiterentwickelt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der schnellen und adaptiven Anpassung des Netzwerks auf kundenindividuelle Produkte. Es handelt sich somit um den Fertigungstyp der auftragsbezogenen Produktion. Die Bestimmung des Primärbedarfs erfolgt daher bedarfsorientiert. Die Ermittlung des Sekundärbedarfs hingegen in hybrider bedarfs- sowie erwartungsorientierter Form.

2.4.3 Optimierungsalgorithmen zur Entscheidungsunterstützung

Im folgenden Abschnitt werden die Grundlagen zur modellbasierten Entscheidungsunterstützung von Planungsproblemen beschrieben. Dieses Themenfeld ist

dem Operations Research zuzuordnen, daher erfolgt zunächst eine Einordnung dieses Wissensgebiets. Ferner werden Wirkzusammenhänge in Optimierungsmodellen diskutiert und unterschiedliche Lösungsverfahren vorgestellt. Im speziellen wird auf genetische Algorithmen (GA) stärker eingegangen.

Das Wissensgebiet des Operations Research befasst sich mit komplexen planerischen Problemstellungen aus der Praxis. Zunächst erfolgt die deskriptive Modellbildung des realen Entscheidungsproblems. Hierdurch wird es möglich, ein mathematisches Modell zu formulieren und mittels der Anwendung von Algorithmen eine Lösungsfindung herbeizuführen. In komplexen Systemen, deren Wirkzusammenhänge von einzelnen Personen nicht ausreichend überblickt werden, ist die manuelle Ermittlung von optimalen Planungsentscheidungen kaum möglich. Die softwareunterstützte Operations Research Planung kann hier mit hoher Geschwindigkeit und vertretbarem Aufwand sehr gute Planungsergebnisse, auch bei komplexen Problemstellungen, erzielen.

Der Begriff der Optimierung wird häufig genutzt, um die Verbesserung von Prozessen oder Zuständen zu beschreiben, genauer handelt es sich um Minimierungs- (z. B. Durchlaufzeit, Lagerkosten) oder Maximierungsprobleme (z. B. Liefertreue, Auslastung, Gewinn). Im Sinne des Operations Research wird die mathematische Beschreibung der Optimierung genutzt, um den Prozess der Ermittlung von zulässigen Handlungsalternativen und somit die Schaffung eines Lösungsraums zu beschreiben (WERNERS 2008). Bei komplexen Planungsproblemen und einer großen Anzahl an Handlungsalternativen, wie es in dieser Arbeit der Fall ist, kann keine vollständige Enumeration, d. h. Aufstellung, Bewertung und Vergleich aller möglichen Handlungsalternativen sowie anschließende Auswahl der optimalen Lösung aufgrund des unüberschaubaren Aufwandes durchgeführt werden (WERNERS 2008). Um dieses Problem zu lösen, bedarf es eines mathematischen Optimierungsmodells. Nach DOMSCHKE ET AL. ist ein Optimierungs- bzw. Entscheidungsmodell ein vereinfachtes formales Abbild eines realen Planungsproblems. Es beinhaltet neben dem Lösungsraum mit einer Menge an Handlungsalternativen eine Zielfunktion und Nebenbedingungen. Analytische Lösungsverfahren können eingesetzt werden, um aus den Optimierungsmodellen Lösungen für das Planungsproblem zu erlangen. Für sehr komplexe Probleme, für deren Lösung keine analytischen Verfahren existieren, können Simulationsmodelle genutzt werden, um die möglichen Handlungsalternativen durchzuspielen. (DOMSCHKE ET AL. 2015)

2.4.3.1 Klassifizierung von Optimierungsmodellen

Optimierungsmodelle lassen sich in unterschiedliche Kategorien klassifizieren. Einen sehr großen Einfluss auf den Aufbau des Entscheidungsmodells hat der Typus der Zielfunktion und der Nebenbedingungen. Dieser kann linear oder nichtlinear aufgebaut sein. Eine weitere Klassifizierung kann nach den Zielkriterien erfolgen. Diese können zum einen monokriteriell, d. h. es existiert exakt eine Zielfunktion (z. B. min. Herstellkosten), oder zum anderen multikriteriell, d. h. es werden mehrere Zielfunktionen (z. B. min. Durchlaufzeit und min. Logistikkosten) verfolgt, aufgebaut werden. Ferner können Optimierungsmodelle nach dem Informationsgrad unterschieden werden. Handelt es sich um bekannte Parameter, spricht man von deterministischen Modellen. Stochastische Modelle hingegen sind durch unbekannte Parameter charakterisiert. Schließlich kann auch die Schwere der Lösbarkeit des Entscheidungsproblems unterschieden werden. Es werden hierbei Probleme klassifiziert, die mit polynomialem Rechenaufwand lösbar sind und NP-schwere Probleme², für die kein exaktes Verfahren zur Lösung bekannt ist. Der Rechenaufwand dieser NP-schweren Probleme wächst exponentiell in Abhängigkeit des Lösungsraums an. Weiteres hierzu kann bei DOMSCHKE ET AL. (2015) und WEGENER (2003) nachgeschlagen werden.

Um die Wirkzusammenhänge und die komplexen Abhängigkeiten, insbesondere in Netzwerken, zu modellieren, ist der Einsatz von binären und booleschen Variablen zweckmäßig (SUHL & MELLOULI 2013). Diese Modelle werden als kombinatorische Optimierungsprobleme bezeichnet und lassen sich grundsätzlich in vier Cluster strukturieren (DOMSCHKE ET AL. 2015):

- (1) Zuordnungsprobleme: z. B. Produktallokation im Netzwerk
- (2) Reihenfolgeprobleme: z. B. Maschinenbelegungsprobleme
- (3) Gruppierungsprobleme: z. B. Probleme der Losgrößenplanung
- (4) Auswahlprobleme: z. B. Menge an Auslieferungstouren

Die durchgeführte Klassifizierung und Einordnung von Optimierungsmodellen dient der strukturierten Auswahl von passenden Lösungsverfahren, um ein Entscheidungsunterstützungssystem aufzubauen, unter Berücksichtigung der realen Wirkzusammenhänge.

² NP steht in der Informatik für nichtdeterministisch polynomiell. Weiteres findet sich in der Literatur der Komplexitätstheorie WEGENER 2003.

2.5 Informationssysteme in der Produktion

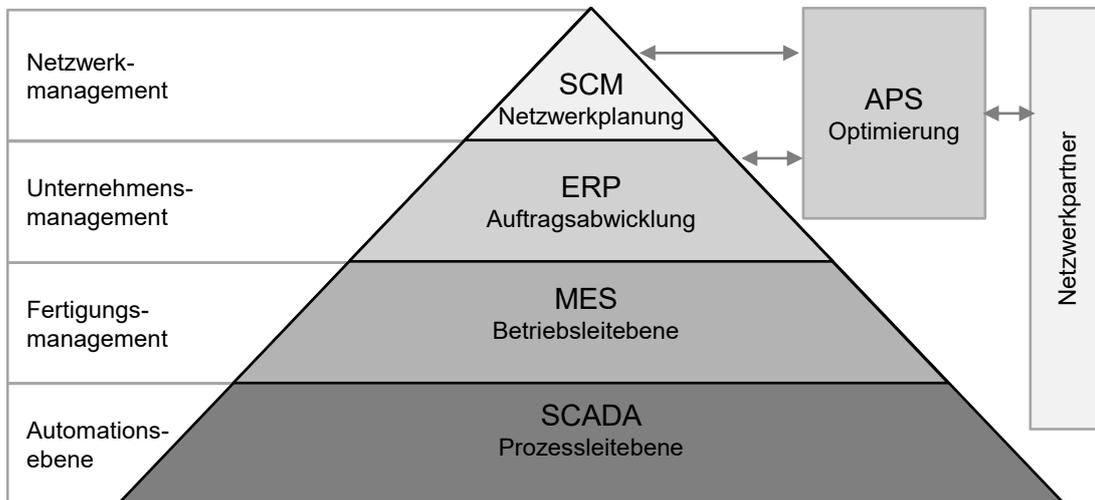
In diesem Abschnitt werden die technologiegestützten Informationssysteme des Produktionsmanagements beleuchtet. Die Entwicklung der Aufgabenbereiche und Methoden der PPS in den 1980er Jahren gingen auch mit der stetigen Entwicklung von Softwaresystemen für die Produktion einher (SCHMIDT ET AL. 2014). Während in den ersten Jahren der Fokus auf der Mengen- und Terminplanung lag, wurden in den letzten Jahren verstärkt die innerbetrieblichen Prozesse rund um die Auftragsabwicklung in modernen Enterprise Resource Planning (ERP) Systemen abgebildet. Die Granularität der Auftragsabwicklung kann auf unterschiedlichen funktionalen Ebenen und Zeithorizonten (strategisch, taktisch, operativ) dargestellt werden. Die ISA-95 Spezifikation hat hierzu eine Verbindung zwischen geschäftsprozessrelevanter IT-Systeme und produktionsrelevanter OT-Systeme geschaffen. Die Abbildung 13 orientiert sich an der Automatisierungspyramide, oft auch CIM-Pyramide³ genannt.

Die aktuellen Standards der Automatisierungspyramide werden im Rahmen der DIN EN 62264-1 veröffentlicht. Diese zeigt an der Spitze die Netzwerkebene, darunter die Unternehmens- und Fertigungsmanagementebene sowie abschließend als unterste die Automationsebene. Auf der Netzwerkmanagementebene finden sich die Supply Chain Management (SCM) Systeme. Diese Systeme dienen insbesondere der Logistikplanung von verteilten Standorten im Netzwerk (SCHÖNSLEBEN 2007, SCHMIDT ET AL. 2014). Die Unternehmensmanagementebene bildet den Kern einer Organisation, auf dieser Ebene sind die ERP-Systeme implementiert. Aufgaben dieser Systeme sind u. a. die Produktionsgrobplanung, Auftragsabwicklung, Materialfluss und Beschaffungsprozesse sowie die Stammdatenverwaltung. Zudem können weitere Module, die dem Produktionsmanagement dienlich sind, auf dieser Ebene integriert werden.

Innerhalb des Fertigungsmanagements oder der Fertigungsleitebene ist das Manufacturing Execution System (MES) ansässig. Die Funktionalitäten dieses Systems haben in den jüngeren Jahren im Zuge der Digitalisierung und der Anforderung nach einer höheren Transparenz in der Produktion stark an Bedeutung gewonnen. Hierdurch lassen sich neben der Feinplanung von Reihenfolge und Belegung, der Erfassung von Betriebs- und Maschinendaten sowie der Ressourcenverwaltung

³ CIM steht für computer-integrated manufacturing im Deutschen häufig mit computergestützte Produktion übersetzt. Weitere Informationen zur Grundidee des CIM sowie den Anfängen in den 1980er Jahren finden sich u.a. in SCHEER 1990.

auch die Vernetzung von Prozessen durchführen. Die unterste Ebene der Produktionssysteme bildet die Automationsebene. Hier sind Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systeme im Einsatz, um Maschinen- und Anlagensteuerungen sowie Lager- und Transportsteuerungen miteinander zu verbinden.



Legende:

APS	Advanced Planning and Scheduling
ERP	Enterprise Ressource Planning
MES	Manufacturing Execution System
SCADA	Supervisory Control and Data Acqusition
SCM	Supply Chain Management

Abbildung 13: Übersicht Informationssysteme in der Produktion (in Anlehnung an DIN EN 62264-1, SCHMIDT ET AL. 2014, KLETTI 2015)

Weiterhin existieren Advanced Planning and Scheduling (APS) Systeme. Diese verwenden neben exakten und heuristischen Optimierungsverfahren ebenfalls Simulationen, um komplexe Probleme auch zwischen Netzwerkpartnern zu adressieren. Der Einsatz dieser Art von Systemen in der Praxis ist laut einer gemeinsamen Studie von Trovarit und Fraunhofer IPA (WIENDAHL ET AL. 2018) immer noch gering und bildet eher eine Nische.

2.6 Fazit

Die Fokussierung auf Kernkompetenzen führt zur Reduktion der Wertschöpfungstiefe an einzelnen Produktionsstandorten und damit zu immer komplexeren Pro-

duktionsnetzwerken. Die Bedeutung des Produktionsmanagements dieser Netzwerke nimmt somit zu. Neben den klassischen Zielgrößen Zeit, Kosten und Qualität werden moderne Zielgrößen immer wichtiger. Diese sind Reaktionsfähigkeit und Transparenz. Zur zielorientierten Planung und Steuerung der Produktion sowie dem ressourceneffizienten Umgang von Mensch, Maschine, Material und Information bedarf es der Anwendung von Optimierungsmodellen zur Entscheidungsunterstützung. Die Erläuterung und Klassifizierung von Optimierungsmodellen erfolgte daher im vorliegenden Abschnitt.

3 Stand der Technik und Forschung

3.1 Übersicht

In den vorherigen Kapiteln dieser Arbeit wurden die Ausgangssituation und die Grundlagen umfassend dargelegt, darunter die Wertschöpfung in Produktionsnetzwerken, die Wandlungsfähigkeit der Produktion, das Management von Produktionsnetzwerken sowie die Informationssysteme in der Produktion. In dem vorliegenden Kapitel wird der daraus abgeleitete relevante Stand der Technik und Forschung herausgearbeitet. Hierzu werden in Abschnitt 3.2.1 internationale Forschungsarbeiten aus dem Wissensgebiet der kundenindividualisierten Auftragsfertigung analysiert. Ferner werden in Abschnitt 3.2.2 Konzepte zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken und in Abschnitt 3.2.3 relevante Ansätze zur Produktionsplanung von Produktionsnetzwerken vorgestellt und eingeordnet. In Abschnitt 3.2.4 werden Ansätze für multikriterielle Optimierungsprobleme behandelt. Durch die Analyse und Einordnung der relevanten Konzepte und Ansätze können Einsichten gewonnen werden, die den heuristischen Bezugsrahmen schärfen und das Forschungsdefizit aufzeigen. Hieraus wird abschließend der nötige Handlungsbedarf in Abschnitt 3.3 abgeleitet und dargestellt.

3.2 Analyse und Einordnung relevanter Ansätze

Mittels einer systematischen Literaturanalyse konnten alle relevanten Ansätze und Konzepte kritisch bewertet und eingeordnet werden. Die systematische Literaturanalyse orientierte sich dabei an dem PRISMA Statement (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (PAGE ET AL. 2021). In den folgenden Abschnitten wird auf die relevanten Ansätze vertieft eingegangen. Wissenschaftliche Arbeiten im Bereich der Produktionsnetzwerke, die Fragestellungen der strategischen Konfiguration von Standorten behandeln, werden im Folgenden nicht berücksichtigt (u. a. MOSER 2018, SAGER 2019).

3.2.1 Allgemeine Ansätze

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, weist die Auftragsfertigung von kundenindividuellen Produkten seit Jahren einen starken Anstieg auf. Hierbei werden insbeson-

3 Stand der Technik und Forschung

dere die Ansätze des Mass Customization betrachtet, die zukünftige Einsatzmöglichkeiten im industriellen Umfeld bieten. Das Themenfeld wird dabei seit der Jahrtausendwende, gemessen nach der Anzahl der veröffentlichten Literatur, sehr intensiv erforscht. Die Übersichtsarbeiten von TSENG & RADKE (2011) sowie FOGLIATTO ET AL. (2012) beleuchten die umfassenden Forschungsarbeiten des Mass Customization in den Bereichen Produktion, Logistik sowie Design und Ökonomie. Im Folgenden wird exemplarisch auf relevante Forschungsarbeiten der kundenindividuellen Produktion hinsichtlich Problemstellungen der Produktionsplanung und -steuerung eingegangen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes e-CUSTOM – A web-based collaboration system for mass customization wurde von MOURTZIS ET AL. (2015) ein Werkzeugkasten zur Gestaltung und zum Betrieb von Produktionsnetzwerken entwickelt. Der Mass Customization Ansatz wird hierbei über eine netzwerküberspannende Bill of Material Struktur mittels der Modularisierung von Bauteilen abgebildet. Ziel ist es dynamische Produktionsnetzwerke mit unterschiedlichen Stufen und multikriteriellen Zielkriterien zu entwickeln. Es handelt sich hierbei um ein NP-schweres Problem, das sich mit exakten Lösungsverfahren nicht effizient abbilden lässt. Aus den Erkenntnissen der Vorarbeiten von MOURTZIS ET AL. (2012) wurden drei Verfahren ausgewählt, da diese unterschiedliche Vorgehensweisen, mit jeweils verschiedenen Vor- und Nachteilen, beinhalten. Die Generierung von Handlungsalternativen und die Lösung des Optimierungsproblems erfolgt über den entwickelten Werkzeugkasten mittels der Metaheuristiken Intelligent Search Algorithm, Tabu Search und Simulated Annealing. Hierdurch konnte die Lösungsqualität, unter den eingesetzten Algorithmen, untersucht werden. Ähnlich zu der in dieser vorliegenden Arbeit fokussierten Problemstellung resultieren auftragsbezogene Produktionsnetzwerke, die vom Kundenprodukt abhängen. Diese kundenoptimierten Netzwerke weisen jedoch den großen Nachteil auf, dass die Interessen der Produktionsstandorte nicht berücksichtigt werden. Der Ansatz fokussiert insbesondere die mathematische Optimierung des Problems, jedoch vernachlässigt er die Sicht und Zielsetzung der lokalen Produktionsverantwortlichen. Dieser elementare Baustein fehlt dem Werkzeugkasten, um als gesamtheitliche Lösung betrachtet werden zu können.

Die Forschergruppe um JIAO ET AL. (2007) beschäftigt sich mit der Fragestellung, wie sich die Herstellung kundenindividueller Produkte nach dem Mass Customization Ansatz möglichst aufwandsarm und unter Einbehaltung des Skaleneffektes durchführen lässt. Die Idee ist, dass die Produktvariantenvielfalt einem varianten-

reichen Herstellungsprozess gegenübersteht. Im Kern baut die Arbeit auf das Plattform Thinking Konzept auf. Hierdurch sollen Produktfamilien und dazugehörige Prozessfamilien gemeinsam entwickelt werden. Jedes individuelle Produkt aber auch jeder Prozessschritt ist Teil der Familie und wird als Produkt- oder Prozessvariante bezeichnet. Diese Varianten werden als generische Repräsentation modelliert. Ein Element wird als generisch bezeichnet, wenn es eine Komponente eines Produkts oder einen Produktionsschritt eines Prozesses repräsentieren kann. Über diese generische Struktur lässt sich ein spezifischer Produktionsprozess für eine bestimmte Produktvariante entwickeln. Im Allgemeinen werden Produkte über eine Materialliste (Bill of Material) beschrieben. Innerhalb des Arbeitsplans werden die einzelnen Herstellprozessschritte strukturiert. Nach JIAO ET AL. kann analog zur generischen Produktstruktur, die alle Materiallisten einer Produktfamilie enthält, ebenfalls eine generische Prozessstruktur, die alle möglichen Schritte einer Prozessfamilie beinhaltet, entwickelt werden. Hierdurch ist es möglich mit einer generischen Produkt- und Prozessstruktur alle Varianten einer Produkt- und Prozessfamilie zu repräsentieren. Dies ist im Zuge der kürzer werdenden Produktlebenszyklen relevant, da sich zukünftig Standorte zweckmäßiger über die technologischen Fähigkeiten beschreiben lassen als über die Produkte, die dort gefertigt werden. Dieses vorgestellte Konzept wird im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt und in die Netzwerkumgebung übertragen. Durch diesen generischen Ansatz können zukünftig Netzwerkallokationspläne nicht nur über Produkte, sondern flexibel über die notwendigen Produktionsfähigkeiten erstellt werden.

Innerhalb des Verbundforschungsprojektes InnoCyFer (Integrierte Gestaltung und Herstellung kundeninnovierter Produkte in cyber-physischen Fertigungssystemen) am Fraunhofer IGCV und der TU München wurden Ansätze zur Umsetzung des Mass Customization Konzeptes gemeinsam mit industriellen Anwendern entwickelt (ATUG ET AL. 2016, INNOCYFER). Zur Herstellung von kundenmitgestalteten Produkten wurde ein Ansatz entwickelt, um aus dem bereitgestellten Produktmodell automatisiert Arbeitsfolgen abzuleiten. Zur Generierung dieser produktbasierten Arbeitsfolgen aus CAD-Modellen bedurfte es ähnlich zu JIAO ET AL. (2007) einer generischen Produkt- und Prozessstruktur. In Anlehnung an die DIN 8580 wurden alle möglichen Fertigungsverfahren in einem semantischen Modell beschrieben, um die nachfolgenden produktseitigen Anforderungen und die technologischen Fähigkeiten abzugleichen. Weiterhin wurden innerhalb des Projekts Ansätze aus der Bionik und der Einsatz genetischer Algorithmen für die Zuordnung von Arbeitsauftrag und Ressourcen entwickelt. Eine Übertragung der Ansätze auf die Produktionsnetzwerkebene soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgen.

3 Stand der Technik und Forschung

Die Forschergruppe SUGINOUCI ET AL. (2017) beschäftigt sich in ihrer Demofabrik mit der Fragestellung, wie die Auftragsverteilung von kundenindividuellen Produkten zwischen Ressourcen und rekonfigurierbaren Produktionssystemen erfolgt. Dabei wird der Ansatz der kombinatorischen Auktion angewandt, d. h. Produktionsressourcen treten autonom im Bieterverfahren gegeneinander an. Hierzu bieten Ressourcen ihre für einen bestimmten Zeitraum zur Verfügung stehende Kapazität in einer Auktion an und warten auf eine Auftragszuteilung. Der eingesetzte Algorithmus prüft iterativ die Alternativen nach Herstellkosten sowie Durchlaufzeit und wählt die beste Lösung aus. Das autonome Bieterverfahren nach SUGINOUCI ET AL. (2017) stellt einen anzuerkennenden Ansatz dar. Jedoch befindet sich der Ansatz in einer frühen Phase, der Umgang mit Stornierungen ist im Bereich der kundenindividuellen Produktion essenziell und wird bisher von dem vorgestellten Ansatz nicht adressiert.

Der Ansatz nach FALLBÖHMER (2000) verfolgt eine integrierte Technologieplanung. Zur systematischen Zuordnung von Fertigungsverfahren und Produktmerkmalen erfolgte die Entwicklung einer Technologiezuordnungsmatrix. Hierzu wurden Produkt- und Technologiedatenmodelle entwickelt. Die Methode könnte auf Basis der Datenmodelle auch zur automatisierten Generierung alternativer Prozessketten für die operative Planung eingesetzt werden. Aufbauend auf dieser Methode erfolgte durch KNOCHE (2005) die Entwicklung eines generischen Modells zur Beschreibung von Fertigungstechnologien. Das generische Modell fußt dabei auf einem modularen Ansatz. Im Rahmen der Technologieklassifizierung erfolgt die Entwicklung eines Technologiebaums nach DIN 8580. Die Beschreibung der einzelnen Technologien erfolgt über Module zur Spezifikation hinsichtlich Geometrie, Werkstoffeignung, Genauigkeit, Toleranzen, etc. Weiterhin wurde ein Teilmodell entwickelt, um die Verkettungsmöglichkeiten von Technologien zu beschreiben. In der operativen Planung kann der Anwender durch den Einsatz des generischen Modells bei der Auswahl und Verkettung von Fertigungsfolgen und -technologien unterstützt werden (SCHINDLER 2015). Der durch KNOCHE (2005) weiterentwickelte Ansatz von FALLBÖHMER (2000) stellt für die vorliegende Arbeit ein zweckmäßiges Grundkonstrukt zum Abgleich von Produktionsfähigkeiten und Produkthanforderungen sowie zur Auswahl geeigneter Produktionsalternativen dar. In Rahmen des Forschungsansatz wurden Transportprozesse jedoch nicht berücksichtigt.

Nach Analysen von RENZI ET AL. (2014) wurden zur Lösung von Optimierungsproblemen an rekonfigurierbaren Produktionssystemen am häufigsten (zu 61 %) GA verwendet. Dies liegt u.a. daran, dass sich evolutionäre Algorithmen gut zur

Lösung von komplexeren Optimierungsproblemen eignen, beispielsweise zur Ressourcenallokations- oder Layoutplanung. Ferner lassen sich GA gut mit weiteren Algorithmen kombinieren (RENZI ET AL. 2014). Der Ansatz der integrierten Prozessplanung und Maschinenkonfiguration von ASGHAR ET AL. (2018) verfolgt eine Erweiterung der Maschinenfähigkeiten durch modulare Rekonfiguration. Zur Lösung der Optimierungsprobleme wurde ein multikriterielles Modell entwickelt und mittels gewichteter GA gelöst. Die Rekonfiguration berücksichtigt dabei sowohl das Austauschen, Hinzu- und Wegnehmen von Hardware als auch Software. Weiterhin kann nicht nur eine physische, sondern auch eine logische Modifikation erfolgen, d. h. Änderungen des Layouts, der Maschinenkonfiguration, aber auch des Materialflusses, der Routenplanung oder der Produktionsplanung und -steuerung. Ein neuer Ansatz zur integrierten Produktionsplanung rekonfigurierbarer Produktionssysteme wurde durch HEES (2017) entwickelt. Hierzu wurden Datenmodelle sowie eine Methode zur Produktionsplanung entwickelt. Neben der Planung der Anforderungen und der Ressourcenplanung lag der Schwerpunkt in der Reihenfolgeplanung. Zur Systemmodellierung und Abbildung der Rekonfigurationsvorgänge wurde der Ansatz der Petri-Netze angewandt. Anhand einer prototypischen Anwendung konnten durch den Einsatz der beschriebenen Rekonfigurationsansätze neben der Reduktion der Lagerbestände über 33 % auch Produktivitätssteigerungen von über 22,8 % erzielt werden (HEES 2017). Eine standortübergreifende Kapazitätsplanung, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Interessen im Produktionsverbund, sowie die integrierte Planung von Logistikvorgängen für die auftragsbezogene Produktion fehlen den oben dargestellten Ansätzen.

Die Forschungsarbeit von CHEN & SHELDON (2016) untersuchte welche Auswirkungen der Einsatz von dynamischen Preisbildungsverfahren auf die kurzfristige Flexibilität von Mitarbeitern haben. Ziel des Einsatzes dynamischer Preisbildungsverfahren ist der kurzfristige Abgleich von Angebot und Nachfrage. Aus dem Kapazitätsabgleich und der Bedienung des Marktes folgen höhere Umsätze. Hierzu wird ein sogenannter Surge Pricing Mechanismus eingesetzt. Dieser neue Ansatz kann als Anreizmodell zur dynamischen Gestaltung der Lohnmodelle dienen, d. h. bei hohem Bedarf erfolgt ein hoher Lohn und bei geringem Bedarf ein niedrigerer Lohn. Daher ist der Ansatz prädestiniert für neue Geschäftsmodelle der sharing economy. Der Untersuchungsgegenstand war dabei der Personenbeförderungsdienstleister Uber, dessen Leistung die Bereitstellung einer Kommunikations- und Matchingplattform darstellt. Die Forschungsarbeit zeigt, dass der Einsatz des dynamischen Preisbildungsverfahrens große Potenziale im kurzfristigen und schnellen Abgleich von Angebot und Nachfrage birgt, dies haben die Analysen von Vergangenheitsdaten belegt. Nach Aussage dieser Forscher könnten diese Ansätze

zum Auslastungsabgleich auch außerhalb der Personenbeförderung gewinnbringend eingesetzt werden. Auch GUDA & SUBRAMANIAN (2019) analysierten anhand eines Modells der Personenbeförderung das Surge Pricing Verfahren. Neben dem Potenzial, welches auch schon von CHEN & SHELDON (2016) identifiziert wurde, konnten ferner auch Untersuchungsergebnisse erzielt werden, die kritische Aspekte des Surge Pricing Verfahrens beleuchten. Hiernach kann der Einsatz des Surge Pricings dazu führen, dass die Preise für eine Dienstleistung zu hoch sind und Fahrgäste sich alternative Beförderungsmittel suchen. Folglich resultiert eine Verringerung der Nachfrage in diesem Beförderungssegment. Weiterhin könnte ein zu hohes Surge Pricing die Motivation der Fahrer verringern, da Fahrer zu normalen Zeiten kaum mehr Fahrten anbieten möchten, sondern nur noch zu Spitzenzeiten. Gegenüber den dargestellten Risiken stehen ebenfalls hohe Chancen eines Verfahrens zum kurzfristigen automatisierten Kapazitätsabgleichs. Deshalb soll in der vorliegenden Arbeit der Versuch unternommen werden den Surge Pricing Ansatz erstmalig auf die Produktionsplanung zu übertragen.

Auch GIBBS ET AL. (2018) beschäftigten sich mit der dynamischen Preisgestaltung in der Sharing Economy. Der hierbei angewandte Ansatz des Hedonic Pricing Modells nutzt dabei eine Multiregressionsanalyse, um die wichtigsten Parameter der Preisgestaltung bei Übernachtungsmöglichkeiten zu identifizieren. Im Anwendungsbeispiel wurden Daten der Übernachtungsdienstleistungsplattform Airbnb untersucht. Dabei lässt sich der Übernachtungspreis zum einen über Charakteristiken des Ortes bzw. des Hauses ermitteln. Diese Eigenschaften des Ortes bzw. des Hauses sind kurz- bis mittelfristig gleichbleibend. Es können zwar Renovierungen und bauliche Maßnahmen an der Wohnung vorgenommen werden, dies sind jedoch eher strategische Aspekte, die einen kurzfristigen Auftragseingang kaum beeinflussen. Weiterhin hängt der Übernachtungspreis stark von der aktuellen Nachfrage in der Region ab. Dieser zweite Teil des Übernachtungspreises kann durch neue dynamische Preisbildungsverfahren automatisiert ermittelt werden. Hierdurch kann ein schneller Abgleich von Angebot und Nachfrage erfolgen. Auch der Ansatz des Hedonic Pricing Modells erscheint in Kombination mit dem weiter oben beschriebenen Surge Pricing Ansatz vielversprechend und soll in den nächsten Kapiteln weiterverfolgt werden.

3.2.2 Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken

Der Großteil der wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich der Wandlungsfähigkeit konzentriert sich auf die Maschinen- und Produktionssystemebene, wie in Abschnitt 2.3 beschrieben wurde. Dennoch existieren beachtungswürdige Ansätze,

die sich speziell mit der Wandlungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken befassen. Im Folgenden sollen die relevantesten vorgestellt werden.

Das Konzept der *virtuellen Fabrik* nach REINHART (2000) vernetzt auf informationeller Ebene die Kernkompetenzen unterschiedlicher Unternehmen zur temporären Aufgabenlösung. Der Grundgedanke ist folglich die Vernetzung von räumlich und organisatorisch getrennten Standorten zu einem temporären Netzwerk (BRANDNER 2000, RUDORFER 2001). Der Fokus lag dabei auf der Vernetzung unterschiedlicher Kernkompetenzen und der Nutzung von Spezialisierungseffekten, jedoch nicht auf der Herstellung kundenindividueller Produkte. Ein weiteres Konzept in diesem Kontext stellt die *kompetenznetzbaasierte Fabrik* nach SCHENK & WIRTH (2004) dar. Die Knoten des Netzwerks in dem Konzept sind die sogenannten Kompetenzzellen. Die Wandlungsfähigkeit soll durch eine Vielzahl an selbstorganisierten Kompetenzzellen erreicht werden. Diese unternehmensübergreifenden Kompetenzzellen sind prozessbezogen und durch eine heterarchische Netzwerkorganisation gekennzeichnet (SCHENK & WIRTH 2004).

Neue Informations- und Kommunikationstechnologien wie beispielsweise Cloud Computing Architekturen lassen die Ansätze der virtuellen und kompetenznetzbaasierten Fabrik, aus dem deutschsprachigen Forschungsraum, im internationalen Umfeld unter dem Begriff des Cloud Manufacturing wiederaufleben. Die logische Abstraktionsfähigkeit im Cloud Manufacturing zur Virtualisierung von physischen Ressourcen ist dabei deutlich höher als die virtuelle Zusammenstellung von Rechen- oder Speicherkapazität im Cloud Computing. Durch die virtuelle Abbildung physischer Produktionskapazitäten in Echtzeit lassen sich Maßnahmen der Produktionsplanung und -steuerung automatisiert in kurzen Zyklen realisieren.

Nach TAO ET AL. (2014) kann Cloud Computing als Technologie genutzt werden, um intelligente Produktionsnetzwerke zu entwickeln. Diesem Ansatz zufolge könnten Cloud Anwender im Produktionsumfeld unterschiedliche Services anfordern, wie z. B. Produktentwicklung, Fertigung und Produktionstests. TAO ET AL. (2014) entwickelten hierzu ebenfalls eine Architektur eines *Cloud Manufacturing Systems*. Ähnlich wie in der vorliegenden Arbeit kombiniert das Cloud Manufacturing System beide Ansätze der Integration verteilter Ressourcen sowie der Verteilung integrierter Ressourcen. Das Cloud Manufacturing System stellt hiernach ein dynamisches Produktionsnetzwerk dar, das gekapselte bzw. isolierte Kapazitäten an unterschiedlichen Standorten aufbricht und analog zum Cloud Computing Ressourcen virtualisiert. Hierdurch entsteht ein übergreifender, sogenannter *Ma-*

3 Stand der Technik und Forschung

nufacturing Virtual Service Layer. Das Cloud Manufacturing System kann als frühes Konzept eingeordnet werden, da eine Erprobung oder prototypische Anwendung bisher nicht veröffentlicht wurde.

Innerhalb des EU-Forschungsprojektes MANUCloud, geführt durch das Fraunhofer IPA, wurde die Anwendung des Cloud Computings für die bedarfsorientierte Produktion untersucht (MEZGÁR & RAUSCHECKER 2014). Hierzu wurde eine Taxonomie für Cloud Architekturen von virtuellen Produktionsnetzwerken entwickelt. Weiterhin wurde ein Manufacturing-as-a-Service entwickelt, um konfigurierbare Ressourcen für virtuelle Produktionsnetzwerke bereitzustellen. Das Vorhaben beleuchtet dabei die Fabrikebene mit der entwickelten intra-factory-Umgebung sowie die Netzwerkebene mit der inter-factory-Umgebung. Ähnlich zu der vorliegenden Arbeit berücksichtigt die inter-factory-Umgebung die bedarfsorientierte Konfiguration mehrerer Standorte in einem dynamischen Produktionsnetzwerk. Das Forscherteam fokussierte sich dabei verstärkt auf IT-Architektur, -Protokolle und -Schnittstellen zu bestehenden produktionsnahen IT-Systemen. Die Betrachtung der Produktionsplanung innerhalb dieser Netzwerke erfolgte hingegen nicht.

Die Forschergruppe VEZA ET AL. (2015) beschäftigte sich ebenfalls intensiv mit der Modellierung von temporären Produktionsnetzwerken. Der Ansatz verfolgt dabei die unternehmensübergreifende Vernetzung von Standorten über Internetplattformen. Die Vernetzung ähnelt ad-hoc-Verbindungen aus dem Bereich der Informationstechnologie. Da die Unternehmen keine rechtliche Einheit bilden, sprechen VEZA ET AL. (2015) von virtuellen Produktionsnetzwerken. Die standortübergreifende Vernetzung der einzelnen Fähigkeiten erfolgte dabei auftragsbasiert und löst sich nach der Erfüllung des Auftrags wieder auf. Die Forschergruppe entwickelte hierzu einen automatisierten Partnerselektionsprozess, der auf einem Auktionsalgorithmus fußt. Zur Lösung des multikriteriellen Entscheidungsproblems wurden Metaheuristiken verwendet. Das Anwendungsbeispiel ist relativ einfach formuliert und auf ein lokales Netzwerk begrenzt. Zudem erlaubt das Modell keine Aufteilung und Verteilung der Losgrößen auf das Netzwerk. Der grundsätzliche Ansatz Produktionsbereiche in einem kurzfristigen Zeithorizont in Auktionsverfahren gegeneinander antreten zu lassen und automatisiert eine temporäre Netzwerkkonfiguration zu entwickeln, soll auch in der vorliegenden Arbeit verfolgt werden.

THEKINEN & PANCHAL (2016) beschreiben in ihrem Ansatz die Erweiterung des Cloud based manufacturing um Entwicklungsaspekte. Hierzu wurden drei Matching Algorithmen angewandt und bewertet. Dadurch konnten Entwickler auf der einen Seite und dezentralisierte Produzenten auf der anderen Seite zusammengebracht werden. Als Anwendungsbeispiel wurden einfache Produkte genutzt, die durch Verfahren der additiven Fertigung herstellbar sind. Um das Planungsproblem möglichst umfassend zu betrachten, wurden drei Szenarien gebildet und mit den drei Algorithmen durchgespielt. Eine große Einschränkung bei dem vorgestellten Ansatz ist, dass ausschließlich ein Herstellungsprozessschritt betrachtet wird. Das Vorgehen mittels des Szenariodesigns soll dennoch auch in der vorliegenden Arbeit Anwendung finden.

FISHER ET AL. (2018) definieren Cloud Manufacturing als serviceorientiertes Produktionsmodell zur Bereitstellung (on-demand-services) von Produktionsressourcen und -fähigkeiten auf einer Plattform. Der Ansatz verfolgt dabei die unternehmensübergreifende Vernetzung von Produktionsstandorten in einem virtuellen Pool sowie auf der anderen Seite die Anbieter von Produkten. Hierzu wurde eine umfassende dreischichtige Systemarchitektur entwickelt, um die Interaktion zwischen Consumer-, Operator- und Provider-Domain zu visualisieren. Auf einer hohen Ebene werden Anwendungsbeispiele der diskreten Fertigungsindustrie und der Prozessindustrie diskutiert. Dabei stellen die Anwendungsbeispiele in der kontinuierlichen Prozessindustrie, wie beispielweise der Chemie- und Nahrungsmittelherstellung, ebenfalls hohes Potenzial auf. Eine Präsentation der Ergebnisse bzw. eine Umsetzung der Ansätze erfolgte bisher jedoch nicht. Weitere Cloud Manufacturing Ansätze, die die Wandlungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken unterstützen könnten, finden sich im Überblicksartikel von TAO ET AL. (2015). Detailbetrachtungen und industrielle Erprobungen der einzelnen Ansätze fehlen jedoch.

3.2.3 Ansätze zur Produktionsplanung von Produktionsnetzwerken

Die Forschungsarbeit von BRUCCOLERI ET AL. (2005) beschäftigt sich mit der Produktionsplanung von rekonfigurierbaren Produktionsnetzwerken. Eine große Herausforderung stellt hiernach die intelligente Allokation von verteilten Produktionskapazitäten dar. Nach BRUCCOLERI ET AL. muss ein Umdenken erfolgen von einer zentralen Produktionsplanung hin zu einer dezentralen. Hierzu wurden fünf Produktionsplanungsebenen definiert: (1) Top, (2) High, (3) Medium, (4) Low, (5) Shop-Floor. In dem entwickelten Modell werden die Ebenen High, Medium und Low berücksichtigt. Zur autonomen dezentralen Entscheidungsfindung wird

das Konzept des Multi-Agent System angewandt. Autonome Agenten übernehmen dabei nach definierten Mechanismen die Verhandlung über die verteilte Produktionskapazität im Netzwerk. Zum Vergleich mit einer herkömmlichen zentralen Produktionsplanung wurde ein Mixed-Integer Program mit einer Zielfunktion aufgebaut. Im Testplan wurden vier Simulationsläufe durchgeführt. Bei dem Anwendungsbeispiel eines Chipherstellers konnte die dezentrale Produktionsplanung mittels Multi-Agent System gute Ergebnisse erzielen. Das Anwendungsbeispiel ist jedoch stark vereinfacht. Weiterhin erfolgt die zentrale Produktionsplanung über ein Mixed-Integer Problem, hier könnten weitere Optimierungsmodelle angewandt werden. Die Entscheidung für eine dezentrale oder für eine zentrale Produktionsplanung erweist sich als äußerst schwierig. Die Entscheidung sollte daher differenziert und fallspezifisch betrachtet werden. Dennoch zeigt der dezentrale Produktionsplanungsansatz nach BRUCCOLERI ET AL. (2005) hohes Potenzial auf und wurde in der Konzeption der vorliegenden Arbeit berücksichtigt.

YANG ET AL. (2010) stellen ein Modell zur Lösung von Multi-Plant Auftragsallokationsproblemen vor. Durch mathematische Modellierung erfolgt die automatisierte Zuordnung von Product-to-Plant. Die Optimierung erfolgt dabei nicht nur nach Kosten, sondern auch nach dem Fälligkeitszeitraum. Die Problemstellung wird als erweitertes Transportproblem formuliert, YANG ET AL. nennen es Quasi-Transportation Problem. Die Anforderungen des Quasi-Transportation Problem sind jedoch höher als die des klassischen Transportproblems. Beispielsweise wird beim klassischen Transportproblem jeder Knoten angefahren. Bei dem Quasi-Transportation Problem hingegen kann dies der Fall sein, muss es jedoch nicht zwingend. Zur Lösung des NP-schweren Problems wird ein heuristischer Ansatz mittels genetischer Algorithmen angewandt. Nach YANG ET AL. (2010) sollten für eine realistische Lösung von Auftragsallokationsproblemen stets mehrere Standorte betrachtet werden. Weiterhin bieten sich genetische Algorithmen zur Lösung dieser komplexen Probleme an. In der vorliegenden Arbeit sollen ebenfalls die hohen Anforderungen des Quasi-Transportation Problem berücksichtigt werden.

WITTEK ET AL. (2011) untersuchen in ihren Forschungsarbeiten ebenfalls Product-to-Plant-Probleme. Hierzu wurde ein Planungssystem für flexible Produktionsnetzwerke entwickelt, um kurz- bis mittelfristig auf Nachfrageschwankungen zu reagieren. Dabei stellt die Allokation des Produktionsvolumens innerhalb des unternehmensinternen Produktionsnetzwerkes keine einmalige strategische Entscheidung mehr dar, sondern eine taktische Planungsaufgabe. Durch den Ansatz einer kontinuierlichen Reallokation von Produkten zu Produktionslinien soll eine

Maximierung des Deckungsbeitrages erfolgen. Zur Lösung des Optimierungsproblems dient die Formulierung eines Mixed-Integer Linear Programming Modells. Neben der Allokationsplanung, d. h. wo das Produkt gefertigt wird, erfolgt durch die Produktionsprogrammplanung, wann welches Produkt hergestellt wird. Als Anwendungsbeispiel dient dem Modell der Automobilsektor. Dabei wird der Prozessschritt der einstufigen Endmontage betrachtet. Das flexible Produktionsnetzwerk kennzeichnet sich weiterhin durch die Möglichkeit, unterschiedliche Produkte aus einer Familie auf verschiedenen Linien an unterschiedlichen Standorten zu produzieren. Die Logistikkosten werden in dem Anwendungsfall als nicht relevant erachtet, da ausschließlich Produktionsstandorte innerhalb der EU betrachtet werden. Diese Limitierung führt zwar zu einer höheren Unschärfe, schränkt allerdings das Planungsproblem stark ein. In der vorliegenden Arbeit wird den Logistikkosten ein höherer Stellenwert zugetragen, daher fließen diese in die Netzwerkbewertung mit ein.

BÜRGIN ET AL. (2017) streben das Ziel einer effizienten Produktionsplanung der Multi-Varianten-Serienproduktion an. Zur Handhabung der hohen Varianten in der Produktion wird der Ansatz verfolgt, den Kundenentkopplungspunkt flexibel zu gestalten. Hierzu wird zwischen Kundenaufträgen und geplanten Aufträgen (kundenanonymen Aufträgen) unterschieden. Weiterhin wird das Problem der Reihenfolgeplanung sowie die Herausforderung der Austaktung über einen zweistufigen Frozen Zone Ansatz adressiert. Zunächst erfolgt in einer virtuellen Phase, über einen monatlichen und wöchentlichen Auftragspool eine grobe Reihenfolgeplanung. Anschließend erfolgt in der physischen Phase die Austaktung über eine weitere operative Reihenfolgenachplanung. In einem früheren Ansatz entwickelten BÜRGIN ET AL. (2016) ein Modell zum Kapazitätsabgleich über das Konzept sogenannter Mixed-Model-Assembly-Lines, hierzu wurden Kundenaufträge einzelnen Standorten bzw. Linien zugeordnet. BÜRGIN ET AL. (2017, 2016) stellen zwei detaillierte und zweckmäßige Modelle zur effizienten Produktionsplanung und Beherrschung variantenreicher Produkte in globalen Netzwerken vor. Jedoch wurden die Modelle stark an den Anforderungen der Endmontage des Automobilsektors entwickelt. Das Perlenkettenkonzept, d. h. die strikte Einhaltung der Produktionsreihenfolge stellt eine sehr spezifische Anforderung dar. Eine Übertragung der Modelle kann daher allenfalls für höherwertige Produkte mit hoher, stetiger Nachfrage und aufgrund des zweistufigen Frozen Zone Ansatzes nur für Produkte mit mehrwöchiger DLZ erfolgen.

HOCHDÖRFFER (2018) entwickelte im Rahmen des Forschungsverbundvorhabens ProRegio eine Methodik zur integrierten Gestaltung globaler Produktionsnetzwerke. Das Entscheidungsunterstützungssystem dient dazu, mittels Algorithmik eine optimale Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz zu erzielen. Weiterhin konnten Lösungs- und Rechenzeitverbesserungen mittels postoptimaler Analysen erreicht werden. Die Optimierungsmodelle dienen der langfristigen Produktgestaltung innerhalb des Produktionsnetzwerkes. Der umfassende und modulare Ansatz nach HOCHDÖRFFER (2018) bietet hingegen auf kurz- und mittelfristiger Perspektive für Unternehmen keine Lösung, um auf die Marktvolatilität in diesem Zeithorizont zu reagieren. Die vorliegende Arbeit folgt daher dem im Ausblick HOCHDÖRFFERS (2018) beschriebenen Aspekt des operativen Produktionsprogramms. Durch Berücksichtigung und Einbeziehung konkreter Kundenaufträge kann somit eine durchgängige integrierte Planung globaler Produktionsnetzwerke erreicht werden.

3.2.4 Ansätze für multikriterielle Optimierungsprobleme

Für multikriterielle Optimierungsprobleme, die in dieser Arbeit behandelt werden, existieren vielfältige Verfahren, um eine Lösung herbeizuführen. Dieser Abschnitt dient dazu Lösungsansätze zu analysieren und einzuordnen.

Zunächst werden exakte und heuristische Verfahren unterschieden (GESMANN-NUISSL ET AL. 2014). Exakte Verfahren haben den Vorteil aus Entscheidungsproblemen eine optimale Lösung zu berechnen. Der bedeutende Nachteil ist hingegen der exponentielle Rechenaufwand, der nötig ist, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Dieser Ressourcenaufwand ist insbesondere bei größeren Planungsproblemen zu berücksichtigen. Für komplexe Netzwerkprobleme, mit praxisnaher Größenordnung, werden i. d. R. heuristische Verfahren eingesetzt (GÜNTHER & TEMPELMEIER 2012). Diese heuristischen Verfahren, die nach möglichst guten Lösungen suchen, eignen sich für große Planungsprobleme, da der Rechenaufwand überschaubar ist (FAHIMNIA 2013). Insbesondere für kombinatorische Optimierungsprobleme, die meist zur Klasse der NP-schweren Probleme gehören, lassen sich exakte Verfahren kaum anwenden (FAHIMNIA 2013). Daher wird im Folgenden auf heuristische Verfahren näher eingegangen.

Innerhalb der heuristischen Verfahren existieren bereits einige erprobte Algorithmen, die bei Planungsproblemen von Produktions- und Logistiknetzwerken erfolgreich eingesetzt wurden (FAHIMNIA 2013, MÄRZ ET AL. 2011). Hierbei wird häufig zwischen Eröffnungsverfahren, die zur Erstellung einer initialen Lösung dienen,

sowie Verbesserungsverfahren, die vorhandene Lösungen iterativ verbessern, unterschieden. Heuristiken besitzen im Allgemeinen die Problematik sich in ein lokales Optimum zu verirren. Sofern der Algorithmus keine verbessernde Nachbarschaftslösung erzielt, aber das Abbruchkriterium erfüllt, kommt es vor, dass das globale Optimum nicht gefunden wird. Um dies zu verhindern, existieren Mechanismen, um dem Algorithmus auch eine temporäre Verschlechterung der Zielfunktion zu gestatten. Verfahren, die diese Vorgehensweise erlauben, werden auch Metastrategien genannt. Relevante Metastrategie-Heuristiken stellen unter anderem GA, Simulated Annealing und Tabu Search dar. Die GA nehmen hierbei, gemäß der Literatur, die letzten Jahre eine gewichtige Rolle bei der Lösung von kombinatorischen Optimierungsproblem ein (YOUSSEF & ELMARAGHY 2008, FAHIMNIA ET AL. 2013, GESMANN-NUSSL ET AL. 2014).

Erste Ansätze zu GA wurden schon in den 1960er Jahren entwickelt und basieren auf den Prinzipien der Evolutionstheorie (BUTTELMANN & LOHMANN 2004). Diese Ansätze der Optimierung orientieren sich an der natürlichen Evolution lebender Organismen, die sich immer wieder optimal an die sich wandelnde Umgebung anpassen (MÄRZ ET AL. 2011).

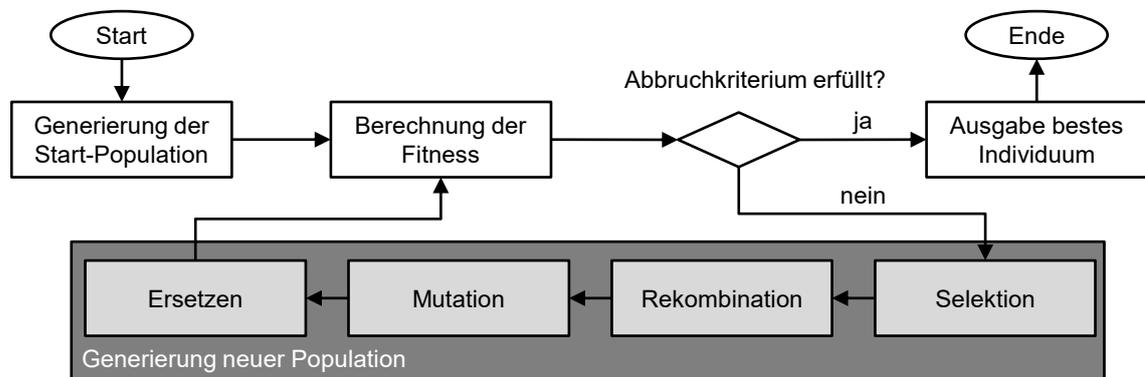


Abbildung 14: Beispielhafter Ablauf eines genetischen Algorithmus (in Anlehnung an BUTTELMANN & LOHMANN 2004)

Genetische Algorithmen sind populationsbasierte Verfahren, die nach dem Prinzip „survival of the fittest“ funktionieren. Der grundsätzliche Ablauf des GA ist in Abbildung 14 aufgeführt. Zunächst erfolgt die Bildung einer Startpopulation, die aus einer Menge möglicher Lösungsalternativen besteht. Diese Lösungsalternativen werden als Individuen bezeichnet. Der GA basiert auf einen iterativen Prozess, bei dem die Population, d. h. eine bestimmte Menge an Individuen nach jeder Iteration um eine weitere Generation inkrementiert wird. Die Fitnessfunktion, die i. d. R. der Zielfunktion entspricht, bewertet jedes Individuum, bevor der iterative

Evolutionsprozess startet. Die erste Operation selektiert Individuen als Eltern für zu generierende Individuen der Nachfolgegeneration. Die besser bewerteten und selektierten Lösungsalternativen werden im nächsten Schritt, der Variation, durch neue bessere Individuen ersetzt. Der Schritt der Variation wird durch die Operationen Rekombination (im engl. Crossover) und Mutation abgebildet. Durch die Operation der Rekombination werden genetische Sequenzen der beiden Elternteile variiert und neue Individuen entstehen. Mutation wiederum variiert unterschiedliche Gensequenzen eines Individuums, um eine bessere Lösungsalternative zu erlangen. Nach der Ersetzung der bestimmten Gene erfolgt wiederum die Berechnung der Fitness, um auf Basis der vorherigen Population eine neue Generation zu entwickeln. Dieser beschriebene iterative Prozess erfolgt, bis das Abbruchkriterium erfüllt wird und der GA das beste Individuum ausgibt. (NISSEN 1997, BUTTELMANN & LOHMANN 2004, GESMANN-NUISSL ET AL. 2014)

Die Konfiguration und die Koordination von Produktionsnetzwerken kann durchaus als komplexes System beschrieben werden. Um das Management dieser Produktionsnetzwerke effizienter und die Entscheidungen transparenter zu organisieren, erscheint es zweckmäßig Entscheidungsunterstützungssysteme einzusetzen. Gängige Planungsprobleme in der Luftfahrt und im Bereich des Supply Chain Managements werden schon seit einigen Jahren modellbasiert mittels Operations Research Software gehandhabt (DOMSCHKE ET AL. 2015, GÜNTHER & TEMPELMEIER 2012, MÄRZ ET AL. 2011).

3.3 Forschungsdefizit und Handlungsbedarf

In den letzten Jahrzehnten wurde versucht, durch hohe Variantenvielfalt den steigenden Kundenanforderungen zu begegnen. Inzwischen zeigt sich jedoch, dass das Management dieser Varianten eine sehr komplexe und zeitraubende Aufgabe ist. Insbesondere das Vorhalten von Varianten würde Lagerplätze sprengen und widerspricht den Lean-Ansätzen. Um genau diese Lagerhaltung zu reduzieren, wechseln viele Unternehmen aus dem reinen Make-to-Stock-Produktionsansatz zu einem hybriden Make-to-Stock- und Make-to-Order-Ansatz. Wie zuvor dargestellt, herrscht im privaten Konsumentenbereich aufgrund der gesättigten Märkte ein anhaltender Trend zu kundenindividuellen Produkten. Um diese Produkte nicht wie in einer Manufaktur mit hohem Prozessaufwand in einer Einzelfertigung zu produzieren, sondern im Stil und zu den Kosten der traditionellen Massenproduktion, entstand das Forschungsfeld des Mass Customization (DAVIS 1996, TSENG & PIL-

LER 2003). Produktionsnetzwerke, die sich bisher durch eine hohe Trägheit kennzeichnen, müssen für hybride Make-to-Stock- und Make-to-Order-Ansätze deutlich reaktionsfähiger werden. Aus der Analyse des Stands der Technik und Forschung in Kapitel 3 geht hervor, dass die strategische Betrachtung, die den wesentlichen Teil der Forschung im Bereich der Produktionsplanung von Produktionsnetzwerken ausmacht, die kurzfristige Reaktionsfähigkeit nicht adressiert. Ein weiteres Forschungsdefizit ist die Berücksichtigung und Abbildung der heterogenen Produktionsfähigkeiten im Netzwerk. Bisher erfolgt die Betrachtung veränderbarer Produktionssysteme nur isoliert und bezogen auf einzelne Standorte. Weiterhin müssen historisch gewachsene Produkt- und Standortzuordnungen kritisch, unter Berücksichtigung aktueller Informationen, geprüft werden. Zielzustand könnte eine fähigkeitsbezogene standortübergreifende Produktionsplanung sein, im Gegensatz zu bisherigen ressourcenbasierten Produktionsplanungsansätzen.

Aus den gewonnenen Forschungsdefiziten lassen sich folgende Handlungsbedarfe ableiten:

- Abbildung der technischen Fähigkeiten jedes Standorts auf der Produktionsnetzwerkebene
- Fähigkeitsbezogene Kapazitätsplanung unter Berücksichtigung veränderbarer Produktionssysteme
- Auftragsbezogene Nutzung der Netzstruktur zur Aufhebung von starren Produktionsnetzwerkstrukturen

4 Konzeption des Systems

4.1 Übersicht

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist ein System zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken, um kurzfristig und auftragsbezogen die Struktur von innerbetrieblichen Netzwerken dem aktuellen Bedarf anzupassen. Die mangelnde Flexibilität und hohe Komplexität historisch gewachsener Produktionsnetzwerke sowie die marktseitigen Herausforderungen wurden in der Einleitung dieser Arbeit bereits erläutert. Innerhalb des zweiten Kapitels wurden neben der Organisationsstruktur von Produktionsnetzwerken auch die Wandlungstreiber sowie -befähiger umfassend beschrieben. Nach der umfassenden Recherche und Analyse von unterschiedlichen Ansätzen im Bereich der Produktionsplanung von Netzwerken sowie der Wandlungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken stellt sich heraus, dass häufig einzelne Aspekte isoliert beleuchtet werden. Das folgende Konzept zielt auf ein System, das die unterschiedlichen Ansätze zur Bewältigung der bereits erläuterten Herausforderungen im Bereich der Produktionsplanung von Produktionsnetzwerken zusammenführt. Mit dem Anspruch einer ganzheitlichen Sicht auf die kurzfristige Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken soll der Versuch unternommen werden, schnell und kundenindividuell auf die hohe Marktvolatilität zu reagieren. Zur Sicherstellung einer hohen Wandlungsfähigkeit der Produktionsnetzwerke folgt diese Arbeit den Erkenntnissen von WESTKÄMPER & ZAHN (2009) und führt eine fähigkeitsbezogene Produktionsplanung ein.

Eine Betrachtung der Produktionsplanung von Produktionsnetzwerken unter Berücksichtigung neuer Plattformmöglichkeiten wie des Cloud Manufacturing bietet hier große Potenziale. Die Konzeption des vorliegenden Systems orientiert sich an der Richtlinie ISO/IEC/IEEE 15288 (2015) des Systems and Software Engineering. Hiernach wurden Stakeholder definiert, Systemgrenzen festgelegt, Systemebenen entwickelt sowie Systemelemente und dazugehörige Interaktionen bestimmt. Die Übersicht in Abbildung 15 stellt das System sowie die Interaktion zwischen innerbetrieblichen Auftraggebern und -nehmern sowie Vermittler als Produktionsplanungsservice dar. Um der Komplexität realer Produktionsnetzwerkprobleme, die durch die hohe Interaktion von unterschiedlichen Beteiligten entstehen, gerecht zu werden, bedarf es einer umfassenden Anforderungsanalyse. Im folgenden Abschnitt werden daher zunächst die Anforderungen an ein solches

4 Konzeption des Systems

System beschrieben. Weiterhin erfolgt eine Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes und die Beschreibung des entwickelten Lösungsansatzes.

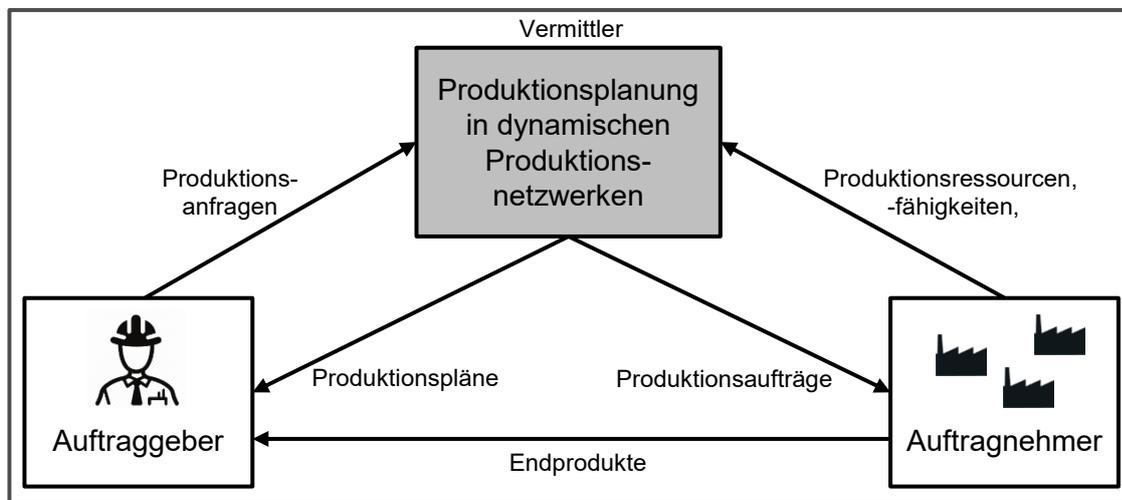


Abbildung 15: Übersicht und Interaktionsnetz des Systems zur kurzfristigen Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

4.2 Anforderungsanalyse

Ein System, das zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken beiträgt, muss verschiedene Anforderungen erfüllen. Diese Anforderungen gilt es in Bezug zur Zielsetzung im folgenden Abschnitt zu definieren. Nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009) können unterschiedliche Methoden zur Anforderungsanalyse eingesetzt werden. Zunächst erfolgte eine funktionale Analyse, um die Grundelemente, die für das Planungssystem nötig sind, zu bestimmen. Weiterhin wurde ein Interaktionsnetz entwickelt, um die Beziehungen der einzelnen Partner zu strukturieren, siehe Abbildung 15. Abschließend erfolgte die Beobachtung des möglichen zukünftigen Nutzerverhaltens des Produktionsplanungsservices. Die hierdurch gesammelten Anforderungen können in allgemeine und spezifische Anforderungen klassifiziert werden.

4.2.1 Allgemeine Anforderungen

AA 1: Erweiterbare Architektur

Die Architektur des Produktionsplanungssystems für dynamische Produktionsnetzwerke sollte technisch erweiterbar sein, um eine fortlaufende Entwicklung sicherzustellen. Zur Ermöglichung einer Interaktion der global verteilten Standorte

bietet sich eine Plattform-Architektur für das Planungssystem an. Eine ubiquitäre Applikation soll eine zügige standortübergreifende Entscheidungsfindung ermöglichen. Zur Schaffung von Vertrauen muss die Architektur einen zuverlässigen Betrieb des Produktionsplanungssystems erlauben. Neben der robusten Architektur bedarf das Produktionsplanungssystem eines User-Interface, das sich durch eine einfache Bedienung durch den Kunden (Auftraggeber und Auftragnehmer) auszeichnet.

AA 2: Anwendbarkeit, Adaptierbarkeit und Übertragbarkeit

Für den aktiven Einsatz des Planungssystems in Unternehmensnetzwerken muss Akzeptanz geschaffen werden. Dies gelingt u. a. durch eine einfache Anwendbarkeit der Lösung und stellt daher eine wichtige Anforderung dar. Um eine hohe Praxistauglichkeit sicherzustellen, bedarf es auch der Adaptierbarkeit des Systems auf unterschiedliche Produkte und Produktfamilien der Unternehmung. Weiterhin ist eine Übertragbarkeit auf unterschiedliche Branchen, wie beispielsweise die Textil- und Bekleidungsindustrie, nötig. Die Textil- und Bekleidungsindustrie ist gekennzeichnet durch einen hohen Anteil an Auftragsfertigern in Unternehmensverbänden sowie sehr hoher Volatilität am Markt. Eine weitere Dimension der Übertragbarkeit kann die Nutzung des Planungssystems für unterschiedliche Netzwerktypen sein.

AA 3: Skalierbarkeit

Neben den wichtigen Anforderungen der Anwendbarkeit, Adaptierbarkeit und Übertragbarkeit muss das System insbesondere skalierbar sein. Da das Planungssystem im volatilen Marktumfeld eingesetzt werden soll und die Wettbewerbsfähigkeit des Netzwerks halten bzw. steigern soll, bedarf es einer zügigen und umfassenden Skalierbarkeit. Hierbei müssen unterschiedliche Dimensionen der Skalierbarkeit berücksichtigt werden. Zum einen wird die Skalierbarkeit hinsichtlich der Teilnehmer der Plattform benötigt, d. h. neue Standorte müssen schnell hinzufügar und herausnehmbar sein. Zum anderen bedarf es ebenfalls einer schnellen Skalierbarkeit der Produktionsfähigkeiten und des zusammenhängenden Kapazitätsangebotes.

4.2.2 Spezielle Anforderungen

SA 1: Allokation von Produktionsaufträgen

Das zu entwickelnde Planungssystem soll in der Betriebsphase von Produktionsnetzwerken Einsatz finden. Aus diesem Grund muss das Netzwerk im Betrachtungszeitraum stets in Betrieb sein. Zur Durchführung der Allokation von Produktionsaufträgen sollte eine gewisse Grundauslastung im Netzwerk herrschen. Diese Grundauslastung ist nötig, um auf dieser Basis Bewertungen von Netzwerkkonfigurationen durchzuführen. Dabei sollte der Mix von Produkten bzw. Produktfamilien im Gesamtportfolio des Unternehmens berücksichtigt werden. Neben der Allokation der unterschiedlichen Produktionsaufträge für die verschiedenen Standorte muss sichergestellt werden, dass diese Konfigurationen auch praktisch umgesetzt werden können. Hierzu muss das Top-Management die Durchsetzungskraft besitzen, Aufträge nach Fakten, beruhend auf Kennzahlen und nicht nach internem politischem Willen einzelner Standorte im Netzwerk zu verteilen.

Die Produktionsstätten der einzelnen Standorte agieren hierbei als flexible Auftragsfertiger. Aufgrund der kurzfristigen Allokation der Aufträge müssen die Produktionsstätten bereits unterschiedliche Ressourcen und Produktionstechnologien im Einsatz haben. Ein Aufbau neuer Produktionsverfahren und -anlagen bedarf eher eines langfristigen Planungshorizontes. Die Auftragsfertiger sollten somit verfügbare und schnell veränderbare Ressourcen gewährleisten.

SA 2: Veränderungsfähigkeit der Netzwerkstruktur

Zur Umsetzung eines Wechsels von einer Netzwerkkonfiguration zu einer anderen ist eine Veränderungsfähigkeit der Netzwerkstruktur erforderlich. Die Beziehungen zwischen einzelnen Bereichen und Standorten dürfen nicht starr sein, sondern sollten eine gewisse Wandlungsfähigkeit erlauben, d. h. Beziehungen der Standorte und Fertigungsbereiche innerhalb der Organisation können zügig auftragsbezogen auf- und abgebaut werden.

SA 3: Flexible Logistik und Materialbereitstellung

Für die Umsetzung von auftragsbezogenen Netzwerkkonfigurationen ist eine flexible Logistik des Unternehmens notwendig. Damit ist sowohl eine hohe Liefermengenflexibilität als auch eine schnelle Routenflexibilität gemeint. Insbesondere für die Produktionslogistik sollten Routen zu den einzelnen Produktionsstätten ad-hoc aufgebaut werden können. Dies ist essenziell für den Transport von Halbzeugen innerhalb des Unternehmensverbundes. Aber auch die Beschaffungslogistik

muss eine hohe Flexibilität aufweisen, um kurze Lieferzeiten von Rohmaterial und Vorerzeugnissen an den einzelnen Standorten zu realisieren. Dies ist wesentlich für die Funktionsweise des zu entwickelnden Produktionsplanungssystems. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, muss das zu entwickelnde System unterschiedliche Transportarten und -kosten berücksichtigen.

SA 4: Unterschiedliche Charakteristiken der Fähigkeiten und Standorte

Die Entwicklung sinnhafter Netzwerkkonfigurationen erfordert Produktionsverbände, die aus mehr als zwei Standorten bestehen. Weiterhin sollten diese Standorte unterschiedliche ökonomische, ökologische und geographische Charakteristiken aufweisen. Denn durch diese Rahmenbedingungen lassen sich u. a. Kostenvorteile z. B. im Bereich der Lohnkosten, Energiekosten erzielen, aber auch weitere Märkte erschließen. Zur schnellen faktenbasierten Entscheidungsfindung in diesem Umfeld bedarf es einer Beschreibung des Produktionsnetzwerkes sowie dessen Fähigkeiten. Dies ist unabdingbar, um der Kurzfristigkeit der auftragsbezogenen Produktionsplanung gerecht zu werden. Damit die Beschreibung des Netzwerkes und der Fähigkeiten formalisiert werden kann, ist ein semantisches Datenmodell sinnvoll. Solch eine Standardisierung ermöglicht den vielfältigen Einsatz dieser Lösung standortübergreifend. Die beschriebene Anforderung ist für Produktionsnetzwerke elementar, da andernfalls isolierte Inselösungen entstehen, die nicht auf demselben semantischen Datenmodell basieren.

4.3 Betrachtungsumfang

Im Rahmen dieses Abschnitts erfolgt eine Eingrenzung des Untersuchungsbereiches. Diese Eingrenzung leitet sich aus der eingangs beschriebenen Problemstellung ab. Hierzu erfolgt zunächst eine Abgrenzung der Unternehmenseigenschaften nach unterschiedlichen Merkmalen. Um eine strukturierte Vorgehensweise sicherzustellen, wurde in Anlehnung an GÖBEL (2005) und SCHELLMANN (2012) die morphologische Analyse gewählt. Hierbei werden die Unternehmenseigenschaften durch mehrere Merkmale kategorisiert. Die Merkmale wiederum werden durch die unterschiedlichen Ausprägungen weiter beschrieben. Durch die Morphologie werden produkt- und prozessspezifische Merkmale mehrdimensional in Relation gestellt. Die in der Abbildung 16 dunkelgrau dargestellten Merkmalsausprägungen bilden den Fokus und werden in dieser Arbeit behandelt.

4 Konzeption des Systems

Wie in der Motivation dieser Arbeit beschrieben, soll das zu entwickelnde System insbesondere Ansätze und Lösungen zur schnellen Reaktion auf die hohe Volatilität am Markt liefern. Daher werden Unternehmen fokussiert, bei denen ein schwankender Bedarf beim Endkunden herrscht. Weiterhin wird angenommen, dass Prognosen und Vorhersagen des Marktverhaltens nur als mäßige Annäherungen herangezogen werden können. Eine Anwendung des Systems in der Fließgüterindustrie ist durchaus denkbar. Um die Systemkomplexität jedoch nicht übermäßig ansteigen zu lassen, erfolgt zunächst eine Eingrenzung auf die Produktion von Stückgütern.

Merkmale	Merkmalsausprägung			
Bedarf beim Endkunden	Konstant	Schwankend		Unregelmäßig
Produktform	Fließgüter		Stückgüter	
Produktspezifikationen	Kundenindividuell	Typisiert mit Varianten	Standardisiert mit Varianten	Standardisiert
Kundenentkopplungspunkt	Make-to-Stock		Make-to-Order	
Fertigungsart	Einzelfertigung	Serienfertigung		Massenfertigung
Netzwerkform	Unternehmensintern		Unternehmensübergreifend	

Abbildung 16: Morphologische Analyse zur Eingrenzung des Betrachtungsumfanges

Bei den Produktspezifikationen stehen variantenreiche und kundenindividuelle Produkte im Fokus. Hierdurch wird das Einsatzfeld des Systems erweitert um Produkte, die kundenindividuell, jedoch in sehr hoher Stückzahl zu fertigen sind. Die wirtschaftliche Herstellung dieser Produkte stellt Unternehmen vor große Herausforderungen, wie eingangs beschrieben (REINHART 2017). Um in dieser Merkmalsausprägung wettbewerbsgerecht zu produzieren, sollten Lagerbestände vermieden werden. Außerdem soll die Möglichkeit eines Kapazitätsausgleichs über

Lagerbestände ausgeschlossen werden. Daher wird in dieser Arbeit die Auftragsfertigung (Make-to-Order) fokussiert. Die Fertigungsart der Massenfertigung findet überwiegend bei hoch standardisierten Produkten und im Make-to-Stock statt.

Ein weiteres Merkmal zur Beschreibung des Gültigkeitsbereiches dieser Arbeit ist die Form des Produktionsnetzwerkes. Netzwerke weisen, wie in den vorherigen Kapiteln detailliert beschrieben, vielfältige Möglichkeiten der Strukturierung auf. Die hier gelistete Merkmalsausprägung unterscheidet unternehmensinterne und -übergreifende Netzwerke. Ein unternehmensinternes Netzwerk in diesem Zusammenhang subsumiert alle Produktionsfähigkeiten und -standorte einer einzelnen Organisation. Diese Form wurde für das zu entwickelnde System genutzt, um den Fokus der Arbeit auf technische und betriebswirtschaftliche Gesichtspunkte zu lenken. Durch diese Eingrenzung werden politische und rechtliche Aspekte, wie beispielsweise der Umgang mit geistigem Eigentum und fremden Daten ausgegrenzt. Denn das Wissen um Produkte und Prozesse mit dem Einsatz des Produktionsplanungssystems bleibt innerhalb der Organisation. Auch sensible Informationen und Kennzahlen, wie beispielsweise das verfügbare Kapazitätsangebot, das wiederum Rückschlüsse auf die aktuelle Auslastung und damit die betriebswirtschaftliche Situation des Standorts liefert, bleiben durch diese Eingrenzung innerhalb des Unternehmens. Eine Ausweitung des in dieser Arbeit zu entwickelnden Produktionsplanungssystems auf ein unternehmensübergreifendes System ist aus technischer Sicht mit geringen Änderungen möglich.

4.4 Lösungsansatz

Aus der in Kapitel 1 dargestellten Ausgangssituation sowie den Forschungsfragen konnte sich, unter Berücksichtigung des Standes der Technik und Forschung, der Handlungsbedarf ableiten. Nach der Anforderungsanalyse und der kritischen Diskussion des Betrachtungsumfangs soll in dem vorliegenden Abschnitt der Lösungsansatz dieser Arbeit vorgestellt werden.

Aus der Literaturrecherche in Kapitel 3 sowie dem PPS-Report 2017/2018 (NYHUIS ET AL. 2018) lässt sich schließen, dass generelle Zuordnungs- und Gruppierungsprobleme durch den Einsatz von IT-Systemen, beispielsweise Manufacturing Execution Systems, mittels mathematischer Optimierung angegangen werden sollten. Die geschilderte Thematik im Netzwerkbereich zeigt eine hohe Rele-

4 Konzeption des Systems

vanz auf, jedoch existiert bisher kein umfassendes Planungssystem, das eine adaptive und dynamische Auftragsverteilung im Produktionsnetzwerk anhand mathematischer Optimierungsmodelle durchführt.

In der vorliegenden Arbeit soll ein solches System entwickelt werden, um die beschriebenen Zuordnungs- und Gruppierungsprobleme zwischen Aufträgen und Produktionskapazitäten auf Netzwerkebene zu lösen (siehe Abbildung 17). Unter anderem sollen Entscheidungen über die Produktallokation, d. h. an welchem Standort ein bestimmter Auftrag schnell, kosteneffizient und nachvollziehbar produziert werden kann, getroffen werden. Ferner sollen automatisiert optimale Losgrößen auf Netzwerkebene gebildet werden. Dabei sollen neue as-a-Service Modelle aus der Informationstechnik, wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, auf die Produktionstechnik übertragen werden.

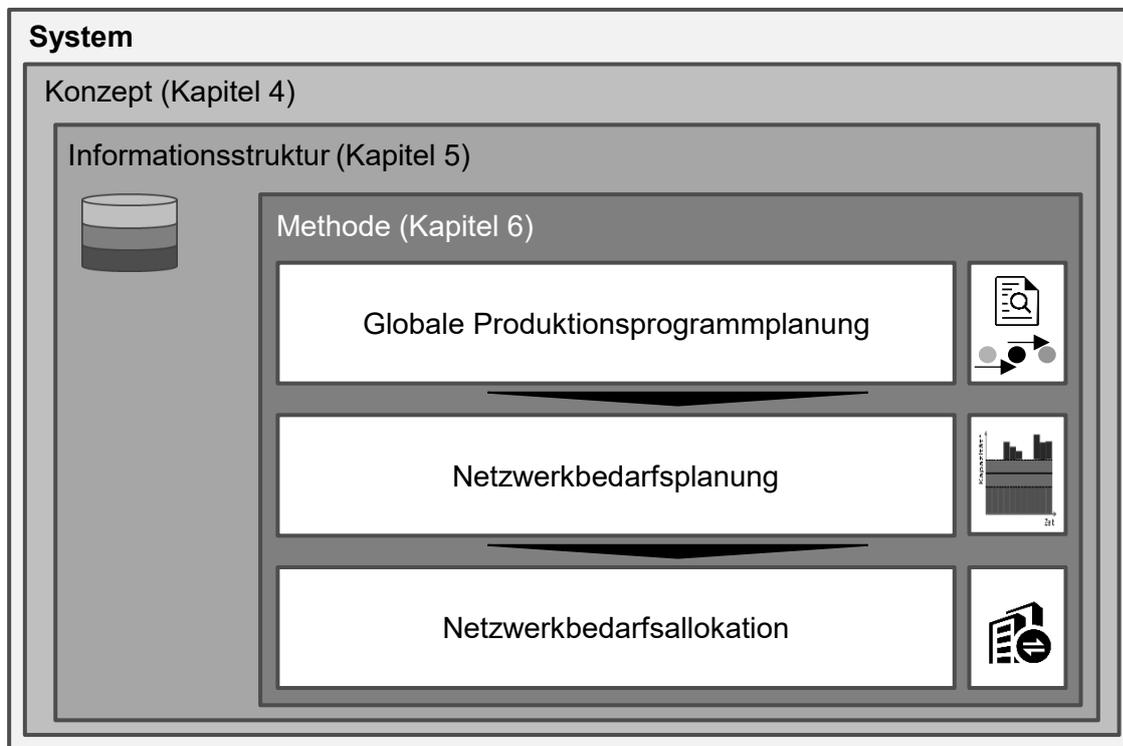


Abbildung 17: Systemüberblick

Weiterhin soll die geplante Überbuchung von Ressourcen, wie es beispielsweise im Dienstleistungssektor der Luftfahrt bereits angewandt wird, für zukünftige dynamische Produktionsnetzwerke in der vorliegenden Arbeit erprobt werden. Auch innovative dynamische Preismanagement-Ansätze wie sie u.a. im Gastgewerbe, Online-Versandhandel und der Personenbeförderung heute schon Einsatz finden, sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit für die Produktionsplanung erforscht werden.

Die Abbildung 17 stellt den Lösungsansatz in einem Schaubild dar. Das System besteht aus drei Systemelementen, der Konzeption, der Modellierung der Informationsstruktur sowie der mehrstufigen Methode.

Die Modellierung der Informationsstruktur dient dazu, die Informationsbedarfe des Planungssystems bereitzustellen und zu strukturieren. Ziel ist es, mit diesem Systemelement die Informationsgrundlage für die Methode zu schaffen. Diese Grundlage ist nötig, denn hierdurch können automatisierte Entscheidungsvorlagen für die Produktionsplanung von Netzwerken entstehen, ohne weitere Informationen manuell in den Prozess einzubringen. Dabei muss der gesamte Prozessablauf informationstechnisch betrachtet werden. Entscheidungsrelevante Aspekte, die für bzw. gegen einen Produktionsstandort sprechen, müssen in den Informationsmodellen enthalten sein. Neben den Informationen zu den einzelnen Standorten und den einsetzbaren Technologien ist es auch nötig, die logistischen Beziehungen formal in eine Informationsstruktur zu bringen. Für die Bewertung eines einzelnen Standorts und die daraus abzuleitenden Entscheidungen sind nicht nur die Kennzahlen innerhalb dieses Standorts relevant, sondern insbesondere die logistischen Kanten und Knoten, die mit diesem Standort in Relation stehen. Diese Sichtweise ist für die vorliegende Arbeit mit hohem Fokus auf die ganzheitliche Produktionsnetzwerk Betrachtung essenziell. Daher müssen die Informationszusammenhänge vollständig und eindeutig abgebildet werden.

Die Methode des Systems besteht wiederum aus drei Hauptfunktionsgruppen. Die erste Hauptfunktionsgruppe bildet die „*Globale Produktionsprogrammplanung*“, diese wird in Abschnitt 6.2 detailliert beschrieben. Ziel dieser ist der Abgleich von Auftragsanforderungen und vorhandenen technischen Fähigkeiten der Standorte. Dieser erste Schritt dient somit der Definition des auftragsbezogenen Lösungsraums. Hierbei wird der einzelne Auftrag analysiert und die auftragspezifische Stück- sowie Prozessliste (BOM und BOP) abgeleitet. Die Ausleitung dieser Listen ist nötig, um eine Bewertung der technisch fähigen Standorte mittels der Anforderungs-Fähigkeits-Matrix vorzunehmen. Die folgende Hauptfunktionsgruppe „*Netzwerkbedarfsplanung*“ dient der Bestimmung des fähigkeitsbezogenen Kapazitätsplanes zur Generierung des Lösungsraums. Für jeden Prozessschritt erfolgt der Abgleich des Kapazitätsbedarfes und des Kapazitätsangebotes im jeweiligen Planungshorizont. Hierdurch wird das freie Kapazitätsangebot ermittelt. In weiteren Schritten erfolgt die Vorselektion geeigneter Standorte mit technischer Fähigkeit und kapazitiver Verfügbarkeit für jeden Prozessschritt. Die vollständige Darstellung dieser Hauptfunktionsgruppe erfolgt in Abschnitt 6.3. Die dritte und ab-

schließende Hauptfunktionsgruppe „*Netzwerkbedarfsallokation*“ dient der automatisierten Ermittlung der auftragsbezogenen kostenminimalen Netzwerkstruktur und des dazugehörigen Produktionsplans. Hierzu erfolgt zunächst die Erweiterung des zuvor aufgespannten Lösungsraums um die Dimension der Kosten. Basierend auf der auftragspezifischen Prozessliste erfolgt die Bildung von unterschiedlichen Netzwerkstrukturkonfigurationen. Zur Bildung und Bewertung dieser Netzwerkstrukturkonfigurationen wird ein hierfür entwickeltes heuristisches Optimierungsmodell angewandt. Eine Netzwerkstruktur beinhaltet i. d. R. mehrere Standorte, die unterschiedliche Stufen des Wertschöpfungsprozesses eines Produkts abbilden. Das Ergebnis der Methode ist eine kostenminimale auftragsbezogene Netzwerkstruktur. Dieses Ergebnis wird durch Ausführung von Konstruktions- und Verbesserungsheuristiken basierend auf genetischen Lösungsalgorithmen ermittelt.

5 Modellierung der Elemente zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

5.1 Übersicht

In diesem Kapitel wird die Frage nach der Gestaltung der Informationsstruktur für das System zur kurzfristigen Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken umfassend beantwortet. Dies bildet die Basis, um die im darauffolgenden Kapitel entwickelte Methode zur Produktionsplanung anwenden zu können.

Die Modellierung der Informationsstruktur auf Basis eines objektorientierten Modellierungsansatzes erfolgt in Abschnitt 5.2. Das Ziel ist hierbei die Grundlage einer automatisierten Auftragsabwicklung für kundenindividuelle Produkte zu schaffen. Hierzu gehört die Modellierung der standortübergreifenden Logistikvorgänge. Weiterhin ist die semantische Beschreibung des Produktionsnetzwerkes essenziell. In Abschnitt 5.3 werden die Elemente zur Bestimmung der Netzwerkkonfiguration entwickelt, um die Kapazitäten und Produktionsfähigkeiten der einzelnen Standorte beschreib- und vergleichbar zu machen. Dies ist zur Entwicklung und Bewertung von gesamtheitlichen Netzwerkkonfigurationen nötig. In Abschnitt 5.4 schließt das vorliegende Kapitel mit einem Fazit.

5.2 Modellierung der Informationsstruktur

Die Modellierung der Informationsstruktur bildet die Datengrundlage des Systems zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken. Hierzu wurde der nach dem heutigen Stand übliche objektorientierte Modellierungsansatz gewählt. Die Entwicklung von Datenmodellen ist notwendig, um einen weiteren Schritt in Richtung automatisierte datenbasierte Planungsentscheidungen zu gehen. Zur Übertragung dieses Aspekts auf die Produktionsnetzwerkebene sind unterschiedliche Datenmodelle und verschiedene Datentypen notwendig. Grundsätzlich sollte hierbei zwischen Stamm- und Bewegungsdaten unterschieden werden. Bei Stammdaten handelt es sich nach HILDEBRAND (2006) um Daten, auf deren Basis unterschiedliche Geschäftsprozesse ablaufen. Diese Daten weisen meist über einen längeren Zeithorizont eine hohe Gültigkeit auf. Bewegungsdaten hingegen

5 Modellierung der Elemente zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

kennzeichnen sich durch eine dynamische Veränderungsgeschwindigkeit. Sie haben eine kürzere Gültigkeit, innerhalb weniger Stunden, teilweise auch in kürzeren Intervallen, ändert sich die Datenlage umfassend. Beispiele hierfür sind u. a. verfügbare Kapazitäten, Produktionsstückzahlen, Durchlauf- und Lieferzeiten.

5.2.1 Objektorientierter Modellierungsansatz

Die Modellierung der Elemente kann durch unterschiedliche Ansätze erfolgen. Praktischen Nutzen bieten u. a. die Spezifizierungssprache der *Ereignisgesteuerten Prozesskette*, die jedoch überwiegend im deutschsprachigen Raum genutzt wird, sowie *Business Process Model and Notation*, die häufig in der Geschäftsprozessmodellierung Anwendung findet. In dieser Arbeit soll die Modellierung nach dem objektorientierten Ansatz erfolgen. Hierzu bietet sich insbesondere die nach ISO/IEC 19505-1:2012-04 genormte und weitverbreitete Modellierungssprache *Unified Modelling Language* (UML) an. Mittels dieser Modellierungssprache lassen sich Probleme mehrdimensional abstrahieren, neben statischen Strukturen können auch dynamische Abläufe sowie logische Abhängigkeiten beschrieben werden. In der Softwareentwicklung wird UML daher inzwischen als Standard-Modellierungssprache eingesetzt. Zur Beschreibung von Systemen besitzt die Modellierungssprache Diagrammtypen, die sich in Struktur- und Verhaltensdiagramme kategorisieren lassen.

Zur Entwicklung des Produktionsplanungssystems bedarf es der Modellbildung. Die Modellbildung verlangt im ersten Schritt eine Abstraktion der realen Welt. Nach KRCMAR (2010) liegt eine große Herausforderung in der Festlegung des Abstraktionsgrades. Die Abstraktion erfolgt mittels Graphen zur Strukturierung und Verbindung der relevanten Elemente. Die objektorientierte Modellierung, die in dieser Arbeit angewendet werden soll, unterscheidet dabei verschiedene Abstraktionsebenen. Generell werden nach BALZERT (2009) drei Ebenen unterschieden: (1) die Exemplar-, (2) die Typ- und (3) die Meta-Ebene. Innerhalb der Exemplar-Ebene werden spezifische Handlungen, Ereignisse und Sachverhalte in ihrer Beziehung und ihrem Ablauf beschrieben. Die Typ-Ebene hingegen stellt verallgemeinert Beziehungen zwischen Personen, Gegenständen oder geschaffenen Erzeugnissen dar. Diese abstrahierten Beziehungen werden klassifiziert und führen zu Beziehungstypen, z. B. „Auftrag besitzt technische Zeichnung“. Die Bildung einer „Klasse“ durch die Zusammenfassung ähnlicher Elemente aus der Typ-Ebene bildet die Meta-Ebene. (BALZERT 2009)

Der Bedarf der einzelnen Modelle leitet sich aus der in Abschnitt 4.2 erarbeiteten Anforderungsanalyse ab sowie aus der Beschreibung des Systemablaufs. Durch die Anwendung der unterschiedlich beschriebenen Abstraktionsebenen können die wesentlichen Merkmale des Systems erkannt, klassifiziert und geordnet werden. Unkritische Elemente hingegen können bewusst ausgeklammert werden. Zur Visualisierung des Gesamtsystems bietet sich das UML-Paketdiagramm an, da es durch die Clustering eine Orientierung über die einzelnen Systemkomponenten und -elemente verschafft.

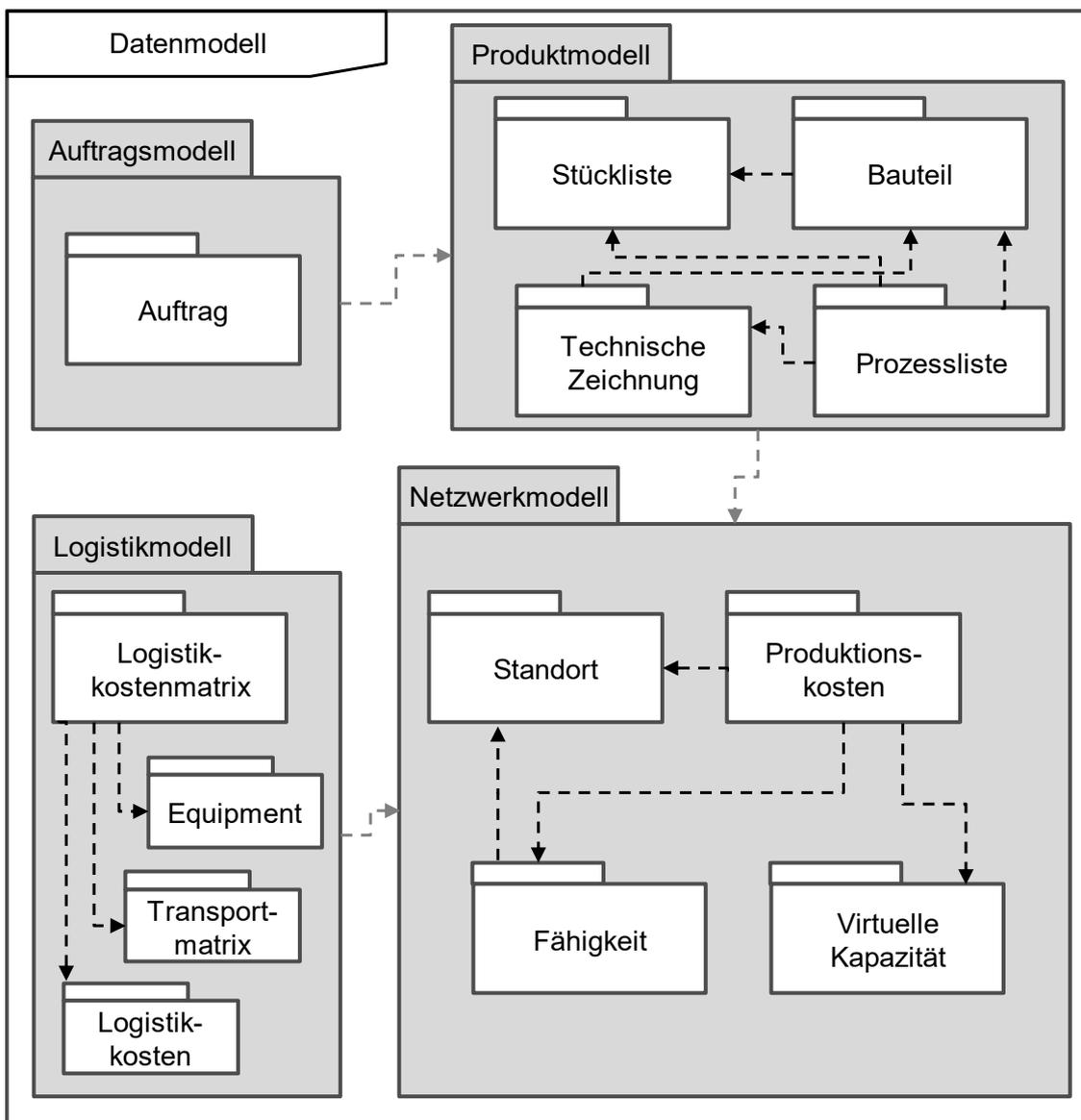


Abbildung 18: Übersicht des Datenmodells als Paketdiagramm zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

Die Produktspezifikationen, die Auftragsinformationen, die Logistikspezifikationen, die Standort-, Fähigkeits- und Kapazitätsinformationen lassen sich in vier

5 Modellierung der Elemente zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

Aufgabenbereiche clustern. Nach Analyse der einzelnen Verbindungen und Interaktionen der oben genannten Bereiche lassen sich diese auch zweckmäßig in abgeschlossene Teilsysteme gliedern. Diese Teilsysteme bilden jeweils ein einzelnes Paket.

Abbildung 18 zeigt das Datenmodell dieser Arbeit, bestehend aus vier Submodellen, die als Pakete dargestellt sind. Diese Submodelle sind in iterativen Expertengesprächen entstanden. Die vier einzelnen Pakete Auftrags-, Produkt-, Netzwerk- und Logistikmodell können für sich als Aufgabenbereich mit hoher interner Interaktion betrachtet werden. Die Pakete wiederum haben eine Beziehung zu mindestens einem weiteren Paket. Durch diese Abstraktion kann das System strukturiert und fassbar gemacht werden. Für ein vertieftes Verständnis der einzelnen Pakete bedarf es jedoch einer weiteren Abstraktionsebene. Klassendiagramme werden als Untergruppe von Strukturdiagrammen eingeordnet und bieten sich zur Visualisierung der Produktionsnetzwerke an. Das Klassendiagramm stellt dabei ein Meta-Modell dar. Dieses Meta-Modell veranschaulicht mittels Klassen die Gemeinsamkeiten von Objekten mit denselben Attributen, denselben Operationen und denselben Beziehungen. Hierdurch kann das System mit einer hohen Allgemeingültigkeit modelliert werden. Ferner können Systemanalytiker diese Modelle durch die semantische Beschreibung in Softwarepakete unterschiedlicher Programmiersprachen übersetzen.

Zum Verständnis der entwickelten Klassendiagramme bedarf es der Erläuterung des Grundvokabulars, der Notation und der unterschiedlichen Beziehungstypen. Die Abbildung 19 zeigt die UML Semantik des Klassendiagramms auf. Dargestellt sind vier Kästen, sogenannte Klassen. Jede Klasse besitzt in der ersten Zeile eine Klassenbezeichnung, z. B. *Klasse 1*. In der zweiten Zeile sind jeweils die Eigenschaften der Klasse durch Attribute beschrieben. Die Attribute sind spezifiziert durch den dazugehörigen Datentyp, z. B. *attribut 1: integer*. Im unteren Bereich befindet sich die Methodenliste, z. B. *operation ()*, diese beschreibt durch Operationen oder Funktionen, welche Konfigurationen durch die jeweilige Klasse durchgeführt werden können. Weiterhin bestehen zwischen den Klassen unterschiedliche Verbindungen, welche nach UML durch spezifische Beziehungstypen beschrieben werden. Diese Beziehungstypen von Klassen werden in der objektorientierten Modellierung grundsätzlich durch Assoziationen verbunden. In der vorliegenden Arbeit kommt auch eine Sonderform der Assoziationen vor, die sogenannte Aggregation. Diese Sonderform beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Ganzen und seinen Teilen. Häufig wird auch von der „is-part-of“, zu Deutsch „ist Teil von“- Beziehung gesprochen. Hierdurch kann modelliert werden, welche

Einzelobjekte in welcher Ausprägung strukturell zu einem Gesamtobjekt gehören. Im Gegensatz zur Assoziation (ungerichteter Graph) bildet die Aggregation einen gerichteten azyklischen Graphen.

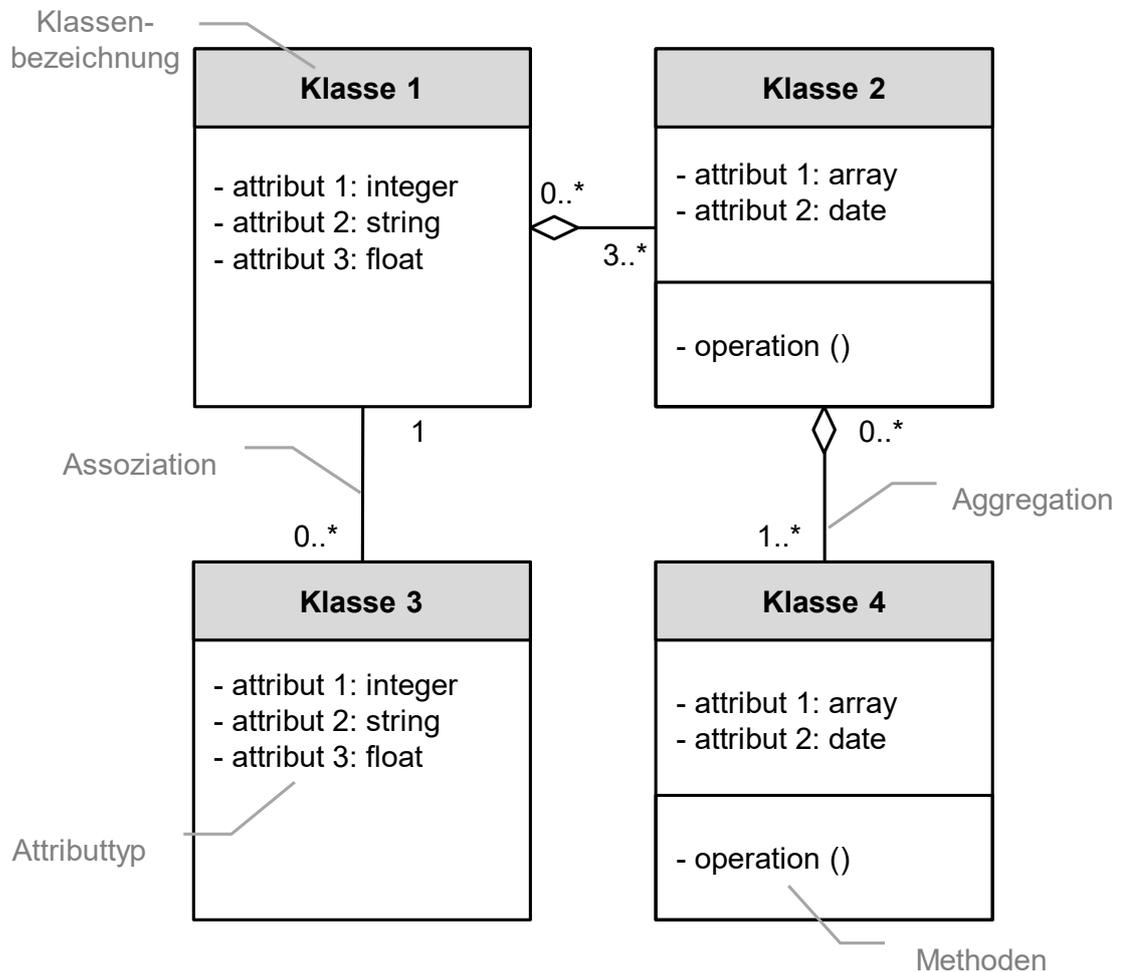


Abbildung 19: UML Semantik am Beispiel des Klassendiagramms

5.2.2 Modelle für Produktspezifikationen und Auftragsinformationen

Zur schnellen und automatisierten auftragsbezogenen Entwicklung von Netzwerkkonfigurationen bedarf es der strukturierten Beschreibung von Produkten. Alle Spezifikationen eines Produkts müssen dabei systematisch dargestellt werden. Um die Spezifikationen allgemeingültig und produktunabhängig durchzuführen, wird eine semantische Beschreibung der Produktmerkmale benötigt. Neben der Beschreibung des Produkts bzw. der Bauteile des Produkts wird eine Modellierung

5 Modellierung der Elemente zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

des Auftrags benötigt. Der Auftrag muss ebenfalls allgemeingültig und international verständlich sein. Daher sollen in diesem Abschnitt die zwei Pakete „*Produktmodell*“ und „*Auftragsmodell*“ aus Abbildung 20 vertiefend beleuchtet werden.

5.2.2.1 Produktmodell

Das Produktmodell besteht, wie dem Ausschnitt von Abbildung 20 zu entnehmen ist, aus vier Klassen: *Stückliste*, *Bauteil*, *Prozessliste* und *technische Zeichnung*. Das Gesamtobjekt *Stückliste* speist Informationen aus den zwei Teilen *Prozessliste* und *Bauteil*. Die Klassen *Bauteil* und *Stückliste* sowie *Prozessliste* und *Stückliste* sind durch den Beziehungstypen der Aggregation beschrieben. Die Klasse *Bauteil* beispielsweise ist durch neun Attribute genau spezifiziert. Unter anderem sind die Abmessungen, das Gewicht, das Material und die Materialkosten des Bauteils als Attribut festgelegt. Jedes Attribut wiederum wurde mit einem passenden Datentyp versehen. Die Abmessungen des Bauteils wurden beispielsweise mit dem Typ *integer* definiert. Das Attribut *materialkostenBAUTEIL* hingegen wurde mit dem Typ *float* definiert, um die Kosten möglichst genau und zweckmäßig abzubilden. Neben der Klasse *Bauteil* ist die Klasse *Prozessliste* Teil der *Stückliste*. Diese Klasse wird durch das Attribut *abfolgePROZESSE* beschrieben.

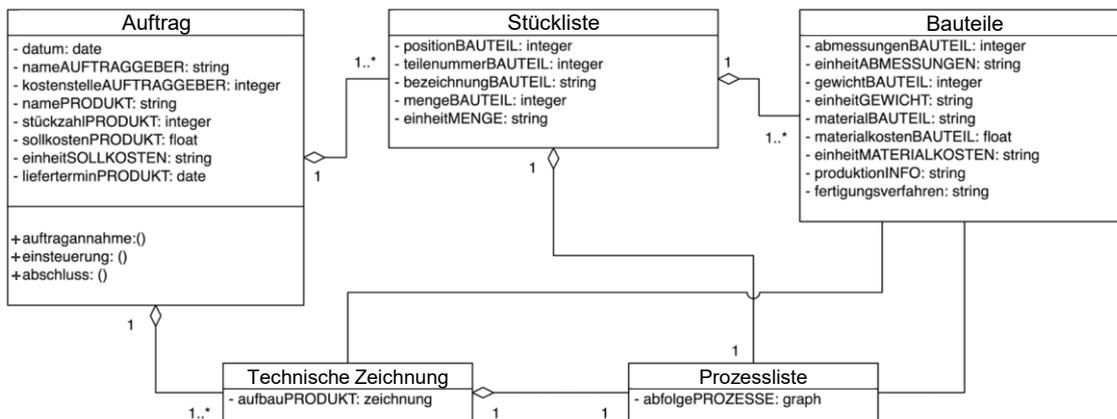


Abbildung 20: Beschreibung des Auftrags- und Produktmodell mittels UML-Klassendiagramm

Weiterhin gehört zum Produktmodell die Klasse *Technische Zeichnung*. Diese Klasse ist elementar, um eine genaue Beschreibung der Zusammensetzung des Produkts zu erhalten und sie steht in Beziehung mit der Klasse *Bauteil* sowie mit der Klasse *Prozessliste*.

5.2.2.2 Auftragsmodell

Das Auftragsmodell besteht aus einer umfassenden Klasse *Auftrag* und steht in zweifacher Beziehung zum Produktmodell, wie der Abbildung 20 zu entnehmen ist. Die Klasse *Auftrag* bezieht zum einen Informationen aus der Klasse *Stückliste* und zum anderen aus der Klasse *Technische Zeichnung*. Dabei sind die Beziehungen durch den Typen Aggregation definiert. Ein Auftrag kann dabei mehrere Stücklisten besitzen. Dieser Logik folgend kann ein Auftrag ebenso mehrere technische Zeichnungen besitzen. Die Klasse *Auftrag* wird durch acht Attribute spezifiziert. Unter anderem werden der Name des Auftraggebers, die Bezeichnung, die Stückzahl, die Kosten und der Liefertermin des Produkts als Attribute beschrieben. Neben den Attributen besitzt die Klasse *Auftrag* eine Methodenliste mit drei Operationen *auftragannahme()*, *einststeuerung()* und *abschluss()*. Diese Operationen beschreiben die Entscheidungen, die durch das Auftragsmodell ausgelöst werden können. So kann beispielsweise die Entscheidung über die Annahme eines Auftrags innerhalb des Auftragsmodells bewertet und durchgeführt werden.

5.2.3 Semantische Beschreibung des Netzwerkmodells

Zur Entwicklung automatisierter Entscheidungsvorlagen für die Produktionsplanung von auftragsbezogenen Produktionsnetzwerken bedarf es zunächst der Modellierung einer Informationsgrundlage. Dieser Abschnitt soll dazu dienen, das weiter oben diskutierte Netzwerkmodell im Paketdiagramm weiter zu spezifizieren. Das Netzwerkmodell besteht aus den Klassen *Standort*, *Produktionskosten*, *Virtuelle Kapazität* und *Fähigkeit*, diese sind in der Abbildung 21 in Form des UML-Klassendiagramms modelliert. Die umfangreiche Klasse *Standort* wird durch viele Attribute spezifiziert. Neben der Beschreibung der geografischen Lage wird jeder Standort mit einer dreistelligen ID gekennzeichnet. Die erste Stelle bezeichnet den Kontinent, die zweite das Land und die dritte identifiziert den Ort. Hierdurch kann jeder Produktionsstandort innerhalb des Netzwerks eindeutig dargestellt werden. Weitere Attribute beschreiben u. a. die Gesamtproduktionszeit sowie die Konfigurationen, die an einem Standort möglich sind. Die Klasse *Produktionskosten* greift auf Matrizen zu internationalen Lohn- und Maschinenkostensätzen zurück. Eine Unterscheidung der Maschinenkostensätze je nach Alter oder Typ der Maschine wurde nicht angewandt, stattdessen wurden durchschnittliche Lohn- und Maschinenkostensätze je Region genutzt. Die Auslastung der einzelnen Standorte wird mittels einer eigenen Klasse definiert. Die virtuelle Kapazität der

5 Modellierung der Elemente zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

einzelnen Standorte wird durch zwei Attribute beschrieben und besitzt die Operation *verfügbarkeitKAPA*. Hierdurch kann der aktuelle Auslastungsgrad der einzelnen Bereiche quantifiziert und die zur Verfügung stehende Kapazität berechnet werden. Im Laufe der Entwicklung der Klasse *Fähigkeit* wurden zwei weitere Klassen hinzugefügt, um die Spezifikation dieser Klasse möglichst produktunabhängig und generisch zu gestalten. Zur Beschreibung der Fähigkeiten-ID wurde die Norm DIN 8580 zur Definition und Einteilung der Fertigungsverfahren angewandt sowie das technische Regelwerk VDI-RICHTLINIE 2860 zur Montage- und Handhabungstechnik. Ein vierstelliger Array beschreibt die Fähigkeit eindeutig. Der erste integer Wert beschreibt die Hauptgruppe der Norm. Die zweite Ziffer steht für die Gruppe und der dritte Wert beschreibt die Untergruppe. Die Rekonfigurationsmöglichkeit wird durch die vierte Ziffer der Fähigkeit-ID definiert.

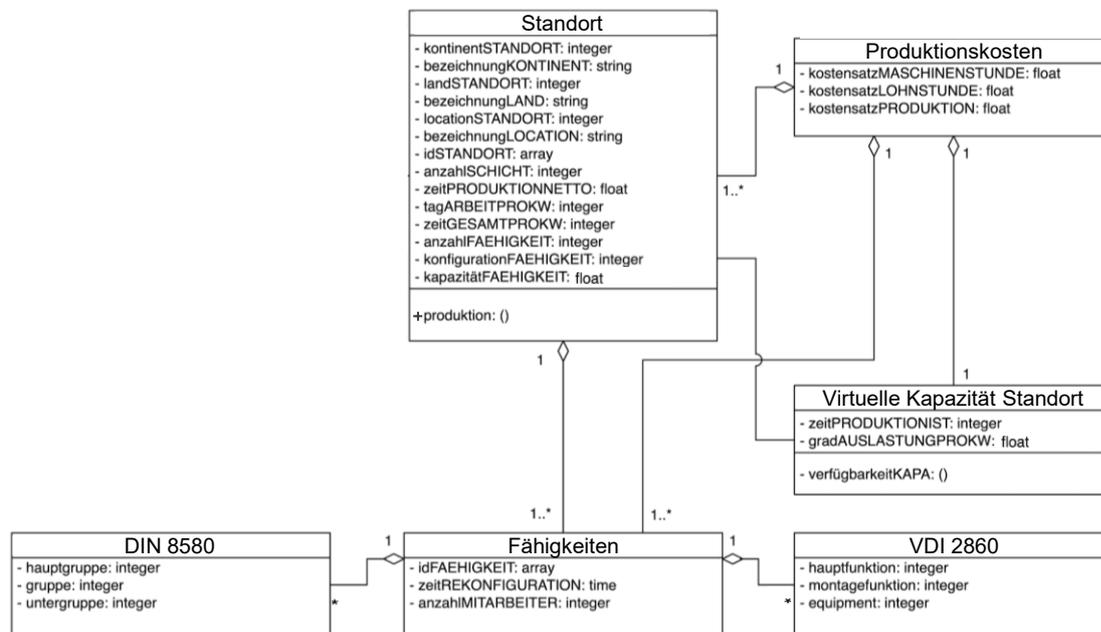


Abbildung 21: Beschreibung des Netzwerkmodells mittels UML-Klassendiagramm

Die gezielte Anwendung von Normen und technischen Richtlinien zur Modellierung des Netzwerks stellt eine hohe Allgemeingültigkeit des Systems sicher.

5.2.4 Modell für standortübergreifende Logistik

Dieser Abschnitt dient der Formalisierung der logistischen Beziehungen in eine geeignete Informationsstruktur. Dies ist für die vorliegende Arbeit elementar, da erst durch die Berücksichtigung der standortübergreifenden Logistik zweckmäßige

Entscheidungen zur Netzwerkkonfiguration getroffen werden können. Zur ganzheitlichen Betrachtung des Produktionsnetzwerkes muss die Modellierung der standortübergreifenden Logistik erfolgen. Das hierdurch entstehende Logistikmodell dient der Beschreibung der Lieferbeziehungen, der Transportmittel und der in diesem Zusammenhang anfallenden Kosten.

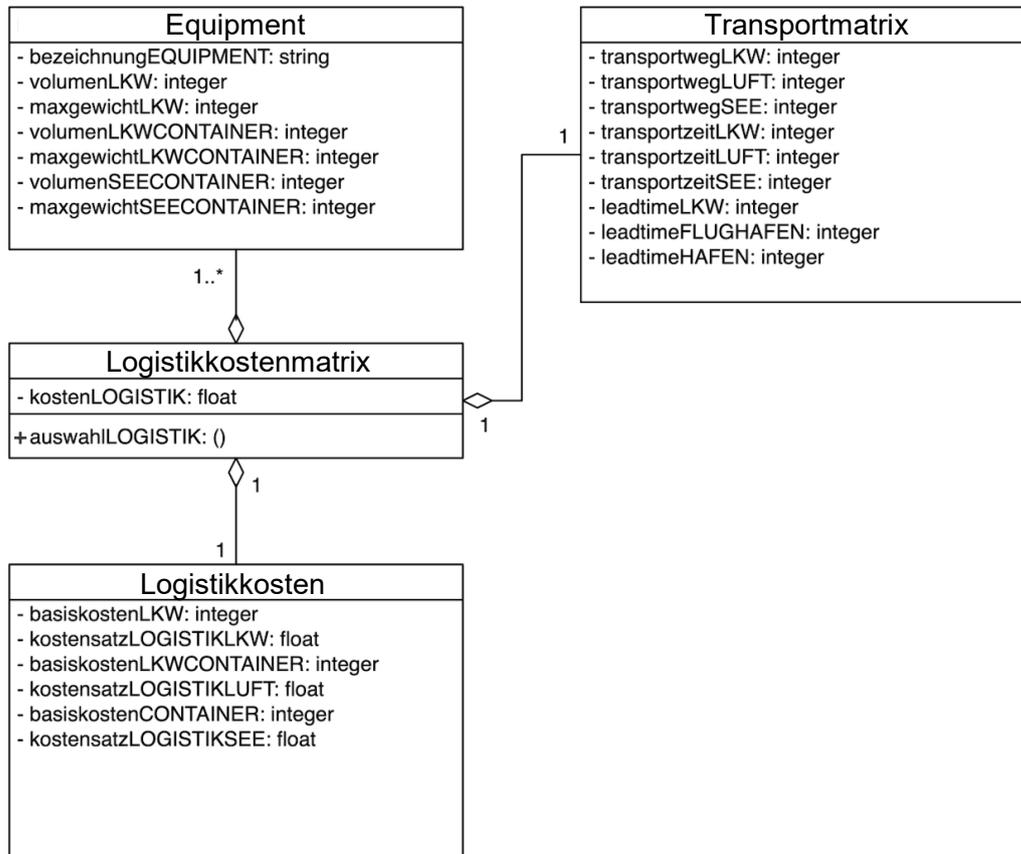


Abbildung 22: Beschreibung des Logistikmodells mittels UML-Klassendiagramm

Die Abbildung 22 stellt das Logistikmodell im UML-Klassendiagramm dar. Das Modell besteht aus vier Klassen: *Logistikkostenmatrix*, *Equipment*, *Transportmatrix* und *Logistikkosten*. Die Klasse *Logistikkostenmatrix* besteht aus dem Attribut *kostenLogistik* und der Operation *auswahlLogistik*. Diese Klasse speist die Informationen wiederum aus den folgenden drei Klassen. Die Klasse *Logistikkosten* besitzt für jede Transportart (Luft, See, Straße) unterschiedliche Kostensätze. Für die genaue Bewertung der Kosten werden neben den Kostensätzen auch Basiskosten für die Nutzung der Transportart verwendet. Die Klasse *Equipment* definiert die einzelnen Transportarten bzw. die Ladungsträger. Dabei erfolgt die Spezifizierung durch die jeweiligen Attribute Volumen und Maximalgewicht. Das Attribut *bezeichnungEQUIPMENT* innerhalb der Klasse dient dazu, Verwechslungen

5 Modellierung der Elemente zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

durch unstrukturierte Namensgebung zu vermeiden. Mit der Klasse *Transportmatrix* werden Transportwege und -zeiten für die unterschiedlichen Transportarten zwischen zwei Produktionsstandorten spezifiziert. Zur exakten Planung wird neben der reinen Transportzeit auch die logistische Durchlaufzeit berücksichtigt. Diese logistische Durchlaufzeit bezieht die Liege- und Umschlagszeit an Häfen mit ein. Durch die Operation *auswahlLogistik* innerhalb der Klasse *Logistikkostenmatrix* können unterschiedliche Konfigurationen erprobt und bewertet werden.

5.3 Elemente zur Bestimmung von Netzwerkkonfigurationen

5.3.1 Netzwerkbildung

Zur Bildung von auftragsbezogenen Netzwerkstrukturen wird ein Systemmodell benötigt. Dieses dient neben den Informationsmodellen zur integrierten Beschreibung der Dimensionen Produkt, Produktionsnetzwerk sowie der Logistikbeziehungen. Um die Wandlungsfähigkeit des Produktionsnetzwerkes in Bezug auf kundenindividuelle Produkte im Systemmodell abzubilden, werden die Produktionssystemebenen Netzwerk und Standort um rekonfigurierbare Module erweitert. Die rekonfigurierbaren Module weisen eine gewisse Mobilität auf, jedoch befinden sich die Module stets an einem einzelnen Produktionsstandort. Zur Sicherstellung der Wandlungsfähigkeit darf die Logistik nicht nachträglich angepasst werden, sondern muss integraler Bestandteil des Systemmodells sein. Nur durch die integrierte Betrachtung können Netzwerkkonfigurationen gebildet werden, die zum einen kosteneffizient sind und zum anderen geringe Durchlaufzeiten vorweisen.

Das Systemmodell soll eine Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Leistungseinheiten in Fertigungsprozessfolgen aufweisen (WILDEBRAND 2009). Zur Verständlichkeit des Modells soll ein graphenbasierter Ansatz gewählt werden. Nach DOMSCHKE ET AL. (2015) bieten sich für die kombinierte Darstellung von Produktions- und Logistikkosten gerichtete Graphen an. Beispielsweise trat der Einsatz von *Petri-Netzen*, eine Darstellungsform der gerichteten Graphen aus den 1960er Jahren, in den letzten Jahren im Zusammenhang mit rekonfigurierbaren Fertigungssystemen gehäuft auf (TIGANE ET AL. 2017, HEES 2017). Dabei liegt historisch betrachtet die Stärke der Petri-Netze in der Darstellung von Systemzuständen und Schaltvorgängen. Für die Problemstellung in diesem Abschnitt, der Bildung von Produktionsnetzwerkstrukturen mit geringer Durchlaufzeit und geringen Kosten, eignet sich die klassische Form der Petri-Netze nur bedingt. Zweckmäßiger ist

5.3 Elemente zur Bestimmung von Netzwerkkonfigurationen

hingegen der erprobte Ansatz des *Prozessvariantenplanes* nach KÄSCHEL ET AL. (2014). Der Prozessvariantenplan Ansatz, ebenfalls ein Modell, das sich gerichteter Graphen bedient, bildet eine gute Basis zur Lösung des vorliegenden Problems. Daher soll der Ansatz in dieser Arbeit, erweitert um den Produktstatus und der Kanten für die Logistikkosten, Anwendung finden (siehe Abbildung 23).

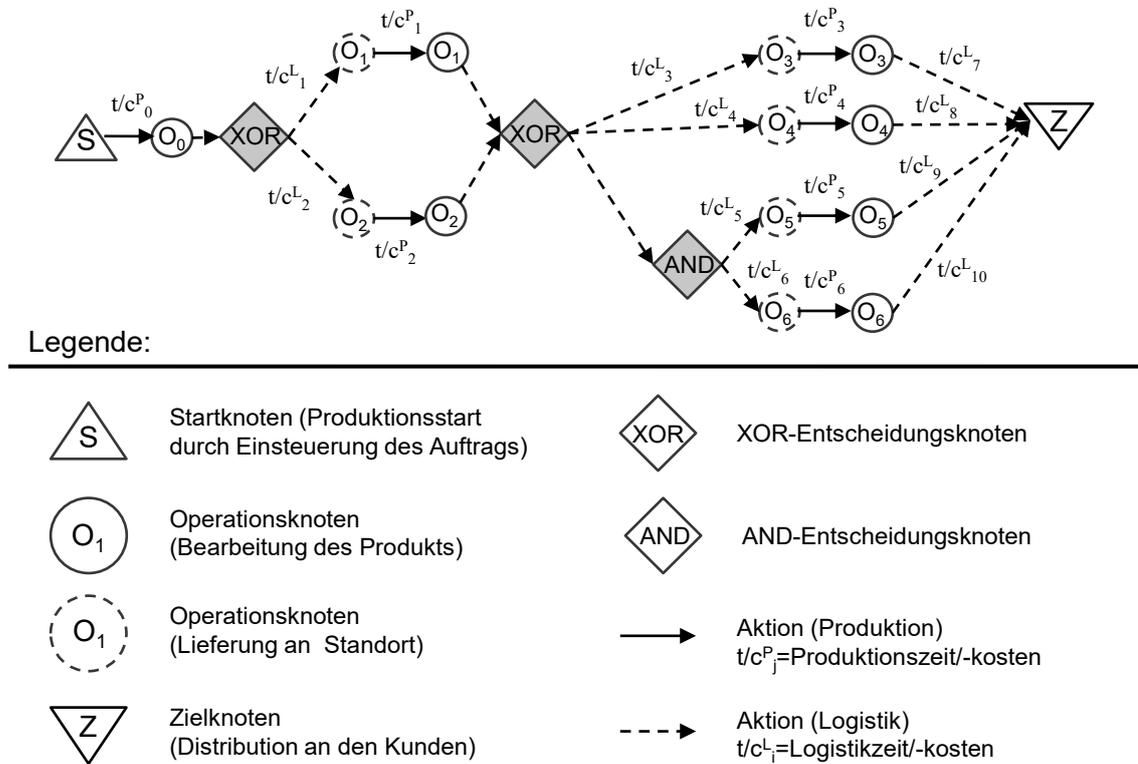


Abbildung 23: Erweiterter Ansatz des Prozessvariantenplanes (in Anlehnung an KÄSCHEL ET AL. 2014)

Der erweiterte Prozessvariantenplan Ansatz, dargestellt in Abbildung 23, besteht aus den folgenden fünf Elementen:

- (1) Der Startknoten beschreibt den Einstiegspunkt und stößt den Fertigungsprozess an. Per Definition besitzt der Startknoten keinen Vorgänger.
- (2) Der Zielknoten bildet das Gegenelement zum Startknoten und hat keinen Nachfolger, somit kennzeichnet es den Abschluss des Fertigungsprozesses.
- (3) Die Operationsknoten beschreiben die Wertschöpfungsschritte an einem Produkt. Operationsknoten werden unterschieden in Prozessschritte, die den Produktstatus direkt ändern, und Aktivitäten wie die Anlieferung des Produkts.

5 Modellierung der Elemente zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

(4) Die Entscheidungsknoten dienen der Entscheidungsfindung bezüglich der Netzwerkconfiguration. Es werden Selektionsentscheidungen XOR- sowie Reihenfolgeentscheidungen AND-Operatoren unterschieden.

(5) Die Kanten beschreiben Logistik- oder Produktionsaktivitäten, die durch die Kanten gewichtet werden.

5.3.2 Auswahl und Struktur des Optimierungsalgorithmus

In den vorherigen Abschnitten wurden die Informationsmodelle und die Bildung von Netzwerkstrukturen intensiv beschrieben. Weiterhin wurde die Konzeption des Production-as-a-Service-Ansatzes vorgestellt. Dieser Ansatz soll zur Handhabung von Unter- und Überkapazitäten innerhalb eines Unternehmensverbundes genutzt werden und fußt auf wandlungsfähigen Netzwerkstrukturen. Insbesondere für kundenindividuelle Produkte kann die Produktionsplanung von auftragsbezogenen Netzwerkconfigurationen Auslastungs- und Kostenvorteile bringen. Um diese Netzwerkconfigurationen automatisiert zu generieren, zu bewerten und anschließend eine optimale Lösung zu finden, wird ein Optimierungsalgorithmus benötigt.

Wie bereits in Abschnitt 2.4.3 beschrieben, existieren unterschiedliche Optimierungsalgorithmen, die zur Lösung von Planungsproblemen beitragen können. Für das kombinatorische Optimierungsproblem in dieser Arbeit eignen sich insbesondere Metastrategie-Heuristiken. Im Speziellen soll ein weiterentwickelter genetischer Algorithmus zur Lösung des Problems angewandt werden.

5.3.2.1 Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)

Der GA bildet eine der wichtigsten populationsbasierten Metastrategie-Heuristiken. Seit 2005 werden vermehrt Metastrategie-Heuristiken in der angewandten Forschung eingesetzt, um Planungsprobleme im Zusammenhang mit veränderbaren Produktionssystemen zu lösen. Dies geht aus der Veröffentlichung von RENZI ET AL. (2014) hervor. Den dabei größten Anteil mit 61 % bilden Lösungsverfahren, die auf dem GA basieren.

Neben den beschriebenen Vorteilen im Bereich des ursprünglichen GA in Abschnitt 2.4.3 und den nach KRAMER (2017) dargestellten guten Ergebnissen dieser Algorithmen für die multikriterielle Optimierung weisen diese aber auch Nachteile

5.3 Elemente zur Bestimmung von Netzwerkkonfigurationen

auf. Bei der einfachen Optimierung, beispielsweise nach der Zielgröße Herstellkosten, begibt sich der Algorithmus auf die Suche nach dem globalen Minimum. Bei der vorliegenden multikriteriellen Optimierungsaufgabe handelt es sich um ein Planungsproblem, das mehrere Zielgrößen berücksichtigen soll. Die Suche mithilfe eines Lösungsverfahrens, das zur Identifikation vom einzelnen globalen Minimum oder Maximum ausgelegt ist, scheint daher nicht zielführend. Nach GOLDBERGS (1989) Grundidee müssen vielmehr nicht-dominierende sogenannte Pareto-Optimale Lösungen gefunden werden. Auf Basis dieser Grundidee entwickelten SRINIVAS & DEB (1994) den non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA). Diese Erweiterung des Algorithmus hebt die Nachteile der Suche nach einem einzelnen globalen Minimum/Maximum des ursprünglichen GA auf. Dennoch wurde neben der langen Laufzeit der Umgang mit komplexen Planungsproblemen durch die Sortierung, der mögliche Verlust von guten Eltern-Populationen sowie eine fehlerhafte Spezifizierung des Verteilungsparameters auch beim NSGA kritisiert. Intensive Forschung im Bereich Neural Networks und Computational Intelligence führten zur nächsten Weiterentwicklungsstufe NSGA-II durch DEB ET AL. (2002). Der erweiterte NSGA-II hebt die oben beschriebenen Nachteile des NSGA auf und fand inzwischen auch mehrfach erfolgreich Anwendung in der Produktionsplanung (GOYAL ET AL. 2012, MOSLEMIPOUR ET AL. 2012, BENSMAINE ET AL. 2013).

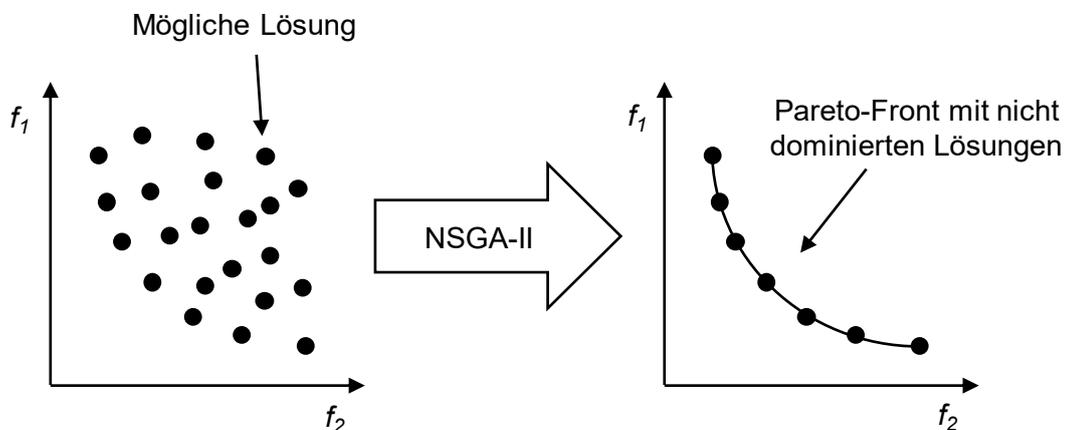


Abbildung 24: Beispielhafte Pareto-Front des NSGA-II (in Anlehnung an GOYAL ET AL. 2012)

Abbildung 24 veranschaulicht beispielhaft auf der linken Hälfte den gesamten Lösungsraum und auf der rechten Seite die Pareto-Front mit indifferenten, d. h. nicht-dominierenden, Lösungen. Dabei stellen f_1 und f_2 zwei unterschiedliche exemplarische Zielgrößen dar. Insbesondere die Fähigkeit der Identifikation von Pareto-

5 Modellierung der Elemente zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

Optimalen Lösungen sowie der Umgang mit komplexen kombinatorischen Planungsproblemen und die hohe Qualität der Lösungen sind ausschlaggebend für den Einsatz des NSGA-II in der vorliegenden Arbeit.

5.3.2.2 Genetische Repräsentation

Der NSGA-II bildet evolutionäre Prozesse auf der genetischen Ebene ab. Hierzu werden Genotypen und Phänotypen als unterschiedliche Repräsentationsformen von Individuen eingesetzt. Der Genotyp stellt die genetische Repräsentation, wie das Erbgut lebender Organismen, in kodierter Form eines Chromosoms dar. Die Phänotyp-Repräsentation hingegen bildet eine problemspezifische Lösung ab. Vertiefende Erläuterungen der genetischen Algorithmen sind u.a. bei SIVANANDAM & DEEPA (2008), KRAMER (2017) zu finden. In dieser Arbeit stellt eine Produktionsnetzwerkstruktur eine ausformulierte Lösung und damit ein Individuum einer Phänotyp-Repräsentation dar. Die Kodierung bezeichnet die Struktur zur Erzeugung eines Genotyps aus einem Phänotyp. Die Genotypen bilden somit den Suchraum und die Phänotypen hingegen den problemspezifischen Lösungsraum. Die Form der Kodierung einer Lösung kann u. a. mittels binärer, reeller oder natürlicher Vektoren als Zeichenkette beschrieben werden. Im konkreten Fall erfolgt die Kodierung der Zeichenkette durch Auftrag und Ressourcen in Anlehnung an TUNG SUN CHAN & CHUNG (2007). Jedes Chromosom besitzt ein variables Set an Genen in einer bestimmten Reihenfolge (siehe Abbildung 25).

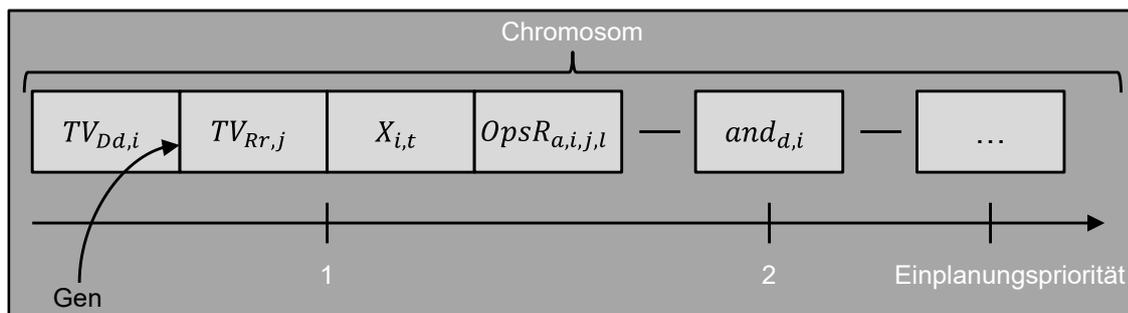


Abbildung 25: Modell der genetischen Repräsentation zur Auftragsallokation von Produktionsnetzwerkkonfigurationen (in Anlehnung an BE ISA ET AL. 2018)

Die Ausprägung eines Gens repräsentiert beispielsweise die Auftragsallokation in Form von Technologievektoren ($TV_{Dd,i}$ und $TV_{Rr,j}$), Kapazitäten $X_{i,t}$ sowie für die Bildung von Teillosen bzw. der Anwendung des Auftragsplitting ($OpsR_{a,i,j,l}$) und dem Rang bzw. der Einplanungspriorität (BE ISA ET AL. 2018).

Die Generierung der Start-Population bildet den ersten Schritt des genetischen Algorithmus. Ziel der ersten Generierung ist zunächst die Schaffung eines vielversprechenden Suchraumes und folglich eines möglichst großen sowie diversifizierten Genpools. Der große Suchraum ist nötig, um nicht vor dem Beginn des iterativen Prozesses schon mögliche gute Lösungen auszuschließen. Bezogen auf die vorliegende Arbeit werden zum einen innerhalb des Standorts die verfügbaren Fähigkeiten bzw. Technologien innerhalb des Suchraumes abgebildet. Auf Ebene des Netzwerks beschreibt der Genpool hingegen die Generierung von unterschiedlichen Strukturen, die Aufträge und Standorte in einzelnen Chromosomen abbilden.

Im Gebrauch der genetischen Algorithmen repräsentiert ein Individuum eine Lösung, in der vorliegenden Problemstellung bildet ein Individuum eine konkrete Netzwerkkonfiguration ab. Die Population hingegen beschreibt eine Gruppe von Individuen und damit mehrere Netzwerkkonfigurationen.

5.3.2.3 Fitnessfunktion

Ziel der Fitnessfunktion ist die Identifikation von Lösungen mit einer hohen Fitness. Die Fitnessfunktion beschreibt innerhalb der genetischen Algorithmen die Zielfunktion. Nach der zufälligen Generierung der ersten Population werden die einzelnen Fitnesswerte der Individuen berechnet, bis ein Abbruchkriterium erfüllt wird. Anschließend erfolgt eine neue Iteration und die Bildung einer neuen Population, d. h. neue Lösungen werden gebildet. Die Bildung dieser neuen Generation wird durch unterschiedliche Operationen realisiert, welche im nächsten Abschnitt kurz erläutert werden. Nachdem die Entwicklung der neuen Generation abgeschlossen ist, wird erneut für jede Lösung der Fitnesswert berechnet. Gegebenenfalls wird beim Erreichen eines Abbruchkriteriums erneut eine Iteration durchgeführt. Ein typisches Abbruchkriterium ist häufig die zuvor bestimmte Zeit für einen Durchlauf.

5.3.2.4 Genetische Operatoren

Die genetischen Operatoren dienen dazu, nach jeder Bewertung der Individuen und Erfüllung eines Abbruchkriteriums eine neue verbesserte Population zu entwickeln. Die Verbesserung der Population erfolgt durch die Veränderung der Chromosomen. Im Abschnitt 3.2.4 wurden die relevanten Operatoren bereits kurz vorgestellt. In diesem Abschnitt soll der spezifische und für die vorliegende produktionsplanerische Problemstellung relevante Sortierungsprozess des NSGA-II erläutert werden.

5 Modellierung der Elemente zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

Der Operator Substitution generiert nach dem ersten Durchlauf auf Basis der Eltern- und Nachkommen-Population eine neue Eltern-Population. Zur Überführung der fittesten Individuen und zur Sicherstellung der Prüfung des gesamten Suchraumes durchläuft der NSGA-II ein zweistufiges Auswahlverfahren. Im ersten Schritt erfolgt das sogenannte non-dominated-sorting und im zweiten Schritt das crowding-distance-sorting (siehe Abbildung 26).

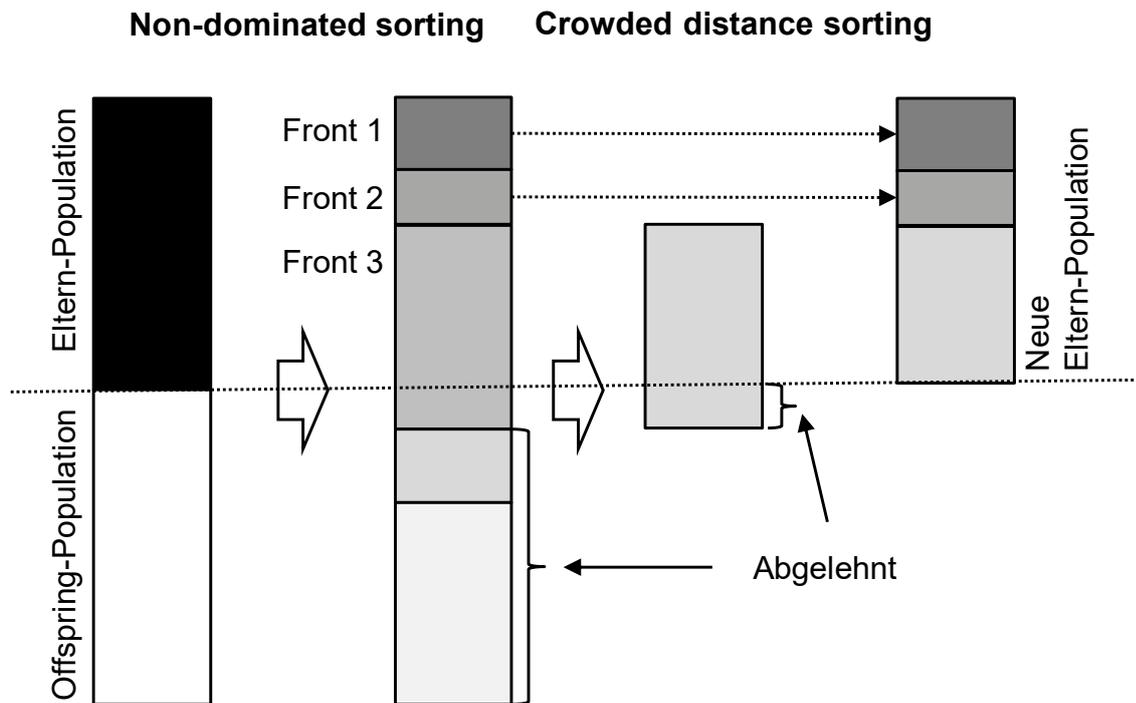


Abbildung 26: Sortierprozess des NSGA-II (in Anlehnung an DEB ET AL. 2002)

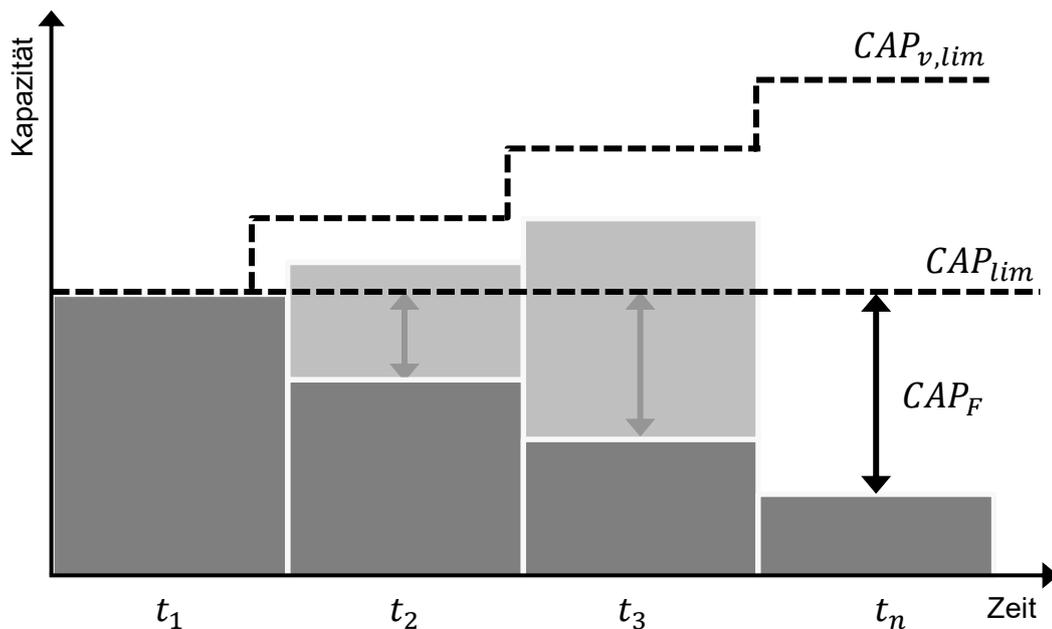
Das non-dominated-sorting dient der Klassifizierung und Bildung von Lösungen zu Pareto-Fronten. Dieser erste Sortierprozess gibt die Anzahl der Individuen an, die die anderen Lösungen dominieren. Eine Lösung wird als dominant bezeichnet, wenn mindestens ein Zielwert besser ausgeprägt ist als der andere (siehe Abbildung 24). Es werden Pareto-Fronten mit unterschiedlichen Rängen (Front 1, Front 2, Front n) überführt, beginnend mit der niedrigsten Front 1. Die Fronten werden so lange überführt, bis die Eltern-Populationsgröße erreicht ist. Alle weiteren Lösungen werden abgelehnt.

Das crowding-distance-sorting im zweiten Schritt dient wiederum der Auswahl der besten Individuen. Hierzu werden die zuletzt hinzugeführten Lösungen mittels der crowding-distance, dem Abstandsmaß der Individuen, mit einem spezifischen Fitnesswert bewertet. Die Sortierung und Ablehnung von Individuen erfolgt nach der

niedrigsten crowding-distance, so lange bis die gewünschte Populationsgröße erreicht wird.

5.3.3 Virtuelle Kapazitätsgrenze

Das Konzept der *virtuellen Kapazitätsgrenze* wurde innerhalb des InnoCyFer Forschungsprojekts entwickelt (siehe Abbildung 27). Um dem Wunsch nach kurzen Lieferzeiten von kundenindividuellen Produkten gerecht zu werden und dennoch valide Liefertermine, die die bisherige Auslastung des Standorts berücksichtigen, zu bestimmen, bedurfte es neuer Ansätze. Standardlieferzeiten wie beispielweise innerhalb von 14 Tagen geben dem Kunden zwar Planungssicherheit, jedoch birgt es häufig die Gefahr, insbesondere bei kundenindividuellen Produkten, dass viele Umplanungen erfolgen und häufig Verzögerungen bei anderen Aufträgen resultieren.



Legende:

CAP_{lim} :	Kapazitätsgrenze	■ Anfragen
$CAP_{v,lim}$:	Virtuelle Kapazitätsgrenze	■ Bestellungen
CAP_F :	Freies Kapazitätsangebot	

Abbildung 27: Konzept der virtuellen Kapazitätsgrenze (nach ATUG ET AL. 2016)

Die Produktionsplanung von kundenindividuellen Aufträgen mit bisherigen Priorisierungsregeln ist schwierig, insbesondere wenn der Anteil an kundenindividuellen

5 Modellierung der Elemente zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

ellen Produkten stark volatil ist. Die Idee der virtuellen Kapazitätsgrenze soll Abhilfe schaffen und berücksichtigt die aktuelle Situation des Produktionssystems bzw. des Standorts. Die Abbildung 27 zeigt den Kapazitätsbedarf, welcher der Prozesszeit von verschiedenen Aufträgen entspricht. Aufträge werden unterschieden in Bestellungen, d. h. Produktionsaufträge, die fest eingeplant sind und Anfragen von Kunden. Anders als die Planung auf unbegrenzte Kapazität erfolgt der Einsatz der virtuellen Kapazitätsgrenze unter Berücksichtigung von Vergangenheitsdaten. Es werden Wahrscheinlichkeiten berechnet, um die Anzahl der durchgeführten und der stornierten Aufträge zu ermitteln.

Die Ermittlung der Bestellwahrscheinlichkeit erfolgt aus der Anzahl der tatsächlichen Bestellungen und der Anfragen aus der vorherigen Periode.

$$P(A)_i = \frac{ON}{RN} \quad (5-1)$$

mit: $P(A)_i$ Bestellwahrscheinlichkeit Planungsperiode i
 ON Anzahl Bestellungen
 RN Anzahl Anfrage

Mittels der damit errechneten Bestellwahrscheinlichkeit über die Planungsperioden i kann eine durchschnittliche Bestellwahrscheinlichkeit ermittelt werden.

$$\overline{P(A)} = \frac{\sum_{i=1}^t P(A)_i}{t} \quad (5-2)$$

mit: $\overline{P(A)}$ Durchschnittliche Bestellwahrscheinlichkeit

Zur Berechnung des freien Kapazitätsangebots wird der Kapazitätsbedarf sowie das Kapazitätsangebot benötigt.

$$CAP_F = \left(1 - \frac{CD}{CS}\right) * CS \quad (5-3)$$

mit:	CAP_F	Freies Kapazitätsangebot
	CD	Kapazitätsbedarf
	CS	Kapazitätsangebot

Mit den Eingangswerten des Kapazitätsangebots, der durchschnittlichen Bestellwahrscheinlichkeit sowie dem freien Kapazitätsangebot kann die virtuelle Kapazitätsgrenze ermittelt werden, siehe Formel 5-4.

$$CAP_{v,lim} = CS + \overline{P(A)} * CAP_F \quad (5-4)$$

mit:	$CAP_{v,lim}$	Virtuelle Kapazitätsgrenze
------	---------------	----------------------------

Auf Basis dieser Daten findet eine bewusste Überbuchung der Ressourcen statt. Der Anteil der Überbuchung entspricht dabei dem Kapazitätsanteil, der der Wahrscheinlichkeit nach in den nächsten Perioden entfallen wird. Aus diesem zeitdiskreten Ansatz erfolgt die Treppenstruktur der virtuellen Kapazitätsgrenze in Abbildung 27.

Der Ansatz der virtuellen Kapazitätsgrenze soll in der vorliegenden Arbeit zur Planung des Kapazitätsangebots im Produktionsnetzwerk angewendet werden. Dieser Ansatz dient der automatisierten Produktionsplanung von global verteilten Kapazitäten. Parallel werden innerhalb einer kurzen Planungszeit sehr viele Anfragen an unterschiedliche Ressourcen gestellt. Auf der anderen Seite werden viele dieser Kapazitätsanfragen nach Bewertung und Entscheidung für eine bestimmte Produktionsnetzwerkkonfiguration wieder zurückgezogen.

5.3.4 Dynamische Preisbildungsverfahren

In Kapitel 4 wurde das Interaktionsnetz des Produktionsplanungsservices für das intraorganisationale Produktionsnetzwerk in dieser Arbeit dargelegt. Der Produktionsplanungsservice agiert dabei wie eine Plattform und bringt Auftraggeber (Entwicklungsabteilung, Endabnehmer von kundenindividuellen Produkten) und Auftragnehmer (Betreiber der einzelnen Produktionsstandorte) zusammen. Das Unternehmen, d. h. sowohl Auftraggeber und Auftragnehmer, haben dabei das Interesse ihren Gewinn zu maximieren. Hierzu wurden unterschiedliche plattformkonforme Preisgestaltungsverfahren in Abschnitt 3.2.1 diskutiert. Neben der Gewinnmaximierung sollen jedoch insbesondere Anreize geschaffen werden, um möglichst schnell auf Nachfrageänderungen des Marktes zu reagieren und so einen Kapazitätsabgleich zu erreichen. Der Preis für ein Produkt bzw. für eine Dienstleistung könnte solch ein Anreiz sein.

Das Verfahren der dynamischen Preisbildung wird im Dienstleistungssektor, insbesondere im Hotelgewerbe, schon seit Jahren eingesetzt. Kurzfristige Nachfrageschwankungen im Hotelgewerbe können allerdings durch die Anreize des Verfahrens nicht ausgeglichen werden, da das Angebot stets lokal am geographischen Ort bereitgestellt werden muss. Der Aufbau temporärer Einrichtungen und damit die Skalierung des Kapazitätsangebots lohnen sich auch zu Spitzenphasen, wie etwa zu Messezeiten nicht. Dynamische Preisverfahren werden hier ausschließlich genutzt, um aus vorhandenen Ressourcen zu Zeiten hoher Nachfrage den Gewinn zu maximieren. Im Zuge neuer Online-Plattformen zur Personenbeförderung und von Lieferdiensten wurden auch die Ansätze der dynamischen Preisbildung weiterentwickelt. Das *Surge Pricing* stellt dabei, wie in Abschnitt 3.2.1 vorgestellt, einen verbreiteten Ansatz dar. Es wird versucht, den Unterschied zwischen der Kapazitätsnachfrage und dem -angebot durch den Preis abzugleichen. Anhand des Personenbeförderungsplattformanbieters Uber kann die Funktionsweise beispielhaft skizziert werden. Der Fahrpreis bildet sich aus drei Komponenten, dem Basis- und Streckenpreis sowie dem Preis für die Dauer der Fahrt. Dieser Fahrpreis wird mit dem sogenannten *Surge Multiplier* multipliziert. Der *Surge Multiplier* wird auf Basis der aktuellen Nachfrage am Standort durch den *Surge Algorithmus* ermittelt. Der Preis und der *Surge Multiplier* sind dem Fahrgast vor Antritt der Fahrt bekannt. Der Fahrer wiederum zahlt vom Gesamtpreis eine Servicegebühr an den Plattformbetreiber. Der Ansatz der dynamischen Preisgestaltung zeigt anhand des Beispiels der Personenbeförderung einen Abgleich von Kapazitätsnachfrage und -angebot (COHEN ET AL. 2016). Dieser Abgleich kann über mehrere Wege erfolgen.

Zum einen sind Fahrer bereit zusätzliche Fahrten für einen höheren Ertrag, resultierend durch einen höheren Surge Multiplier, durchzuführen. Gelegenheitsfahrer sind bei hohen Ertragsaussichten eher bereit Fahrten durchzuführen. Hierdurch kann auch kurzfristig ein hohes Kapazitätsangebot sichergestellt werden und der Bedarf der Fahrgäste gedeckt werden. Wird hingegen ein zu hoher Surge Multiplier angewendet, kommt es dazu, dass Fahrgäste sich nach günstigeren Verkehrsmitteln umsehen, folglich reduziert sich die Nachfrage. Dieselben Akteure, Auftraggeber (Fahrgast), Produktionsplanungsservice (Plattformbetreiber), Auftragnehmer (Fahrer) finden sich auch in der vorliegenden Herausforderung im Produktionsnetzwerk wieder. Eine weitere Analogie zu dem Beispiel der Personenbeförderung kann zudem in der kurzfristigen Reaktion auf Nachfrageschwankungen innerhalb der beschriebenen Produktionsnetzwerke identifiziert werden. Daher soll in dieser Arbeit die Strategie der dynamischen Preisgestaltung mittels des Surge Pricing adaptiert werden und Anwendung finden.

Eine Übertragung des Surge Pricing aus dem Dienstleistungssektor in den Bereich der Produktion bedarf jedoch einiger Anpassungen. Die Produktion weist aufgrund der Heterogenität der Prozesse und des Arbeitseinsatzes eine deutlich höhere Planungskomplexität auf als eine reine Transport-Dienstleistung. Um dieser Komplexität gerecht zu werden und die unterschiedlichen Auslastungszustände der Prozesse an einem Produktionsstandort zu berücksichtigen, siehe Abbildung 28, wurde der Surge Multiplier erweitert und auf die Struktur des genetischen Algorithmus angepasst. Der *Averaged-Surge-Multiplier* (ASM_t^{Chro}) drückt diesen Auslastungszustand in Periode t für ein Chromosom aus. Dieses Chromosom zeigt die Lösung für einen kundenindividuellen Produktionsauftrag und mündet in einer konkreten Netzwerkkonfiguration.

$$ASM_t^{Chro} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n SM_{def,t,i} \quad (5-5)$$

mit: $SM_{def,t,i}$ Definierter Surge Multiplier in Periode t
 ASM_t^{Chro} Averaged-Surge-Multiplier für Chromosom in Periode t

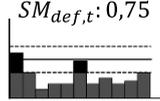
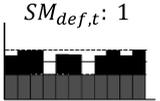
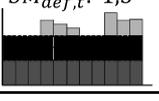
Der ASM_t^{Chro} bildet sich aus dem arithmetischen Mittelwert der definierten Surge Multiplier der einzelnen Herstellungsprozesse, die innerhalb eines Chromosoms ausgewählt wurden. Die Formel 5-6 zeigt die weitere Zielfunktion auf, nach der

5 Modellierung der Elemente zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

bei dem Einsatz des dynamischen Preisbildungsverfahrens ebenfalls mittels des NSGA-II optimiert wird.

$$\min E = C * ASM_t^{Chro} * q \quad (5-6)$$

mit: E Erlös
 C Herstellkosten
 ASM_t^{Chro} Averaged-Surge-Multiplier für Chromosom in Periode t
 q Anzahl der Produkte

Prozessschritt & Fähigkeit		Standort A	Standort B	Standort C	Standort D
1	Spritzgießen	$SM_{def,t}: 0,75$ 		$SM_{def,t}: 1$ 	
2	Bohren		$SM_{def,t}: 1,5$ 		
3	Drucken		$SM_{def,t}: 1$ 	$SM_{def,t}: 1$ 	
4	Vereinigen				$SM_{def,t}: 1,5$ 

Legende:

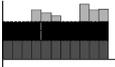
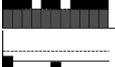
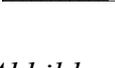
$SM_{def,t}$	Definierter Surge Multiplier in Periode t
	Überausgelasteter Bereich
	Auslastung innerhalb des Flexibilitätskorridors
	Unterausgelasteter Bereich

Abbildung 28: Anwendung des Surge Multipliers anhand eines Chromosoms einer Netzwerkconfiguration

Jede Fähigkeit an einem einzelnen Standort, die es zur Erfüllung eines einzelnen Prozessschrittes bedarf, besitzt abhängig von der aktuellen Auslastungssituation

einen definierten Surge Multiplier $SM_{def,t,i}$. Dieser wird zuvor für die drei Auslastungszustände (Über-, Unterauslastung und Auslastung innerhalb des Flexibilitätskorridors) definiert.

$$SM_{def,t,i} \begin{cases} 0,75 & \text{bei Auslastung von } < 50 \% \\ 1 & \text{bei Auslastung von } \leq 50 \% - 75 \% \geq \\ 1,5 & \text{bei Auslastung von } > 75 \% \end{cases} \quad (5-7)$$

Die Anwendung des dynamischen Preisbildungsverfahrens in dieser Arbeit dient nicht direkt der Ermittlung des Verkaufspreises am Markt, sondern der internen Kosten.

Fokus bei der Anwendung des dynamischen Preisbildungsverfahrens ist die Verteilung von Aufträgen innerhalb des Produktionsnetzwerkes, um eine hohe und gleichmäßige Auslastung zu erzielen.

5.4 Fazit

In dem vorliegenden Kapitel erfolgte die Modellierung der Elemente zur kurzfristigen Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken. Auf Grundlage des objektorientierten Modellierungsansatzes wurden semantische Beschreibungen für die Produktspezifikationen und Auftragsinformationen, für das Netzwerkmodell sowie für die standortübergreifende Logistik entwickelt. Hierbei wurde die UML-Semantik angewandt. Zur Netzbildung wurde ferner ein mehrschichtiges Systemmodell konzipiert. Um Verständlichkeit sicherzustellen, wurde ein graphenbasierter Ansatz ausgewählt. Konkret wurde ein Prozessvariantenplan, erweitert um Produktstatus und Kanten für Logistikkosten, angewandt.

Weiterhin wurden Optimierungsalgorithmen erprobt, ausgewählt und für den vorliegenden Anwendungsfall adaptiert. Hierzu wurde die populationsbasierte Metastrategie Heuristik NSGA-II ausgewählt. Mittels dieser können Pareto-Optimale Lösungen schnell identifiziert werden.

Um insbesondere in der kundenindividuellen Auftragsfertigung mit Schwankungen umgehen zu können, wurden gesteuerte Überbuchungsansätze, wie sie u.a. im Bereich des Yieldmanagements bei Fluggesellschaften (SMITH ET AL. 1992, SUBRAMANIAN ET AL. 1999) vorzufinden sind, weiterentwickelt. Zudem wurden Ansätze der dynamischen Preisbildungsverfahren, die bereits im Dienstleistungssektor z. B. im Hotelgewerbe und in der Personenbeförderung eingesetzt werden,

5 Modellierung der Elemente zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

auf die speziellen Anforderungen der kundenindividuellen Auftragsfertigung modelliert. Die Anwendung der Modellbildung und der damit einhergehenden Abstraktion sind wesentlich, um eine wissenschaftliche Allgemeingültigkeit des Produktionsplanungssystems zu erlangen.

Im nachfolgenden Kapitel erfolgt auf Grundlage der entwickelten Datenmodelle und adaptierten Algorithmen die Entwicklung der Methode zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken.

6 Methode zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

6.1 Übersicht

Im folgenden Kapitel soll die entwickelte Methode zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken vorgestellt und diskutiert werden. Ziel ist hierbei die kurzfristige und kostengünstige Herstellung von kundenindividuellen Produkten in Märkten, die durch hohe Volatilität charakterisiert sind. Hierzu werden die im vorherigen Kapitel entwickelten Datenmodelle genutzt, um automatisiert Lösungsräume und Entscheidungsvorlagen auf Ebene des Netzwerks zu generieren. Auch die diskutierten Ansätze aus dem Dienstleistungssektor in Abschnitt 5.3.3 und 5.3.4 wurden adaptiert und finden in der Methode Einsatz.

Die Methode wird in drei Hauptfunktionsgruppen unterteilt, diese bilden die nächsten drei Abschnitte des sechsten Kapitels (siehe Abbildung 29).

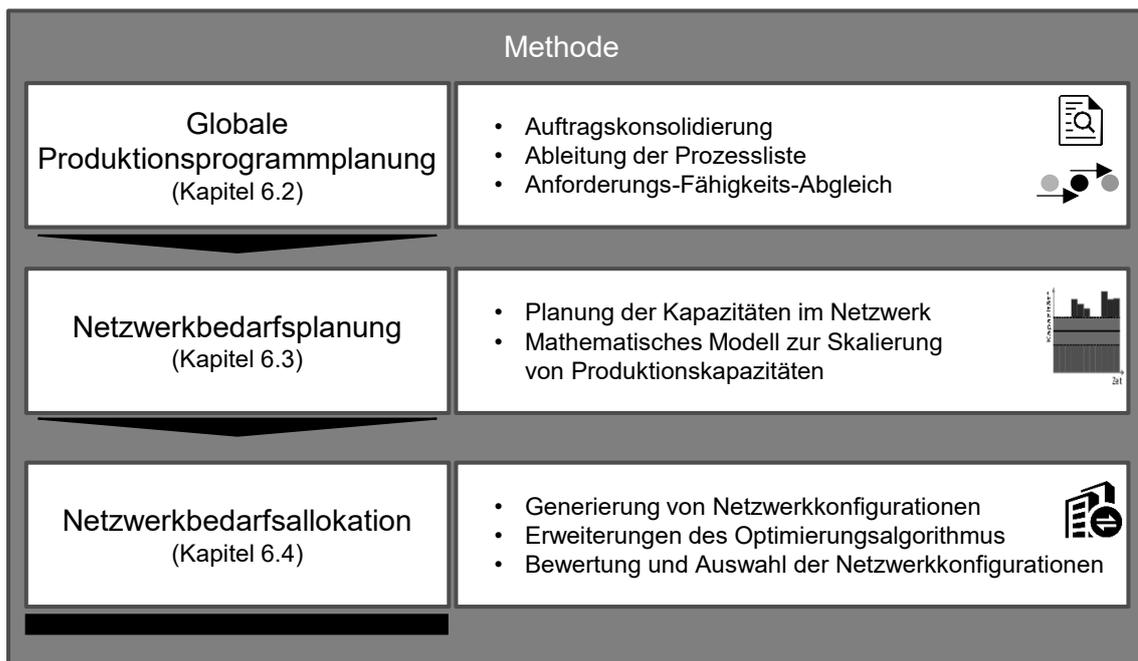


Abbildung 29: Übersicht und Ablauf der entwickelten Methode zur Produktionsplanung

Zunächst erfolgt in Abschnitt 6.2 die globale Produktionsprogrammplanung. Darin finden eine Auftragskonsolidierung, die Untersuchung der benötigten Herstellungsprozesse sowie der Abgleich der vorhandenen Fähigkeiten der einzelnen

6 Methode zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

Standorte im Netzwerk statt. Die globale Produktionsprogrammplanung zeigt somit auf, welche Partner im Produktionsnetzwerk grundsätzlich für einen Auftrag bzw. für einen spezifischen Prozessschritt geeignet sind. Anschließend erfolgt in Abschnitt 6.3 die Netzwerkbedarfsplanung. Dieser Abschnitt ist essenziell, um die Planung der Kapazitäten vorzunehmen. Dabei wird untersucht, inwieweit die einzelnen Standorte ausreichende Kapazitäten vorweisen, um die nachgefragte Menge in der gegebenen Zeit abzubilden. Fokus des Methodenschritts ist die Ermittlung der Mengen, unter Berücksichtigung von Rekonfigurationsmöglichkeiten des jeweiligen Produktionssystems. Schließlich ist das Ziel eine kosteneffiziente Kapazitätsabstimmung. Die Netzwerkbedarfsallokation bildet die dritte Hauptfunktionsgruppe in Abschnitt 6.4. In diesem abschließenden Methodenschritt werden zunächst die Annahmen für das zu lösende Planungsproblem beschrieben. Anschließend erfolgt die mathematische Modellformulierung zur Generierung von Netzwerkkonfigurationen. Innerhalb dieser Hauptfunktionsgruppe werden die Netzwerkkonfigurationen mittels des NSGA-II entwickelt und anschließend bewertet. Die Methode behandelt damit ein dreidimensionales Optimierungsproblem. Das Ziel ist es, auftragsspezifisch Liefertermin, Kapazität sowie die Netzwerkstruktur zu harmonisieren. Abbildung 29 stellt die Übersicht und den Ablauf der Methode dar.

6.2 Globale Produktionsprogrammplanung

6.2.1 Auftragskonsolidierung

Im ersten Schritt erfolgt die Konsolidierung der Aufträge (siehe Abbildung 30). Dies hat den Vorteil, dass gewisse Tätigkeiten aus unterschiedlichen Kundenaufträgen zu Produktionsaufträgen zusammengefasst werden können. Die Konsolidierung kann zu Skaleneffekten durch höhere Losgrößen, der Reduktion von Rüstkosten sowie zu Einsparungen von Logistikaufwänden führen, folglich können Kostenvorteile realisiert werden. Hierbei stellt sich jedoch die Frage, nach welchen Merkmalen eine methodische Konsolidierung von unterschiedlichen Produkten erfolgen kann. Nach der Analyse der Auftragsdaten sind folgende Merkmale denkbar: Produkt, Menge, Liefertermin und -ort. Die Konsolidierung von Aufträgen bringt aus Sicht der Produktionsplanung jedoch nicht nur Vorteile. Die Konsolidierung durch die intervallbasierte Durchführung führt i. d. R. zu einer höheren Trägheit der Produktionsplanung (LÖDDING 2016). Um den heterogenen Anforderungen (Produkt, Menge, Liefertermin und -ort) des Marktes gerecht zu werden

6.2 Globale Produktionsprogrammplanung

und innerhalb des Produktionsnetzwerkes einen homogenen Auftragsfluss sicherzustellen, ist eine Unterscheidung in Eil- und Normalaufträgen zweckmäßig (WIENDAHL 2011). Die Zulassung von Eilaufträgen resultiert jedoch häufig in Schwankungen und Umplanungen. Um die Aufwände dieser Schwankungen und die daraus resultierenden Umplanungen einzukalkulieren, ist ein preislicher Aufschlag für Eilaufträge sinnvoll. Generell resultiert in Abhängigkeit von der Höhe des Aufschlags ein Anreiz eher Normalaufträge als Eilaufträge aus Kundensicht einzulasten. Durch diese Maßnahme kann steuernd auf den Anteil der Eilaufträge eingegangen werden. Die Unterscheidung in Eil- und Normalaufträge bietet in der vorliegenden Arbeit weiterhin die Möglichkeit, Einfluss auf die Konsolidierungszeit zu nehmen.

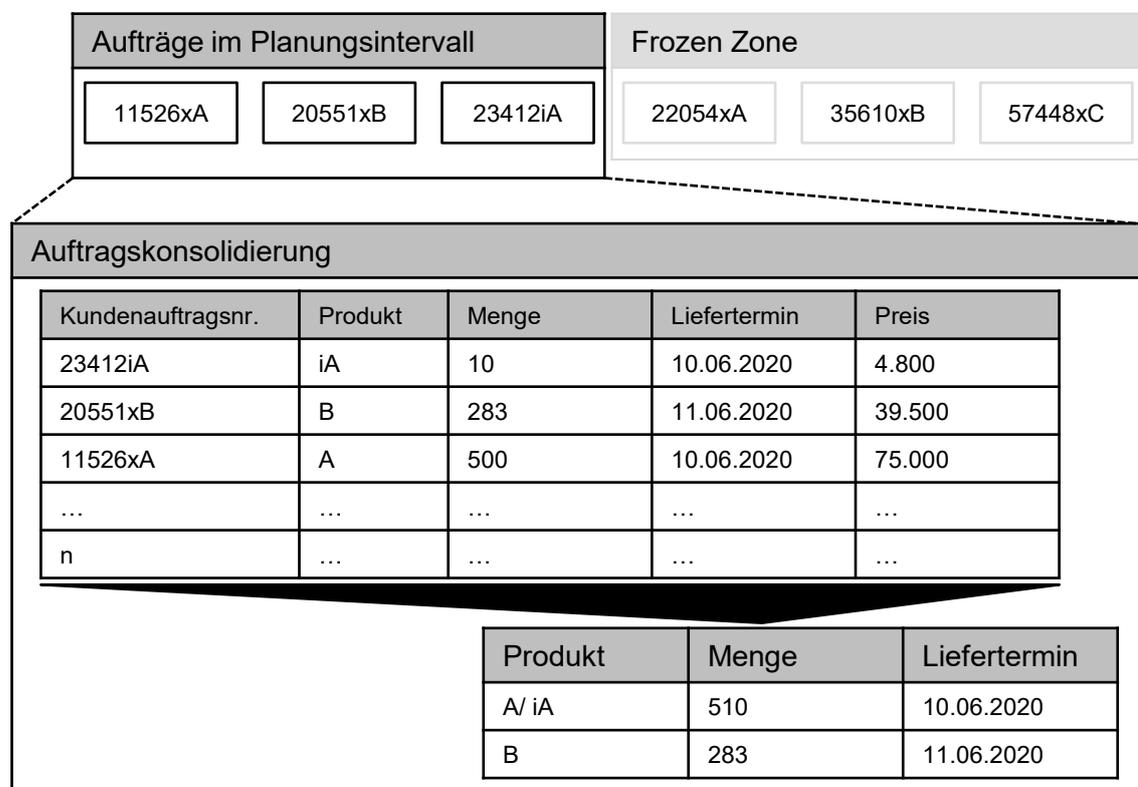


Abbildung 30: Schematische Auftragskonsolidierung

Die Konsolidierungszeit führt zur zentralen Frage nach dem Einlastungstrigger. Es handelt sich um die Frage, wodurch bestimmt wird, wann das Intervall der Konsolidierung von Aufträgen beendet wird und die Einlastung erfolgt. Nach TEMPELMEIER & KUHN (1992) kann die Einlastung grundsätzlich nach zwei Arten erfolgen. Zum einen nach statisch festen Serien, d. h. die Auftragsreihenfolge wird festgelegt und ist nach Ablauf eines bestimmten Zeitintervalls nicht mehr veränderbar. Hierdurch kann eine geringe Zykluszeit realisiert werden. Zum anderen kann die

6 Methode zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

Einlastung nach kontinuierlich verändernden Serien erfolgen. Hierbei wird zu Beginn jedes Planungsintervalls der geplante sowie ungeplante Auftragsbestand geprüft und Serien zusammengefasst, anschließend erfolgt die Priorisierung. Diese Art der Einlastung führt häufig zu mehrfachen Umplanungen, hat jedoch den Vorteil, dass eine höhere Termintreue sichergestellt werden kann (TEMPELMEIER & KUHN 1992). Um dennoch eine gewisse Planungsstabilität zu realisieren und kurzfristige Veränderungen der Abläufe vor Produktionsstart zu vermeiden, soll eine unternehmensspezifische Frozen Zone, d. h. ein Zeitkorridor, innerhalb dessen keine Umplanungen von Produktionsaufträgen mehr zulässig sind, implementiert werden. Die Einlastung nach kontinuierlich verändernden Serien lässt sich zudem mit der Maßnahme der Eilaufträge koppeln. Dies bedeutet, dass die Einlastung nicht nur bei Erreichung des Auslösezeitpunkts erfolgt, sondern auch bei der Identifikation von Eilaufträgen. Der Nachteil der oben beschriebenen Trägheit der Produktionsplanung durch die intervallbasierte Durchführung kann durch die Koppelung von kontinuierlich verändernden Serien und Eilaufträgen stark reduziert werden. Diese Art der Einlastung kann zu höherer Termintreue in dynamischen Märkten führen und unterstützt die Anforderungen des Systems zur Produktionsplanung von kundenindividuellen Produkten in Produktionsnetzwerken.

6.2.2 Ableitung der Prozessliste

Im vorherigen Abschnitt erfolgte die Konsolidierung der Kundenaufträge auf Basis des Produkts, der Lieferzeit und des Lieferortes. Dieser erste Schritt dient dazu, Skaleneffekte und damit Kostenvorteile auszunutzen. Um diese Skaleneffekte innerhalb der kundenindividuellen Produktion auch tatsächlich zu erzielen, bedarf es geringer Rüstkosten und größerer Losgrößen. Hierzu erfolgt zunächst die Interpretation der Merkmale der kundenindividuellen Produkte sowie der vorhandenen Produktvarianten.

Zur Interpretation des Produkts dient zum einen die Materialliste, die mit dem Kundenauftrag einhergeht. Zum anderen dienen technische Zeichnungen in maschinenlesbaren Formaten (u. a. CAD) zur weiteren Interpretation des Produkts. Merkmale wie beispielsweise Bohrungen, Fasen, Nuten, die in das Produkt eingebracht werden, aber auch Beschichtungen, die auf das Produkt aufgetragen werden, können durch Analyse der technischen Zeichnung ausgelesen werden. Mittels der in Abschnitt 5.3.1 vorgestellten Methode des Prozessvariantenplans lassen sich die unterschiedlichen Operationen eines Produkts strukturieren und auf Basis der automatisierten Interpretation des Produkts Prozesslisten ableiten. Nachdem das

6.2 Globale Produktionsprogrammplanung

Modell des kundenindividuellen Produkts in seine Einzelteile und Herstellungsprozesse heruntergebrochen wurde, können nichtteilbare Arbeitsvorgänge aus unterschiedlichen Kundenaufträgen zu aggregierten Produktionsaufträgen für ein Produktionsprogramm zusammengetragen werden (siehe Abbildung 31).

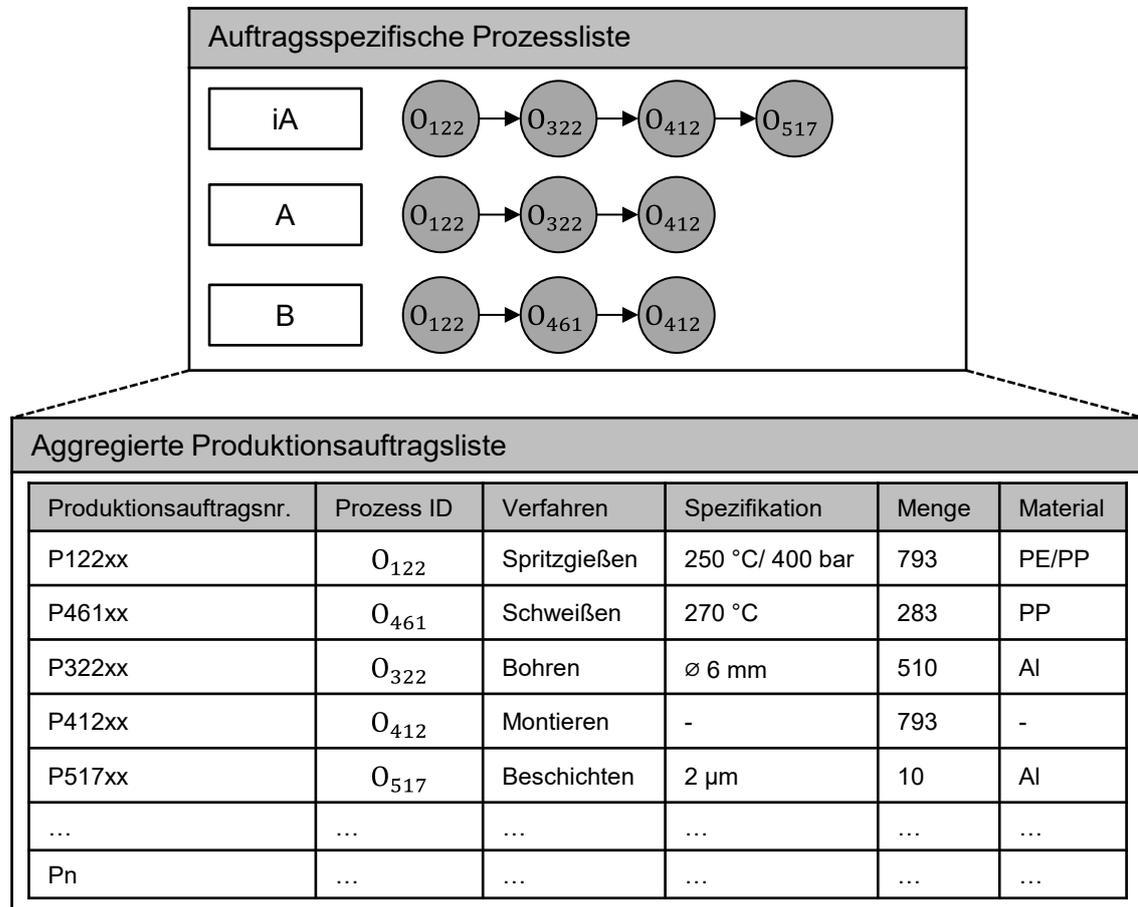


Abbildung 31: Aggregierte Produktionsauftragsliste

Die Spezifikation der einzelnen Arbeitsvorgänge erfolgt durch die Zuordnung der Produktionsverfahren nach der Klassifikation in Abschnitt 5.2. Die Abbildung 31 zeigt beispielhaft die Aggregation von Produktionsaufträgen zu einem vorläufigen Produktionsprogramm. Erst durch die Aggregation der Produktionsaufträge und damit der einzelnen Arbeitsvorgänge zu größeren Losen kann die Möglichkeit der eingangs erwähnten Skaleneffekte erzielt werden. Um im nächsten Schritt ein vollständiges globales Produktionsprogramm zu erstellen, bedarf es weiterhin des Abgleiches der Fähigkeiten an den einzelnen Standorten. Hierzu ist auf Basis des vorläufigen Produktionsprogrammes zu prüfen, welcher Standort grundsätzlich passende Fähigkeiten installiert hat.

6.2.3 Anforderungs-Fähigkeits-Abgleich

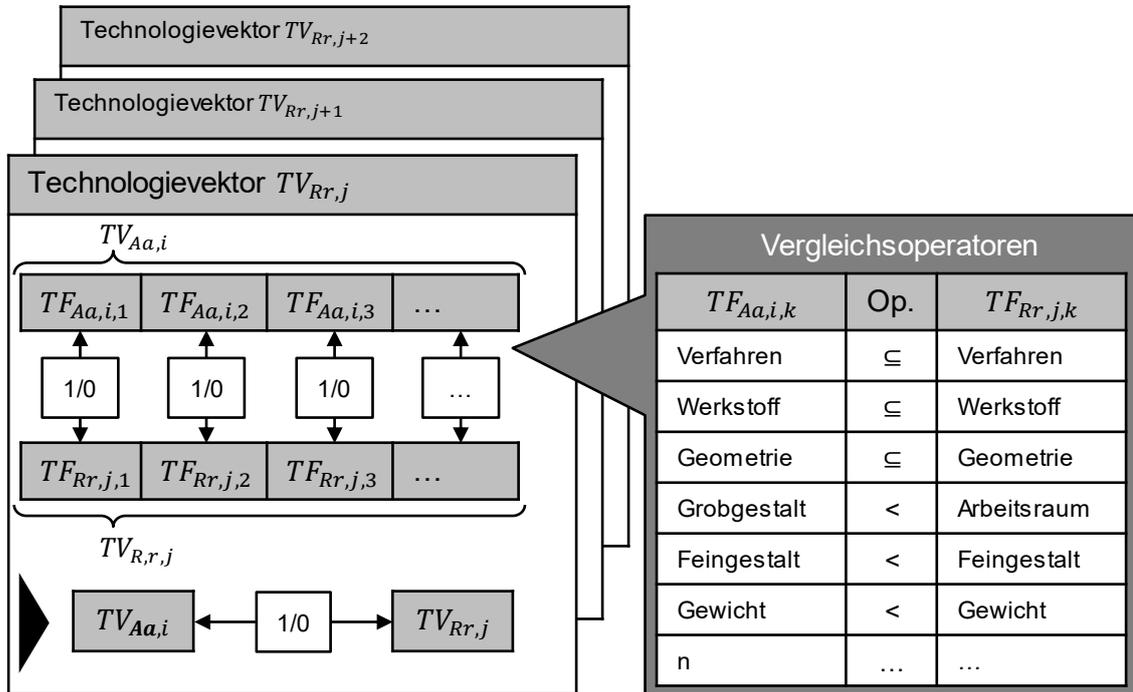
In Abschnitt 6.2.2. wurde das Vorgehen zur aggregierten Produktionsauftragsliste diskutiert. Die daraus hervorgebrachte Auftragsliste stellt die produktseitigen Anforderungen dar. Im vorliegenden Abschnitt soll erläutert werden, wie der Abgleich mit den lokal vorhandenen Fähigkeiten der einzelnen Standorte erfolgen kann, um schnell und kosteneffizient die Auftragsliste innerhalb des bestehenden Unternehmensnetzwerkes abzubilden. In Anlehnung an den im Abschnitt 3.2.1 vorgestellten Ansatz der generischen Technologieketten nach KNOCHE (2005) und der Erweiterung des Ansatzes um Elemente der Rekonfiguration von Ressourcen durch HEES (2017) soll der Anforderungs-Fähigkeits-Abgleich technisch erfolgen. Innerhalb des Forschungsprojektes InnoCyFer wurde der technische Fähigkeitsabgleich entwickelt und erprobt. Auf Basis der geometrischen Abmaße des Rohmaterials und des zukünftigen Produkts sowie der Fähigkeiten der Maschinen wurde ein Abgleich durchgeführt.

Zum Abgleich der Anforderungen der aggregierten Produktionsauftragsliste mit den Fähigkeiten der einzelnen Standorte bedarf es der semantischen Beschreibung der Fähigkeiten. In Abschnitt 5.2.2 wurde hierzu das Datenmodell entwickelt. Die benötigten Informationen zum Produkt bzw. zum Auftrag sind dem Auftragsmodell (Abschnitt 5.2.1) zu entnehmen. Mittels des auf Operationen basierenden Regelwerks in Abbildung 32 können die einzelnen Technologiefaktoren verglichen werden.

Ein Technologievektor besteht dabei aus mehreren Technologiefaktoren (Prozess, Material, Geometrie, etc.). Erfüllen die Technologiefaktoren alle produktseitigen Anforderungen, handelt es sich um einen Technologievektor, der die technische Fähigkeit besitzt, die geforderte Aufgabe innerhalb des Produktionsprozesses zu erfüllen und somit eine zulässige Lösung darzustellen. Abbildung 32 stellt diesen Prozessablauf nochmals grafisch dar. Durch den Anforderungs-Fähigkeits-Abgleich lassen sich Standorte samt ihren technischen Fähigkeiten systematisch und eindeutig vergleichen. Hierdurch kann ermittelt werden, welche Partner im Produktionsnetzwerk für die bestimmte aggregierte Auftragsliste geeignet sind.

Mit diesem Abschnitt schließt die Hauptfunktionsgruppe der *Globalen Produktionsprogrammplanung*. Zunächst wurden die Kundenaufträge konsolidiert, anschließend Produkte in Herstellungsprozesse heruntergebrochen und Produktionsaufträge aggregiert, schließlich erfolgte der Anforderungs-Fähigkeits-Abgleich mittels Technologievektoren. In der nächsten Hauptfunktionsgruppe folgt auf

Grundlage der gewonnenen Informationen die Netzwerkbedarfsplanung und die Prüfung der vorhandenen Kapazitäten.



Legende:

- $TV_{Aa,i}$: Technologievektor i des Arbeitsvorganges a
- $TV_{Rr,j}$: Technologievektor j der Ressourcenkonfiguration r
- $TF_{Aa,i,k}$: Technologiefaktor k des $TV_{Aa,i}$
- $TF_{Rr,j,k}$: Technologiefaktor k des $TV_{Rr,j}$
- $1/0$: 1 wenn $TF_{Rr,j,k}$ Anforderung von $TF_{Aa,i,k}$ entspricht
0 wenn $TF_{Rr,j,k}$ Anforderung von $TF_{Aa,i,k}$ nicht entspricht

Abbildung 32: Anforderungs-Fähigkeits-Abgleich mittels Technologievektoren (in Anlehnung an BE ISA ET AL. 2018)

6.3 Netzwerkbedarfsplanung

Die Netzwerkbedarfsplanung hat zum Ziel die marktseitigen Bedarfe und somit die zu produzierenden Mengen für einen definierten Zeitraum zu determinieren. Durch diese Menge kann zum einen die marktseitige Kapazitätsnachfrage bestimmt werden, zum anderen lässt sich das benötigte Kapazitätsangebot ableiten. Die Anpassung von Kapazitätsnachfrage und -angebot wird, wie in Abschnitt 5.3.4 beschrieben, als Kapazitätsabgleich bezeichnet und erweist sich in der Realität als komplexes, mit Unsicherheiten behaftetes Unterfangen.

6 Methode zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

In Abschnitt 6.3.1 wird das Vorgehen zur Planung und zum Abgleich der Kapazitäten im Netzwerk behandelt. Hierbei wird der entwickelte Ansatz der virtuellen Kapazitätsgrenze angewandt. Der Abschnitt 6.3.2 dient der Formulierung des mathematischen Modells zur Skalierung von Produktionskapazitäten unter Berücksichtigung der Rekonfiguration von Produktionssystemen.

6.3.1 Planung der Kapazitäten im Netzwerk

Wie in der Problemstellung in Abschnitt 1.2 deutlich wurde, stehen Unternehmen ständig vor der Herausforderung schnell und kosteneffizient Kapazitätsabgleiche durchzuführen. Die Thematik des Kapazitätsabgleichs wird dabei sowohl in der Literatur als auch in der Praxis meist aus der Standortsicht behandelt. Aus der Netzwerksicht hingegen kann eine höhere Hebelwirkung erzielt werden, d. h. die Skalierung des Kapazitätsangebots im volatilen Umfeld erscheint durch die globale standortübergreifende Netzwerksicht zweckmäßiger hinsichtlich der Planung der Kapazitäten.

6.3.1.1 Planung mit fixen Kapazitätsgrenzen

Die fixe Kapazitätsgrenze beschreibt den physikalischen Maximalwert des Kapazitätsangebots. Sie impliziert jedoch kein fixiertes Kapazitätsangebot. Trotz der fixen Kapazitätsgrenze kann eine flexible Kapazitätsanpassung von Ressourcen erfolgen. Aus Sicht der Planung werden jedoch begrenzte Ressourcen, wie es in der Realität der Fall ist, angenommen. Die fixe Kapazitätsgrenze ist dabei statisch und nicht abhängig von der Auftragslage. Eine Änderung der Grenze ist innerhalb des strategischen Planungshorizonts durch bauliche Maßnahmen, wie das Hinzufügen oder Entfernen von Ressourcen, möglich. Solche baulichen Maßnahmen werden in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht berücksichtigt, daher wird im kurz- bis mittelfristigen Planungszeitraum von einer fixen Kapazitätsgrenze ausgegangen.

Die Produktionsplanung auf Basis von fixen Kapazitätsgrenzen hat den Vorteil, dass die maximale Menge der zur Verfügung stehenden Ressourcen für eine definierte Periode t verplant und realisiert werden kann. Bei homogenem und stabilem Nachfrageverhalten handelt es sich daher um einen zweckmäßigen und in der Praxis eingesetzten Ansatz. Eine hohe Überplanung von Ressourcen innerhalb einer Periode, wie es bei dem Ansatz der Planung auf Basis unbegrenzter Kapazität der Fall wäre, erfolgt nicht. Verspätungen, die aus der Überbuchung von Ressourcen

resultieren, können durch die Planung mit begrenzten Ressourcen vermieden werden. Auch gehäufte Umplanungen, die aufgrund von Eilaufträgen aus der Planung mit unbegrenzter Kapazität resultieren, können verhindert werden. Im Auftragsabwicklungsprozess, insbesondere bei kundenindividuellen Produkten, findet vor der Bestellung eine Anfrage mit einem Liefertermin statt. Diese Anfragen müssen geplant werden, münden jedoch nicht immer in Bestellungen. Weiterhin sind die Bestellungen stets mit einer gewissen Stornierungsrate verbunden. Hieraus können sich kurzfristig Kapazitätsüberschüsse ergeben, die nicht immer effizient durch passende Aufträge abgedeckt werden können. Die kundenindividuelle Produktion charakterisiert sich dabei durch eine höhere Heterogenität der Produkte und einer volatileren Nachfragesituation. Daher erscheint der Planungsansatz mit fixen Kapazitätsgrenzen nur bedingt brauchbar.

6.3.1.2 Planung mit virtuellen Kapazitätsgrenzen

Die Planung von Ressourcen auf Grundlage von virtuellen Kapazitätsgrenzen erlaubt es, die physikalischen Werte der Ressourcen des Produktionsnetzwerkes zu überplanen. Hierbei sind Parallelen zum Planungskonzept auf Basis der unendlichen Kapazität erkennbar. Im Detail weist der vorliegende Ansatz dennoch einige Unterschiede auf. Die virtuelle Kapazitätsgrenze ist dynamisch ausgelegt und nicht infinit. Zu einem bestimmten und geplanten Maße wird in iterativen Durchläufen die Überbuchung ermöglicht. Wie in Abschnitt 5.3.4 ausführlich erläutert, werden hierzu Bestellwahrscheinlichkeiten ermittelt. Diese Bestellwahrscheinlichkeiten drücken den Anteil an Anfragen aus, die zu Bestellungen werden. Innerhalb des Planungshorizontes werden bewusst Überbuchungen von Ressourcen bis zu einem bestimmten Grad erlaubt, da aus Vergangenheitsdaten bekannt ist, dass der Anteil dieser geplanten Überbuchungen zu hoher Wahrscheinlichkeit aus Anfragen und Bestellungen besteht, die nicht ausgelöst bzw. die storniert werden. Hierdurch sollen Produktionsverluste durch das restliche nicht verbrauchte Kapazitätsangebot in Periode t vermieden werden. Die virtuelle Kapazitätsgrenze berechnet sich für die einzelnen Ressourcen an den verschiedenen Standorten durch das Kapazitätsangebot, die Bestellwahrscheinlichkeit und der verfügbaren Kapazität in Periode t (siehe Formel 5-4). Das Netzwerkmodell aus Abschnitt 5.2.2 enthält die benötigten Informationen zur Bestimmung der virtuellen Kapazitätsgrenze.

Da es sich hierbei um theoretische Überlegungen handelt, sollen innerhalb der Erprobung der Netzwerkbedarfsplanung in Kapitel 7 beide Ansätze zur Planung der Kapazitäten genutzt werden. Die quantitative Untersuchung soll zeigen, inwiefern die virtuelle Kapazitätsgrenze, die aus dem theoretischen Konzept angenommenen

6 Methode zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

Vorteile gegenüber den fixen Kapazitätsgrenzen innerhalb des Produktionsnetzwerkes wirklich nachweisen kann.

6.3.2 Mathematisches Modell zur Skalierung von Produktionskapazitäten

Die Formulierung des Zielsystems dient der Bestimmung der skalierbaren Produktionskapazitäten unter Berücksichtigung der Rekonfiguration der Produktionssysteme. Das mathematische Modell orientiert sich dabei im Wesentlichen an dem anspruchsvollen kombinatorischen Optimierungsproblem des Flexible-Job-Shop-Scheduling-Problem⁴. Zudem erfolgt die Integration der Ressourcenkonfiguration auf Ebene des Produktionssystems und des Anforderungs-Fähigkeits-Abgleichs mittels Technologievektoren in das Modell. Des Weiteren werden die Zielgrößen formuliert. Das formulierte Zielsystem dient dazu, an jedem einzelnen Standort des Netzwerks die Kapazitäten unter Beachtung der Rekonfigurationsmöglichkeiten vorzuplanen.

6.3.2.1 Annahmen

Die ganzheitliche Betrachtung von Produktionsaufträgen wird in der Praxis häufig nicht herangezogen. Es erfolgt hingegen die Berechnung der Aufwände der Produktherstellung, der Transporte innerhalb des Netzwerks und der letzte Transport zum Kunden häufig in separaten Kostenstellen. Die vorliegende ganzheitliche Betrachtung berücksichtigt die geographische Nähe des Produktionsstandortes zum Zielort des Endkonsumenten. Hierzu werden die gesamten Logistikkosten, einschließlich des letzten Transports zum Endkonsumenten berechnet.

Die Materialkosten sind für die Berechnungen in dieser Arbeit nicht ausschlaggebend, da angenommen wird, dass innerhalb des internen Unternehmensnetzwerkes die Einkaufspreise zentral verhandelt werden und für alle Standorte gleich bzw. nahezu gleich sind. Weiterhin wird angenommen, dass stets ein Transport der Rohmaterialien zu einem Standort erfolgen muss und dabei die Transportzeit

⁴ Das Job-Shop-Scheduling-Problem stellt ein bekanntes Optimierungsproblem im Bereich des Operations Research dar (DOMSCHKE ET AL. 1997). Dabei werden im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten von i. d. R. mehreren Operationen (Jobs) und passenden Ressourcen (Maschinen) unter Berücksichtigung des zeitlichen Ablaufs durchgeführt und bewertet. Bei dem Flexible-Job-Shop-Scheduling handelt es sich um eine Erweiterung. Diese Erweiterung unterscheidet wiederum zwischen voller und partieller Flexibilität. Bei der vollen Flexibilität kann jede Operation an jeglicher Ressource durchgeführt werden, bei der partiellen hingegen nur bei einem bestimmten Teil der Ressourcen (MUTINGI & MBOHWA 2017).

und - kosten im Durchschnitt zu allen Standorten gleich sind. Des Weiteren erfolgt die Annahme, dass die einzelnen Standorte im Netzwerk stets betriebsbereit sind, d. h. alle Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe stehen in ausreichendem Umfang zur Verfügung.

6.3.2.2 Beschreibung der Eingangsparameter

Für das Verständnis des mathematischen Modells ist die Definition der Eingangsparameter nötig. Als Grundlage für die Planung dienen die Produktionsaufträge (PO) mit dem Index k . Ein PO wird charakterisiert durch die Menge der Arbeitsvorgänge (WP) mit dem Index a sowie durch die dazugehörige Anzahl an Technologievektoren (TV_{Aa}) mit dem Index i . Ein Produktionsauftrag kann aus L^{max} Teillosten bestehen. Die Menge an Ressourcenkonfigurationen wird mit der Laufvariable r beschrieben. Neben den Technologievektoren der Arbeitsvorgänge existieren weiterhin die Technologievektoren TV_{Rr} der Ressourcenkonfiguration (RK), diese werden mit der Menge J^{max} gekennzeichnet. Wie in Abschnitt 5.2.3 beschrieben, werden in dem mathematischen Modell neben fertigungstechnischen Verfahren, deren Ressourcen durch Module M^{max} dargestellt werden, auch Verfahren der Handhabungstechnik berücksichtigt. Diese manuellen Ressourcen werden über die Anzahl der Arbeitsplätze P^{max} beschrieben. Der Laufindex t drückt die einzelnen Planungsperioden aus.

Tabelle 6-1: Verwendete Eingangsparameter

$k \in K := (1, \dots, K^{max})$	Menge der PO
$a \in A := (1, \dots, A^{max})$	Menge der WP eines PO
$i \in I := (1, \dots, I^{max})$	Menge der TV_{Aa} eines PO
$l \in L := (1, \dots, L^{max})$	Menge der Teillose eines PO
$r \in R := (1, \dots, R^{max})$	Menge der RK
$j \in J := (1, \dots, J^{max})$	Menge der TV_{Rr}
$m \in M := (1, \dots, M^{max})$	Menge der Module
$p \in P := (1, \dots, P^{max})$	Menge der Arbeitsplätze
$t \in T := (1, \dots, T^{max})$	Menge der Planungsperioden

6.3.2.3 Formulierung der Zielfunktion

Mithilfe der Zielfunktion des mathematischen Modells soll eine Minimierung der Gesamtkosten erreicht werden. Die Gesamtkosten setzen sich dabei aus der Summe der Produktions- (6-1), Logistik- (6-2) und Rekonfigurationskosten (6-3) zusammen. Anschließend wird die Zielfunktion (6-4) formuliert. Die Produktionskosten C^P (6-1) berechnen sich im Wesentlichen aus der Durchführungszeit der einzelnen Arbeitsvorgänge WP, der zu produzierenden Menge, dem prozentualen Anteil der Teillose, die mit dem Technologievektor der Ressourcenkonfiguration hergestellt wurden, dem Produktionskostenfaktor für die Normalkapazität und gegebenenfalls dem Kostenfaktor für Zusatzkapazitäten. Die Produktionskosten der einzelnen Standorte innerhalb des eigenen Netzwerks für die Normal- und Zusatzkapazität bilden die maßgebliche kostentechnische Unterscheidung. Diese Kosteninformationen für die einzelnen Standorte sind in dem Netzwerkmodell hinterlegt.

$$C^P = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \left(t_j^P \times q_k \times OpsR_{a,i,j,l} \times (c_j^{P,N} \times (1 - X_{i,t}) + c_j^{P,Z} \times X_{i,t}) \right) \quad (6-1)$$

mit:	C^P	Produktionskosten zur Erfüllung aller PO [€]
	t_j^P	Produktionszeit zur Durchführung des WP_a mit $TV_{Rr,j}$ [h/Stk.]
	q_k	Auftragsmenge des PO k [Stk.]
	$OpsR_{a,i,j,l}$	Anteil des mit $TV_{Rr,j}$ hergestellten $TV_{Aa,i}$ von Teillos l des WP a - Operations Ratio ($OpsR$) in [%]
	$c_j^{P,N}$	Produktionskostenfaktor der Normalkapazität von $TV_{Rr,j}$ [€/Std.]
	$c_j^{P,Z}$	Produktionskostenfaktor der Zusatzkapazität von $TV_{Rr,j}$ [€/Std.]
	$X_{i,t}$	1, wenn $TV_{Aa,i}$ in Periode t Zusatzkapazität belegt, sonst 0

Essenziell für die Berechnung der Gesamtkosten sind weiterhin die Logistikkosten. Bei der Berechnung der Logistikkosten wird zum einen der Aufwand für die

Transporte zwischen den einzelnen Wertschöpfungsschritten ermittelt, zum anderen wird ebenfalls der Transportaufwand zwischen dem letzten Produktionsstandort und dem Auslieferort berücksichtigt.

$$C^L = \sum_{p \in P} \left(\sum_{l \in L} \left(\sum_{a \in A} c_{p(k,a,l),p(k,a-1,l)}^L + c_{p(k,A_{max},Z_k)}^L \right) \times OpsR_{a,i,j,l} \times q_k \right) \quad (6-2)$$

mit:	C^L	Logistikkosten zur Erfüllung aller PO [€]
	$c_{p(k,a,l),p(k,a-1,l)}^L$	Standardsatz der Logistikkosten zwischen Arbeitsplatz a und a-1 des Teilloses l von PO k [€/Stk.]
	$c_{p(k,A_{max},Z_k)}^L$	Standardsatz der Logistikkosten zwischen letztem Arbeitsplatz A_{max} und Zielort Z_k des Teilloses l von PO k [€/Stk.]

Zur abschließenden Ermittlung der Gesamtkosten ist die Betrachtung der Rekonfigurationskosten (6-3) nötig. Falls Rekonfigurationen der Produktionssysteme zur Herstellung der Produktionsaufträge in Periode t nötig sind, fallen Kosten an und die boolesche Variable $Y_{p,t}$ nimmt den Wert 1 an. Der Kostenfaktor c_r^{Rk} je Rekonfiguration ermittelt sich aus der hinterlegten Rekonfigurationsmatrix.

$$C^R = \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} (c_r^{Rk} \times Y_{p,t}) \quad (6-3)$$

mit:	C^R	Rekonfigurationskosten zur Erfüllung aller PO [€]
	c_r^{Rk}	Kostenfaktor zur Erstellung der RK r [€/Rekonfiguration]
	$Y_{p,t}$	1, wenn in Periode t-1 an Arbeitsplatz p eine andere RK verwendet wird, sonst 0

Nach der Formulierung der Produktions-, Logistik- und der Rekonfigurationskosten lassen sich diese Anteile in die Zielfunktion (6-4) zur Minimierung der Gesamtkosten für die Erfüllung aller Produktionsaufträge zusammensetzen.

$$\min C^{Total} = C^P + C^L + C^R \quad (6-4)$$

mit:	C^{Total}	Gesamtkosten zur Erfüllung aller PO [€]
------	-------------	---

6.3.2.4 Formulierung der Nebenbedingungen

Das mathematische Modell zur Skalierung von Produktionskapazitäten besteht neben der Zielfunktion ebenfalls aus Restriktionen, die es zu erfüllen gilt. Diese sind nötig, um technisch valide und in der Realität anwendbare Extremwerte zu erhalten. In diesem Abschnitt werden diese Restriktionen formuliert, die im Folgenden auch als Nebenbedingungen bezeichnet werden.

Einhaltung der Vorrangbeziehung

Eine wichtige Nebenbedingung ist die Einhaltung der Vorrangbeziehung. Diese Restriktion ist notwendig, da gewisse Bearbeitungsschritte eines Produkts bzw. eines Teillooses erst begonnen werden können, sobald spezifische Arbeitsvorgänge in der vorherigen Periode ($a-1$) abgeschlossen wurden. Die parallele Vergabe von zwingend aufeinander folgenden Arbeitsvorgängen in derselben Periode und damit die Nichteinhaltung der Präzedenz wird durch Restriktion 6-5 verhindert.

$$p_{k,a,l}^S > p_{k,a-1,l}^E \quad \forall (a \in A, k \in K) \quad (6-5)$$

mit: $p_{k,a,l}^S$ Startperiode des Teillooses l von WP a aus PO k
 $p_{k,a-1,l}^E$ Fertigstellungsperiode des Teillooses l von WP $a-1$ aus PO k

Bei größeren Stückzahlen hingegen und damit der Möglichkeit des Aufbaus eines Sicherheitsbestandes kann es bezogen auf die Durchlaufzeit dennoch sinnvoll sein, mit einem fertiggestellten Teilloos noch in derselben Periode den nächsten Arbeitsvorgang zu starten. Die Nebenbedingung 6-6 erlaubt diesen vorzeitigen Start von Arbeitsvorgängen, sobald ein ausreichender Anteil an Teilloosen abgeschlossen wurde.

$$\sum_{l \in L} OpsR_{a-1,i,j,l} \geq OpsR_{a,i,j,l} \quad \forall (a \in A) \quad (6-6)$$

mit: $OpsR_{a-1,i,j,l}$ Anteil des mit $TV_{Rr,j}$ hergestellten $TV_{Aa,i}$ von Teilloos l des WP $a-1$ [%]
 $OpsR_{a,i,j,l}$ Anteil des mit $TV_{Rr,j}$ hergestellten $TV_{Aa,i}$ von Teilloos l des WP a [%]

Vollständigkeit des Produktionsauftrages

Die folgenden Nebenbedingungen dienen der gesamten Berücksichtigung des Produktionsauftrages. Die Restriktion 6-7 bedingt die Gesamterfüllung der Teillose eines einzelnen Arbeitsvorganges eines Produktionsauftrages.

$$\sum_{l \in L} OpsR_{a,i,j,l} = 100 \quad \forall (a \in A) \quad (6-7)$$

mit: $OpsR_{a,i,j,l}$ Anteil des mit $TV_{Rr,j}$ hergestellten $TV_{Aa,i}$ von Teillos 1 des WP a [%]

Die Bedingung 6-8 ist für die Einplanung aller Arbeitsvorgänge eines Produktionsauftrages über die benötigten Planungsperioden notwendig.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} OpsR_{a,i,j,l} \times Z_{i,j,l} = A^{max} \quad \forall (a \in A) \quad (6-8)$$

mit: $OpsR_{a,i,j,l}$ Anteil des mit $TV_{Rr,j}$ hergestellten $TV_{Aa,i}$ von Teillos 1 des WP a [%]

$Z_{i,j,l}$ 1, wenn $TV_{Aa,i}$ in Periode t einem $TV_{Rr,j}$ zugeordnet ist, sonst 0

Eignung der Ressourcenkonfiguration

Die Durchführung von Arbeitsvorgängen ist ausschließlich auf technisch geeigneten Ressourcenkonfigurationen möglich. Durch Technologievektoren erfolgt der Anforderungs-Fähigkeits-Abgleich aus Abschnitt 6.2.3. Zur Einhaltung der geeigneten Ressourcenkonfiguration dient die Restriktion 6-9.

$$TV_{Rr,j} \in A_i \quad \forall (TV_{Aa,i}) \quad (6-9)$$

mit: $TV_{Rr,j}$ Technologievektor j der RK r

6 Methode zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

Verteilung von Teillofen

Zur Verteilung der Teillofen von Arbeitsvorgängen dienen die folgenden Nebenbedingungen. Der Technologievektor einer bestimmten Ressourcenkonfiguration $TV_{Rr,j}$ kann dabei ausschließlich einem Teillofen eines Arbeitsvorganges in Periode t zugeordnet werden, zur Einhaltung dient Restriktion 6-10.

$$\sum_{i \in I} Z_{i,j,t} \leq 1 \quad \forall (j \in J, t \in T) \quad (6-10)$$

mit: $Z_{i,j,t}$ 1, wenn $TV_{Aa,i}$ in Periode t einem $TV_{Rr,j}$ zugeordnet ist, sonst 0

Ein Teillofen eines Arbeitsvorganges wiederum kann zur Periode t ebenfalls nur einem Technologievektor der Ressourcenkonfiguration $TV_{Rr,j}$ zugewiesen werden. Formalisiert wird dies durch Bedingung 6-11.

$$\sum_{j \in J} Z_{i,j,t} \leq 1 \quad \forall (i \in I, t \in T) \quad (6-11)$$

mit: $Z_{i,j,t}$ 1, wenn $TV_{Aa,i}$ in Periode t einem $TV_{Rr,j}$ zugeordnet ist, sonst 0

Analog gilt die Zuordnung zwischen Teillofen und Modulen. Ein Teillofen wird einem Modul m eines Technologievektors einer Ressourcenkonfiguration in der Periode t zugeordnet, siehe 6-12.

$$\sum_{j \in J} W_{m,j,t} \leq 1 \quad \forall (m \in M, t \in T) \quad (6-12)$$

mit: $W_{m,j,t}$ 1, wenn Modul m in Periode t ein $TV_{Rr,j}$ zugeordnet ist, sonst 0

Bestandteile einer Ressourcenkonfiguration

Für die Ausführung des mathematischen Modells sind die Bestandteile einer Ressourcenkonfiguration zu definieren. Eine Ressourcenkonfiguration besteht in diesem Modell aus mindestens einem Modul m , siehe 6-13.

$$\sum_{m \in M} W_{m,j,t} \geq 1 \quad \forall (j \in J, t \in T) \quad (6-13)$$

mit: $W_{m,j,t}$ 1, wenn Modul m in Periode t ein $TV_{Rr,j}$ zugeordnet ist, sonst 0

Wechsel von Ressourcenkonfiguration

Die Rekonfiguration, d. h. der Wechsel von einer Ressourcenkonfiguration zur anderen verursacht Aufwände. Diese Aufwände werden wiederum mit Kapazitätsressourcen bewertet und müssen in die Gesamtaufwandsberechnung einbezogen werden. Zur Berücksichtigung der Aufwände, verursacht durch Rekonfigurationsvorgänge, dient 6-14.

$$V_{m,j,t} + W_{m,j,t} \leq 1 \quad \forall (m \in M) \quad (6-14)$$

mit: $V_{m,j,t}$ 1, wenn Modul m in Periode t für $TV_{Rr,j}$ rekonfiguriert wird, sonst 0

$W_{m,j,t}$ 1, wenn Modul m in Periode t ein $TV_{Rr,j}$ zugeordnet ist, sonst 0

Bearbeitung eines Teilloses

Die Fertigstellung eines Teilloses erfolgt ohne zeitliche Unterbrechung. Die Fertigstellungsperiode abzüglich der Startperiode entspricht dabei der Multiplikation der Produktionszeit je Arbeitsvorgang t_j^P und der zu produzierenden Menge q_k sowie dem prozentualen $OpsR_{a,i,j,l}$ Anteil.

$$p_{k,a,l}^E - p_{k,a,l}^S = OpsR_{a,i,j,l} \times t_j^P \times q_k \quad \forall (k \in K, a \in A, l \in L) \quad (6-15)$$

mit: $p_{k,a,l}^E$ Fertigstellungsperiode des Teilloses l von WP a aus PO k

$p_{k,a,l}^S$ Startperiode des Teilloses l von WP a aus PO k

$OpsR_{a,i,j,l}$ Anteil des mit $TV_{Rr,j}$ hergestellten $TV_{Aa,i}$ von Teillos l des WP a [%]

t_j^P Produktionszeit zur Durchführung des WP_a mit $TV_{Rr,j}$ [h/Stk.]

6 Methode zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

q_k Auftragsmenge des PO k [Stk.]

Einhaltung des Fälligkeitstermins

Die Planung auf Basis einer termingerechten Fertigstellung und Lieferung erfolgt unter Einhaltung der folgenden Nebenbedingung 6-16. Die Fertigstellungsperiode p_k^E ist dabei stets vor oder spätestens zeitgleich zum Fälligkeitstermin p_k^D .

$$p_k^E - p_k^D \leq 0 \quad \forall (k \in K) \quad (6-16)$$

mit: p_k^E Fertigstellungsperiode des PO k
 p_k^D Fälligkeitstermin des PO k

Die Fertigstellungsperiode p_k^E entspricht der Summe aus der Produktionszeit der benötigten Arbeitsvorgänge sowie der Transportzeit. Die Transportzeit berücksichtigt dabei sowohl die Logistikbeziehungen zwischen den einzelnen Wertschöpfungsschritten als auch die letzte Lieferung zum Endkonsumenten. Formalisiert wird dies in Restriktion 6-17.

$$p_k^S + \sum_{l \in L} \left(\sum_{a \in A} (OpsR_{a,i,j,l} \times t_j^P \times q_k + t_{p(k,a,l),p(k,a-1,l)}^L + t_{p(k,A_{max,l},Z_k)}^L) \right) = p_k^E \quad \forall (k \in K) \quad (6-17)$$

mit: p_k^S Startperiode des PO k
 $OpsR_{a,i,j,l}$ Anteil des mit $TV_{Rr,j}$ hergestellten $TV_{Aa,i}$ von Teillos l des WP a [%]
 t_j^P Produktionszeit zur Durchführung des WP_a mit $TV_{Rr,j}$ [h/Stk.]
 q_k Auftragsmenge des PO k [Stk.]
 $t_{p(k,a,l),p(k,a-1,l)}^L$ Standardsatz der Transportzeit zwischen Arbeitsplatz p der WP a und a-1 des PO k [Std.]

$t_{p(k,A_{max},l,Z_k)}^L$	Standardsatz der Transportzeit zwischen Arbeitsplatz p der letzten WP A_{max} und des Zielortes Z_k des PO k [Std.]
p_k^E	Fertigstellungsperiode des PO k

6.4 Netzwerkbedarfsallokation

Die Netzwerkbedarfsallokation dient dazu festzulegen, welcher Standort im Produktionsnetzwerk welche Produkte bzw. Halbzeuge sowie in welchem Umfang herstellt. Wichtige Entscheidungskriterien zur Verteilung dieser netzwerkinternen Aufträge sind dabei Zeit, Kosten und Qualität, darüber hinaus Reaktionsfähigkeit bzw. Flexibilität.

In der ersten Hauptfunktionsgruppe 6.2 erfolgte die Auftragskonsolidierung sowie der Anforderungs-Fähigkeits-Abgleich. Hierdurch konnten die potenziell relevanten Standorte für die spezifisch benötigten Operationen ausgewählt werden. Im darauffolgenden Abschnitt 6.3 wurde die Planung der Kapazitäten innerhalb des Netzwerks erläutert. Hierbei wurde die Netzwerkbedarfsplanung durchgeführt. Neben der Berechnung der Kapazitätsnachfrage wurde für jede technisch mögliche Ressource das Kapazitätsangebot ermittelt. In diesem Kapitel sollen mittels des heuristischen Optimierungsverfahrens NSGA-II, wie in Abschnitt 5.3.2.1 vorgestellt, Netzwerkkonfigurationen entwickelt werden. Der hierzu entwickelte Ablauf des Algorithmus wird in Abschnitt 6.4.1.2 diskutiert. Davor erfolgt die Diskussion des Einsatzes der Konstruktionsheuristik mittels des Greedy-Algorithmus in Abschnitt 6.4.1.1. Die Ergebnisse aus dem Optimierungsverfahren sind nicht-dominiierende Netzwerkkonfigurationen. Diese Netzwerkkonfigurationen werden anschließend in Abschnitt 6.4.3 bewertet.

6.4.1 Optimierungsalgorithmus zur Generierung von Netzwerkkonfigurationen

6.4.1.1 Konstruktionsheuristik für Transportpläne

Die ersten Versuche ebenfalls den NSGA-II Optimierungsalgorithmus für Transportpläne zu nutzen, zeigten zwar gute zulässige Lösungen an, jedoch war die Laufzeit pro Durchlauf zu hoch. Diese Versuche wurden mittels einer zufälligen Initialisierung durchgeführt. Weiterhin führte dieses Vorgehen zu einer höheren Komplexität des Gesamtsystems. Gängige Verfahren zur schnelleren Generierung von besseren Lösungen und damit der Reduktion der Laufzeit bieten Konstruktionsheuristiken (STÜTZLE & RUIZ 2018). Diese werden genutzt, um zur Eröffnung mit einer (ersten) zulässigen Lösung zu starten. Daher wird neben dem Begriff der Konstruktionsheuristik auch von sogenannten Eröffnungsverfahren gesprochen. Zur schnellen Generierung von Transportplänen fiel daher die Entscheidung zu Gunsten einer Konstruktionsheuristik anstelle einer zweifachen Anwendung des NSGA-II.

Für das betrachtete Optimierungsproblem des Materialflusses wird der Greedy-Algorithmus als zweckmäßige Konstruktionsheuristik angewandt. Dieser Algorithmus eignet sich durch seinen einfachen Aufbau und der hohen Geschwindigkeit für die Generierung guter Initiaillösungen. Für den Materialfluss innerhalb des Produktionsnetzwerkes werden Transportpläne benötigt. Die infrage kommenden Transportalternativen werden für jeden Prozessschritt als Chromosom generiert. Ein Chromosom beinhaltet einen Wert für den jeweiligen Prozessschritt, die Menge, die Transportart sowie die Quelle und Senke, d. h. der Standort, an dem der Wertschöpfungsschritt durchgeführt wird und der nachfolgende Produktionsstandort. Sollten zwei Wertschöpfungsschritte an einem Standort direkt aufeinander folgen, ist keine Transportart hinterlegt und es findet kein Transport statt. Zwei Ansätze auf Basis der Greedy-Konstruktionsheuristik werden eingesetzt, um zu einer schnellen und zweckmäßigen Lösung zu gelangen. Der erste Ansatz verfolgt die Generierung eines Transportplans nach möglichst kurzer Transportzeit. Hierzu wird eine möglichst kurze logistische Durchlaufzeit, d. h. eine möglichst kurze Transportzeit zwischen erstem und letztem Standort für jedes Chromosom ermittelt. Der zweite Ansatz verfolgt analog dazu die Generierung eines kosteneffizienten Transportplans.

6.4.1.2 Ablauf des Algorithmus

Im Folgenden werden die Standorte, die sowohl die technischen Fähigkeiten als auch die verfügbaren Kapazitäten für den Betrachtungszeitraum aufweisen, berücksichtigt. Ziel ist die Generierung von optimalen auftragsbezogenen Netzwerkkonfigurationen und Produktionsplänen. Dabei findet, wie in Abschnitt 5.3.2 beschrieben, der NSGA-II Anwendung. In Abbildung 33 wurde der Ablauf des NSGA-II für die Lösung des vorliegenden Planungsproblems als Pseudo-Code dargestellt.

```

define: genotype = chromosome
initialize: population size N,

(1) randomly generate start population with N genotypes

  iteration
(2)   generate offspring population, sorting and ranking of all
      solutions, start crossover operator to select parent-chromosomes
(3)   start mutation operator to merge and sort population and
      offspring
(4)   identify best chromosomes by crowded-distance-sorting approach
(5) end if stop criterion fulfilled

(6) output pareto-front for non-dominant network configurations and
      production plan

```

Abbildung 33: Übersicht Pseudo-Code

Der Ablauf besteht aus sechs Schritten, diese werden im Folgenden samt ihrer Funktionsweise erläutert.

(1) Population initialisieren

Zunächst erfolgt die Initialisierung des NSGA-II, hierzu wird die Größe der Population N bestimmt. Innerhalb der Initialisierung wird die erste Start-Population mit N Chromosomen generiert. Ein Chromosom stellt, wie in Abschnitt 5.3.2 erläutert, eine mögliche Lösung des Optimierungsproblems dar. Im vorliegenden Fall entspricht ein Chromosom einer realen Netzwerkconfiguration. Diese Netzwerkconfiguration beinhaltet die Prozesskette und die Verbindung zu den einzelnen Standorten, an denen der Prozess durchgeführt wird.

Die Initialisierung erfolgt dabei nach zwei Zielkriterien, einem optimalen Zielfunktionswert hinsichtlich der Kosten und hinsichtlich einer minimalen Durchlauf-

6 Methode zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

zeit. In der vorliegenden Arbeit beschreibt die Durchlaufzeit den Zeitraum zwischen Kundenauftragseingang und der eigentlichen Produktionszeit einschließlich der Belieferung des Kunden. In diesem Sinne stellt die Durchlaufzeit die Summe aus Produktionszeit, Lieferzeit sowie der Frozen Zone dar. Die Frozen Zone bezeichnet einen festgelegten Zeitraum, in dem keine Änderungen mehr gestattet sind. Das Konzept der Frozen Zone schafft für Unternehmen eine höhere Planungssicherheit insbesondere im Bereich der Produktion und Logistik.

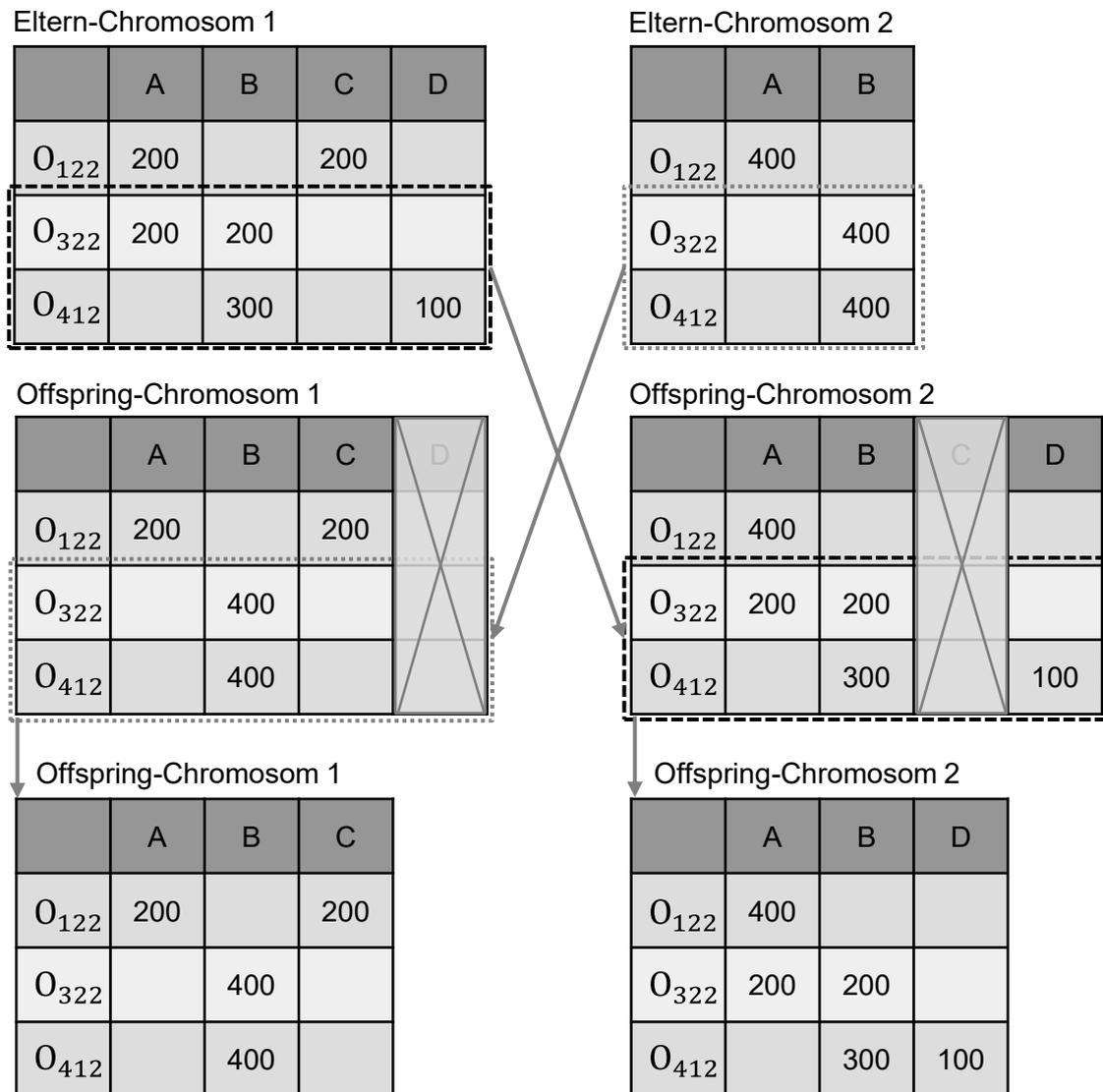
Ziel der Initialisierung hinsichtlich der Kosten sowie der Durchlaufzeit und damit der Generierung der Start-Population ist eine Lösung, die schnell an die Extremwerte heranführt. Hierdurch kann innerhalb weniger Iterationen eine Pareto-Front herbeigeführt werden.

(2) Offspring generieren

Nach der Initialisierung und der dadurch gewonnen Start-Population kann der iterative Prozess erfolgen. Dieser startet, wie in Abbildung 34 dargestellt, mit der Generierung des Offspring (Nachkommen). Der Schritt der Generierung des Offspring beruht auf evolutionäre Prozesse und der Annahme, dass eine Kombination aus guten Eltern-Chromosomen Nachkommen mit besseren Chromosomen erzeugen kann. Zur Identifikation von guten Eltern-Chromosomen erfolgt bei dem NSGA-II zunächst der Sortiervorgang.

Bei diesem Sortiervorgang werden alle Netzwerkkonfigurationen (Chromosomen) aus der Start-Population nach den zwei Zielgrößen Durchlaufzeit und Kosten bewertet. In Abschnitt 5.3.2 wurden hierzu die Achsen nach Durchlaufzeit und Kosten definiert. Nach diesen Zielgrößen werden die einzelnen Chromosomen gemessen und sortiert. Jede Netzwerkkonfiguration wird bei der Sortierung einem Rang zugeordnet. Nachdem die Zuordnung der Lösungen zu den einzelnen Rängen abgeschlossen ist, schließt auch der Sortiervorgang. Die Netzwerkkonfigurationen mit geringem Rang stellen dabei bessere Lösungen dar als Netzwerkkonfigurationen mit höherem Rang. Nachdem die Start-Population sortiert wurde, erfolgt die Selektion der guten Eltern-Chromosomen. Hierzu existieren unterschiedliche Selektionslogiken, die in Forschungskreisen weiterentwickelt, verglichen und bewertet werden (SIVANANDAM & DEEPA 2008, BRIE & MORIGNOT 2005). In der vorliegenden Arbeit wurde der Tournament-Selection-Ansatz gewählt. Dieser Ansatz kennzeichnet sich durch geringe Komplexität, Robustheit sowie eine hohe Ergebnisgüte und wird daher als zweckmäßig erachtet. Die Logik der Tournament-Sel-

ction wählt mindestens zwei Lösungen aus der sortierten Population aus. Anschließend werden die Lösungen anhand der Ränge verglichen. Die Lösungen mit dem geringsten Rang werden als Eltern-Chromosomen weiterverwendet.



Legende:

A, B, ...: Standort
 O_{122} , ...: Herstellungsprozess

Abbildung 34: Schematische Darstellung Offspring und Crossover-Operator

Sobald mindestens zwei Eltern-Chromosomen ausgewählt werden, erfolgt die Anwendung des Crossover-Operators. Dieser hat die Aufgabe, aus den selektierten Eltern-Chromosomen und dem damit abgesonderten Lösungsraum durch Kreuzungen bessere Lösungen zu generieren. Auch beim Crossover-Operator existiert eine Vielzahl von Logiken. Einen Überblick über Standard-Crossover-Operatoren

6 Methode zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

und anwendungsspezifische Variationen hierzu finden sich in UMBARKAR & SHETH (2015). Die in dieser Arbeit verwendete Crossover-Operator Logik orientiert sich an dem Substring-Crossover-Operator Ansatz von TSAI ET AL. (2015). Dieser zweidimensionale Substring-Crossover-Operator Ansatz wurde bereits zur effizienten Einsatzplanung von Flugzeugen erprobt (TSAI ET AL. 2015). Nach dieser Operator Logik wird zunächst zufällig eine Zeile der selektierten Eltern-Chromosomen ausgewählt. Die restlichen Zeilen der Eltern-Chromosome werden zufällig kombiniert und ergeben somit ein neues Offspring-Chromosom, siehe Abbildung 34.

Wichtig ist, dass bei dem vorliegenden Planungsproblem die Anzahl der Zeilen gleichbleibt, da zur Herstellung des jeweiligen Produkts die Durchführung der gegebenen Prozessschritte zwingend erforderlich ist. Die Anzahl der Spalten hingegen ist variabel, d. h. durch die Kreuzung des Crossover-Operators können Netzwerkkonfigurationen mit mehr Standorten (mehr Spalten) oder aber eine Konsolidierung der Standorte (weniger Spalten) eintreten.

Nach der Selektion der Eltern-Chromosomen und dem Einsatz des Crossover-Operators erfolgt die Anwendung des Mutation-Operators.

(3) Population und Offspring zusammenführen und sortieren

Der vorherige Selektionsprozess führt zu einer Eingrenzung des Lösungsraums. Hierdurch kann es zu einem typischen Problem des genetischen Algorithmus kommen, der Konvergenz in lokale Optima. Zur Vermeidung dieses Problems erfolgt die gezielte Diversität der Lösung durch den Mutation-Operator. Weiterhin verfolgt der Mutation-Operator, wie auch der Crossover-Operator, das Ziel eine möglichst gute Offspring-Population zu bilden. Hierzu führt der Mutation-Operator Veränderungen an einzelnen oder an mehreren Parametern der Chromosomen durch. Da in der vorliegenden Problemstellung die Genotypen real kodiert sind und den Phänotypen entsprechen, erfolgt die Veränderung durch Addition und Subtraktion von Parametern. In Abbildung 34 ist hierzu beispielhaft erkennbar, dass jede Zeile einen einzelnen Herstellungsprozess repräsentiert. Die Summe einer Zeile entspricht spaltenübergreifend (standortübergreifend) der herzustellenden Auftragsmenge in einer Planungsperiode. Die Verteilung innerhalb des auftragsbezogenen Netzwerks ist dabei variabel. Aus einem Chromosom können durch den Einsatz des Operators mehrere Mutationsvarianten entstehen. Das Offspring-Chromosom 1 übernimmt den Herstellungsprozess O_{122} mit Standort A und C vom Eltern-Chromosom 1. Weiterhin erhält das Offspring-Chromosom 1 die Herstellungsprozesse O_{322} und O_{412} vom Eltern-Chromosom 2. Durch diesen

Vorgang erhöht sich die Produktion an Standort B um 100 Einheiten. Im gleichen Zug reduziert sich die Menge an Standort D auf 0 Einheiten. Das Offspring-Chromosom 1 besteht somit aus den drei Standorten A, B und C. Analog dazu erfolgt die Generierung des Offspring-Chromosom 2.

Aus einer guten Eltern-Population aus der Tournament-Selection wird durch dieses beschriebene Mutationsverfahren versucht, eine noch bessere Offspring-Population zu erzielen. Nach der Durchführung der zwei Operatoren Crossover und Mutation sowie der durch diesen Prozess neu generierten Offspring-Population wird diese innerhalb des dritten Schrittes mit der ursprünglichen Eltern-Population zusammengeführt. Der sich aus dieser Zusammenführung ergebende neue Lösungsraum wird durch den zweiten Sortiervorgang bewertet.

(4) Die besten Chromosomen identifizieren

Die zweite Sortierung aus Schritt drei weist als Ergebnis Pareto-Fronten mit unterschiedlichen Rängen auf. Innerhalb des vierten Schrittes wird aus dem neuen Lösungsraum eine neue Eltern-Population generiert, diese weist die Populationsgröße N auf und bildet sich aus den besten Rängen des zweiten Sortiervorgangs (DEB ET AL. 2002).

Auf Basis des Crowded-Distance-Sorting wird die neue Eltern-Population bestimmt. Die detaillierte Beschreibung des Crowded-Distance-Sorting erfolgte bereits in Abschnitt 5.3.2. Alle Lösungen, die über die Populationsgröße N hinausgehen, werden nicht weiterverwendet und somit verworfen.

(5) Abbruchkriterium

Das Abbruchkriterium dient der Vermeidung von unnötig hohen Rechenzeiten, die in keinem Verhältnis zur weiteren Güte der Ergebnisse stehen. Das Abbruchkriterium stellt somit den Trigger für die Beendigung der automatischen Iterations Schleifen des Optimierungsalgorithmus dar.

Der Abbruch des Optimierungsalgorithmus kann dabei nach unterschiedlichen Ansätzen ausgelöst werden. Beispielsweise kann der Abbruch nach einer bestimmten Laufzeit des Algorithmus und somit zeitbasiert erfolgen. Ein weiterer Ansatz wäre der Abbruch nach der Erreichung von gewissen Grenzwerten. Weiterhin kann ein Abbruchkriterium durch die bestimmte Anzahl durchlaufener Iterationen und damit einer bestimmten Anzahl an Generationen erfolgen. All diese benannten Ansätze weisen gewisse Vor- und Nachteile auf. Auch eine Kombination von Ab-

6 Methode zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

bruchkriterien ist möglich, womit jedoch häufig eine höhere Komplexität einhergeht. Unterschiedliche Versuche und Durchläufe (siehe Abbildung 35, beispielsweise Pareto-Fronten Generationen) haben gezeigt, dass nach 20 Generationen sehr gute Lösungen gefunden werden können. Weitere Generationen führten zu einer längeren Rechenlaufzeit zur Lösung des Planungsproblems, jedoch kaum zu besseren Ergebnissen. Daher erfolgt der Abbruch des Algorithmus nach einem stabilen und einfachen iterationsbasierten Kriterium.

(6) Pareto-Front ausleiten

Nach Auslösung des Abbruchkriteriums erfolgt die Ausleitung der Pareto-Front nach der letzten Generation. Mit der Ausleitung schließt der NSGA-II. Das Ergebnis sind nicht-dominierende Netzwerkkonfigurationen und die dazugehörigen Produktionspläne.

6.4.2 Erweiterungen des Optimierungsalgorithmus

Zwei vielversprechende Konzepte für die Produktionsplanung von dynamischen Produktionsnetzwerken aus dem Dienstleistungssektor wurden bereits in Kapitel 5 erläutert. Zum einen die virtuelle Kapazitätsgrenze und zum anderen dynamische Preisbildungsverfahren. Im Folgenden wird erläutert, wie diese in das System zur Produktionsplanung integriert werden können.

Zur automatisierten Ermittlung des Surge Multipliers (SM) erfolgte die Implementierung einer weiteren Funktion. Jedes neu generierte Chromosom erhält bei der Initialisierung sowie Optimierung einen zugehörigen SM. Die Funktion berechnet dabei am einzelnen Standort die durchschnittliche Kapazitätsauslastung je Prozessschritt. Abhängig von der Auslastung erhält jede Kombination aus Standort und Prozessschritt einen SM. Nachdem für jeden Eintrag innerhalb des Chromosoms ein SM ermittelt wurde, kann ein Averaged-Surge-Multiplier für das Chromosom berechnet werden. In Abschnitt 5.3.4 erfolgte die Modellierung des SM für drei Auslastungszustände, die in der vorliegenden Arbeit angewendet werden. Durch die Erweiterung des Optimierungsalgorithmus um den Surge Multiplier Ansatz wird erhofft, dass sich Über- und Unterauslastung durch das Anreizsystem der dynamischen Preisbildungsverfahren des Surge Pricing intelligent steuern lässt und dass das Produktionsnetzwerk dadurch effizienter betrieben werden kann.

Die virtuelle Kapazität wird im Optimierungsalgorithmus durch zusätzliche Produktionszeit pro Prozessschritt bezogen auf einen Tag abgebildet. Die zusätzliche Produktionszeit berechnet sich aus der erwarteten Stornierung von Aufträgen und

der damit zusammenhängenden Wertschöpfungszeit, siehe Modellierung in Abschnitt 5.3.3. Jeder einzelne Tag des betrachteten Zeitraums wird simuliert. Dabei wird unterschieden zwischen Aufträgen, die bereits eingelastet und in Produktion sind, sowie neu zu verplanenden Aufträgen. In der vorliegenden Arbeit wird ein Betrachtungszeitraum von 60 Tagen simuliert, hiervon entfallen 14 Tage auf die Frozen Zone.

6.4.3 Bewertung und Auswahl der Netzwerkkonfiguration

Mit der Ausleitung der Pareto-Front und damit der Generierung von unterschiedlichen Produktionsnetzwerkkonfigurationen endet der in den vorherigen Abschnitten beschriebene Optimierungsalgorithmus.

Die Abbildung 35 zeigt eine Auswahl an Ergebnissen aus dem NSGA-II Optimierungsalgorithmus. Jeder Punkt stellt dabei ein Chromosom dar. Ein Chromosom wiederum repräsentiert eine Produktionsnetzwerkkonfiguration für einen jeweiligen Auftrag. Innerhalb der ersten fünf Generationen erscheint die Verteilung noch diffus. Nach der zehnten Generation sind die Züge der Pareto-Front erkennbar. Nach der 20. Generation des NSGA-II konnte die Pareto-Front hinsichtlich Durchlaufzeit und Kosten der Netzwerkkonfigurationen signifikant verbessert werden. Weitere Versuche haben gezeigt, dass eine weitere Verdopplung der Anzahl der Generationen kaum zu einer Verbesserung der Population geführt hat. Folglich wurde, um Zeit und Rechenleistung einzusparen, das Abbruchkriterium auf 20 Generationen gesetzt.

Harte Faktoren wie beispielsweise die Durchlaufzeit, Herstell- und Logistikkosten konnten dabei umfassend berücksichtigt werden. Weiche Faktoren hingegen wie beispielsweise die Erfahrung der einzelnen Standorte, politische Aspekte z.B. eine bevorzugte Produktion in der EU, Emissionen der einzelnen Standorte und Strecken konnten bisher nicht hinreichend durch den Optimierungsalgorithmus adressiert werden. Die Pareto-Front erlaubt jedoch nachträglich die Berücksichtigung einiger dieser weichen Faktoren beispielsweise durch Methoden der präskriptiven Entscheidungstheorie. Hierdurch kann dem Auftraggeber oder Produktionsnetzwerkverantwortlichen beschränkte Einflussnahme auf die entscheidende Netzwerkkonfiguration gestattet werden. Der *Analytische Hierarchieprozess* ist hierbei ein gängiges und zweckmäßiges Instrument. Im Gegensatz zur *Nutzwertanalyse* kennzeichnet sich dieser durch eine differenziertere Betrachtung der Lösungen sowie einem stringenten paarweisen Vergleich.

6 Methode zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

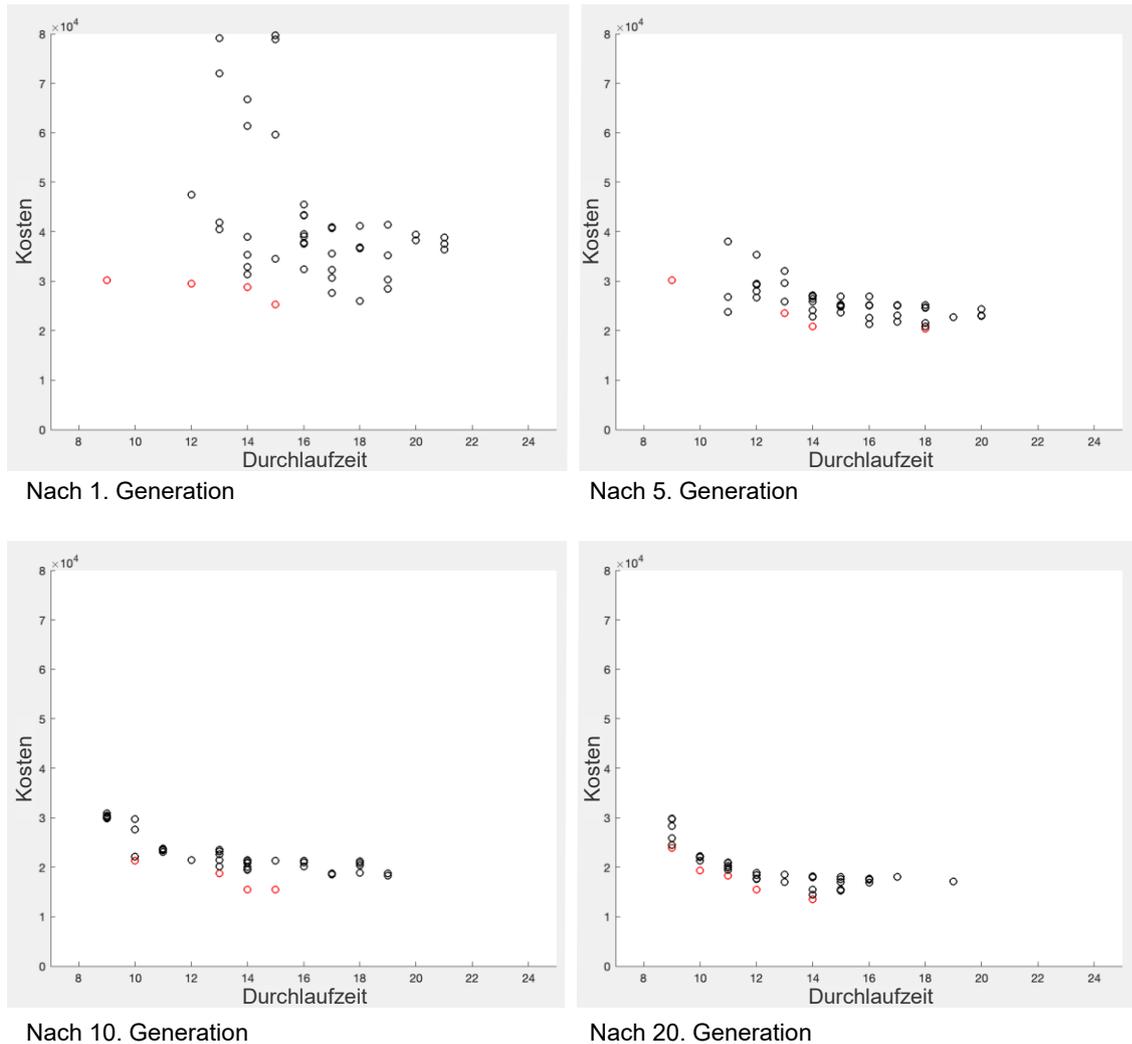


Abbildung 35: Ergebnisse des NSGA-II für Netzwerkconfigurationen: Vergleich der Zielfunktionswerte und der dazugehörigen Pareto-Fronten nach 1, 5, 10 und 20 Generationen

Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit der automatisierten Auswahl der zweckmäßigsten Produktionsnetzwerkconfiguration. Hierbei erfolgt zunächst die Auswahl nach Lösungen, die unterhalb der maximalen Durchlaufzeit liegen. Ausgehend von diesem Lösungsraum wird die Configuration mit den geringsten Kosten ausgewählt.

6.5 Fazit

Die Methode zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken wurde im vorliegenden Kapitel erläutert. In Verbindung mit den entwickelten Modellen und Elementen zur Bestimmung von Netzwerkkonfigurationen aus Kapitel 5 ergibt sich das Gesamtsystem. Die entwickelte Methode fußt dabei auf drei Hauptfunktionsgruppen, der globalen Produktionsnetzwerkplanung, der Netzwerkbedarfsplanung sowie der Netzwerkbedarfsallokation. Im ersten Methodenschritt in Abschnitt 6.2 erfolgte die Auftragskonsolidierung kombiniert mit einer anschließenden unternehmensspezifischen Frozen Zone. Anschließend erfolgte die Ableitung der Prozessliste sowie der Anforderungs-Fähigkeits-Abgleich mittels des Ansatzes generischer Technologieketten. Hierzu wurden Technologiefaktoren und -vektoren angewandt, um die einzelnen benötigten Arbeitsvorgänge und die technisch möglichen Produktionsverfahren zu analysieren. Die Kapazitätsplanung erfolgte innerhalb der Netzwerkbedarfsplanung durch die Übertragung des Ansatzes der virtuellen Kapazitätsgrenzen aus dem Dienstleistungssektor. Ferner wurden die Rekonfigurationsmöglichkeiten der Produktionssysteme durch den Wechsel von Ressourcenkonfigurationen (Abschnitt 6.3) berücksichtigt. Das Vorgehen zur Netzwerkbedarfsallokation wurde in Abschnitt 6.4 beschrieben und erfolgte über den Einsatz unterschiedlicher Heuristiken. Durch den hohen Grad der Komplexität einer solchen Problemstellung und der Genügsamkeit einer näherungsweise Lösung im Bereich der Produktionsplanung auf Netzwerkebene wurde zur Lösung der Problemstellung ein heuristisches Verfahren gewählt. Hierdurch konnten Lösungsräume und Entscheidungsvorlagen auf Netzwerkebene automatisch generiert werden. Anreize zur Ermittlung kostenminimaler Netzwerkkonfigurationen wurden durch den erstmaligen Einsatz des Surge Multiplier, einem Konzept aus der dynamischen Preisbildung, im produktionstechnischen Umfeld erprobt. Zur Auswahl von Netzwerkkonfigurationen nach mehreren Kriterien lassen sich nicht-dominante Pareto-Lösungen ausgeben. Inwiefern die obigen Annahmen und Erweiterungen, auf denen das System zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken beruht, zutreffen, wird im folgenden Kapitel prototypisch erprobt und diskutiert.

6 Methode zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken

7 Industrielle Anwendung und prototypische Realisierung

7.1 Übersicht

Im vorliegenden Kapitel erfolgt gemäß der in Abschnitt 1.3 beschriebenen Design Research Methodology von BLESSING & CHAKRABARTI (2009) die DS-II Phase. Das in dieser Arbeit entwickelte System zur kurzfristigen Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken dient der kostengünstigen und schnellen Herstellung von kundenindividuellen Produkten. Durch eine prototypische Realisierung soll das System erprobt werden.

Teile dieses Systems wurden im Rahmen des Forschungsprojektes InnoCyFer entwickelt. Weitere Teile wurden mit Industriepartnern und in Expertenkreisen innerhalb der Gremien- und Verbandsarbeit diskutiert und bewertet. Die Erprobung der Funktion des entwickelten Systems erfolgte prototypisch in Form eines Demonstrators (BE ISA ET AL. 2018) sowie innerhalb einer industriellen Pilotanwendung (BE ISA ET AL. 2020).

In Abschnitt 7.2 wird die industrielle Pilotanwendung im Bereich der Konsumgüterindustrie erläutert. Das Anwendungsszenario bildet hierbei die Produktion von kundenindividuellen elektrischen Küchengeräten.

In Abschnitt 7.3 erfolgt die simulationstechnische Umsetzung und Validierung des Systems. Hierzu werden Vergleichs- und Referenzmodelle entwickelt. An diesen Planungsmodellen wurden unterschiedliche Produktionsszenarien erprobt. Der Software-Demonstrator liefert hierbei wichtige Ergebnisse zur quantitativen Beurteilung der generierten Produktionsnetzwerkkonfigurationen.

Abschließend erfolgt in Abschnitt 7.4 die Bewertung des entwickelten Gesamtsystems sowie die Bewertung der Zielerreichung, aber auch der Wirtschaftlichkeit.

Alle Daten und Informationen des folgenden Fallbeispiels stammen aus einer realen Anwendung eines Industrieunternehmens. Jedoch wurden Produktions- und Standortdaten (u.a. Taktzeiten, Durchlaufzeiten, Herstellkosten) in verfremdeter Form genutzt, daher sind Schlussfolgerungen über die Performanz einzelner Produktionsbereiche und -standorte des Unternehmens nicht mehr möglich.

7.2 Pilotanwendung des entwickelten Systems

7.2.1 Anwendungsszenario

Die industrielle Pilotanwendung erfolgt im Bereich der Konsumgüterindustrie. Dabei wird das entwickelte System zur Produktionsplanung beispielhaft zur Herstellung kundenindividueller Küchengeräte erprobt. Die Herausforderungen dabei sind, wie eingangs erläutert, vielfältig. Das Unternehmen zielt u. a. auf eine höhere Flexibilität ab. Dadurch kann eine kurzfristige Verlagerung der Kapazitätsnachfrage auf andere unternehmensinterne Produktionssysteme bzw. -standorte realisiert werden. Hierzu bedarf es neben hoher technischer, logistischer und organisatorischer Flexibilität der Abbildung der Fähigkeiten der einzelnen Standorte. Weiterhin ist ein Planungssystem zur Generierung von auftragsbezogenen Produktionsnetzwerkkonfigurationen für eine automatisierte Entscheidungsunterstützung erforderlich. Hierzu dient der Einsatz des entwickelten Systems.

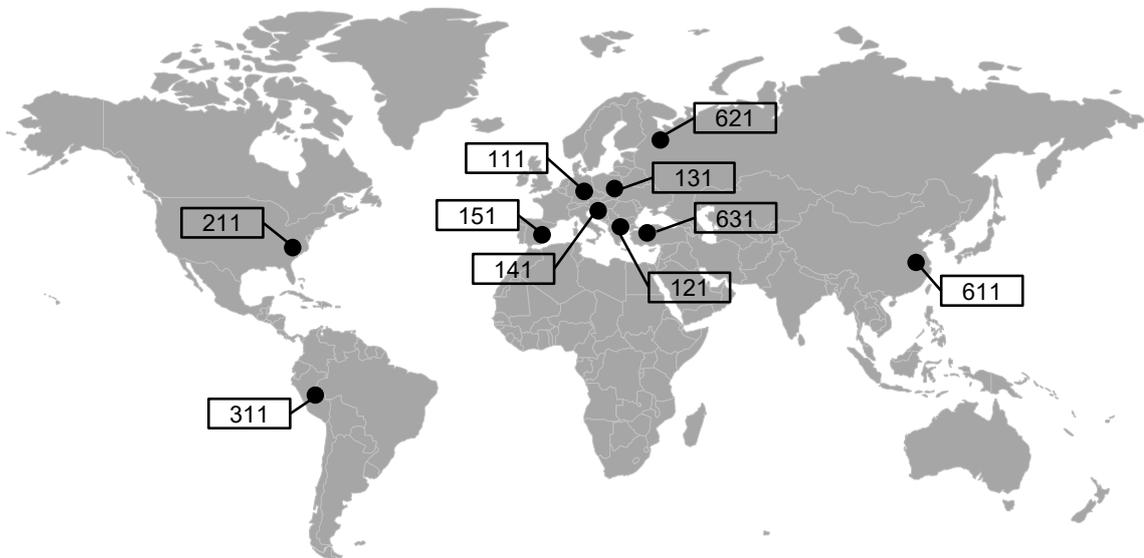
Für das Anwendungsszenario wurden zwei Produktfamilien und fünf Herstellprozessschritte gemeinsam mit den Industriepartnern ausgewählt. Weiterhin wurden 220 kundenindividuelle Aufträge simuliert, die über einen Planungshorizont von zwölf Wochen in das bestehende Produktionsprogramm eingestreut wurden. Hierdurch erfolgte eine Kombination von Make-to-Stock- und Make-to-Order-Aufträgen. Durch dieses Vorgehen konnte ein realitätsnaher Produktionsablauf simuliert werden.

In Abschnitt 7.2.2 erfolgt die Nachbildung des Produktionsnetzwerkes. Ebenfalls wurden die berücksichtigten Prozessschritte und Fähigkeiten der einzelnen Standorte abgebildet.

7.2.2 Produktionsnetzwerk und Herstellungsprozesse

Zur automatisierten Entscheidungsunterstützung bedarf es der informationstechnischen Abbildung des Produktionsnetzwerkes, der einzelnen Ressourcen an den Standorten und der Herstellungsprozesse. Die Modelle und Matrizen zum Abgleich der fertigungstechnischen Anforderungen eines Produkts und der verfügbaren Fähigkeiten an den einzelnen Standorten wurden bereits in Kapitel 5 beschrieben. Die folgende Abbildung 36 zeigt die realitätsnahe Modellierung des internen Produktionsnetzwerkes der Pilotanwendung im Bereich der Konsumgüterindustrie. Für die Pilotanwendung wurden zehn Produktionsstandorte und fünf Herstel-

lungsprozessschritte für die 220 kundenindividuellen Aufträge betrachtet. Zur eindeutigen Kennzeichnung der Standorte wurde die Standort-ID mit einem Array von drei Zeichen eingeführt. Die erste Ziffer steht für den Kontinent, die zweite für das jeweilige Land und die dritte Ziffer für den Ort. Neben der eindeutigen Beschreibung des Standorts wurden ebenfalls die einzelnen Fähigkeiten mit Identifikatoren ausgestattet.



Produktionsnetzwerk

Standort ID	Standort	Fähigkeit ID				
		1220	3220	5160	7220	7510
111	München	1	1	1	1	1
121	Athen	1	1	0	0	1
131	Warschau	0	1	0	1	1
141	Ljubljana	1	0	1	1	0
151	Barcelona	1	0	0	1	0
211	Charlotte	1	0	0	1	1
311	Lima	0	1	1	0	1
611	Nanjing	1	1	0	1	0
621	St. Petersburg	0	0	1	1	1
631	Istanbul	0	1	1	1	0

Abbildung 36: Modellierung des Produktionsnetzwerkes der Pilotanwendung für die Konsumgüterindustrie

Die Identifikation der einzelnen Fähigkeiten erfolgt nach der DIN 8580 zur Klassifizierung der Fertigungsverfahren und der VDI-RICHTLINIE 2860 zur Handha-

7 Industrielle Anwendung und prototypische Realisierung

bungstechnik. Zur Herstellung der Küchengeräte werden folgende fünf Fähigkeiten benötigt: Spritzgießen (1220), Bohren (3220), Bedrucken (5160), Vereinigen (7220), Prüfen (7510). Aus der Abbildung 36 ist zu entnehmen, dass ausschließlich der Standort 111 alle fünf benötigten Fähigkeiten besitzt. Alle weiteren betrachteten Standorte besitzen mindestens eine der fünf relevanten Fähigkeiten. Durch Kombinationen von mindestens zwei Standorten kann der Lösungsraum und damit die Anzahl an zweckmäßig generierten Netzwerkkonfigurationen für die einzelnen kundenindividuellen Aufträge vergrößert werden.

7.2.3 Planung kundenindividueller Aufträge

Für die prototypische Realisierung des Planungssystems wurden 220 kundenindividuelle Aufträge simuliert. In Tabelle 7-1 sind 20 Aufträge im Planungshorizont dargestellt.

Tabelle 7-1: Exemplarische kundenindividuelle Aufträge im Planungshorizont

Auftragsnr.	Datum	Max. DLZ	Lieferdatum	Produktfamilie	Seriennummer	Stückzahl
2019080021	22.08.19	42	03.10.19	Küchengerät H	HA393020	1729
2019080022	22.08.19	28	19.09.19	Küchengerät S	SF325010	1427
2019080023	22.08.19	41	02.10.19	Küchengerät H	HA432040	114
2019080024	23.08.19	24	16.09.19	Küchengerät S	SF452010	1661
2019080025	23.08.19	44	06.10.19	Küchengerät H	HC995010	156
2019080026	24.08.19	37	30.09.19	Küchengerät S	SF452010	1739
2019080027	25.08.19	32	26.09.19	Küchengerät H	HA432080	1420
2019080028	25.08.19	28	22.09.19	Küchengerät S	SF355010	125
2019080029	25.08.19	25	19.09.19	Küchengerät S	SE101010	1564
2019080030	25.08.19	42	06.10.19	Küchengerät H	HA388010	1540
2019080031	29.08.19	37	05.10.19	Küchengerät H	HA386010	89
2019080032	29.08.19	35	03.10.19	Küchengerät H	HA385010	1523
2019080033	31.08.19	23	23.09.19	Küchengerät S	SE131010	1480
2019080034	31.08.19	38	08.10.19	Küchengerät S	SF503030	1633
2019080035	31.08.19	43	13.10.19	Küchengerät S	SF325030	147
2019090001	02.09.19	45	17.10.19	Küchengerät H	HC983010	208
2019090002	04.09.19	53	27.10.19	Küchengerät H	HA432040	120
2019090003	04.09.19	30	04.10.19	Küchengerät S	SF603020	68
2019090004	04.09.19	27	01.10.19	Küchengerät H	HA251030	1560
2019090005	05.09.19	35	10.10.19	Küchengerät H	HA438010	213

7.2 Pilotanwendung des entwickelten Systems

Ein kundenindividueller Auftrag besteht dabei aus einer Auftragsnummer, einem Bestelldatum und einem Wunschlieferdatum sowie der Zuordnung zur Produktfamilie. Diese Zuordnung bestimmt das Basisprodukt (Küchengerät S oder H), aus dem das kundenindividuelle Produkt durch die ausgewählten Herstellungsprozessschritte gestaltet werden kann. Die Auftragsnummer dient dabei als Identifikator.

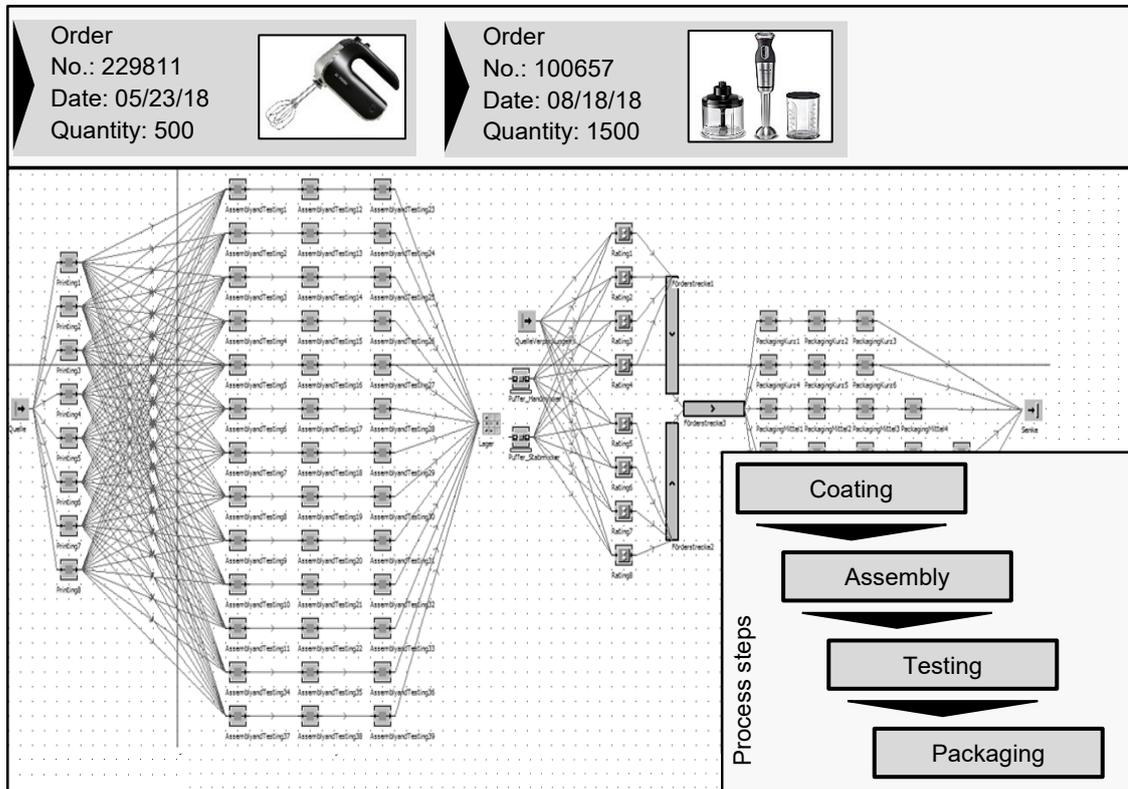


Abbildung 37: Aufträge und betrachtete Prozessschritte (in Anlehnung an BE ISA ET AL. 2020)

In Abbildung 37 sind die kundenindividuellen Aufträge und die zugehörige Konfiguration abgebildet. Hierzu wurden die Prozessschritte mittels der Softwareapplikation Tecnomatix® Plant Simulation von Siemens PLM Software simuliert. Durch die konsequente Aufteilung der Herstellung in einzelne Prozessschritte kann eine produktunabhängige Produktionsplanung erfolgen, wie in Kapitel 6 erläutert. Dies ermöglicht auch die effiziente Herstellung einer hohen Produktvielfalt in kleinen Losgrößen, auch bekannt unter dem Ausdruck High-Mix, Low-Volume.

7.2.4 Logistikbeziehungen und verwendete Transportmittel

In Kapitel 5 erfolgte bereits die Beschreibung der Logistikbeziehungen, sowie die Kodierung der Transportmittel (siehe Tabelle 7-2).

7 Industrielle Anwendung und prototypische Realisierung

Für die Pilotanwendung werden die Transportmittel 96-Straßenfracht (LKW), 98-Straßenfracht (Paketdienst) und 99-Luftfracht berücksichtigt. Das Transportmittel 97-Seefracht wird in der Pilotanwendung der kundenindividuellen Konsumgüterindustrie nicht verwendet. Grund dafür sind die langen Lieferzeiten der Seefracht und dadurch die Nichteinhaltung der geplanten DLZ. Für andere kundenindividuelle Anwendungen, insbesondere mit längeren Herstellungszeiträumen bzw. mit gut prognostizierbaren Vorprodukten oder aufgrund der Produkteigenschaften (z.B. schwere, großvolumige Produkte), ist das Transportmittel 97-Seefracht durchaus zweckmäßig.

Die Transport-ID 95 dient als Dummy-Transportmittel. Diese ID wird programmtechnisch verwendet, sofern kein externer Transport zwischen Standorten durchgeführt werden muss.

Tabelle 7-2: Kodierung der Transportmittel

Transport-ID	Beschreibung	Gewicht	Kosten
96	Straßenfracht (LKW)	> 200 kg	
97	Seefracht	-	
98	Straßenfracht (Paketdienst)	< 200 kg	
99	Luftfracht	-	

7.3 Simulationstechnische Umsetzung und Validierung

7.3.1 Prototypische Implementierung

Die prototypische Implementierung erfolgte über einen Software-Demonstrator, dessen Architektur sich in drei Ebenen gliedert. Auf der obersten zum Nutzer orientierten Ebene liegt die grafische Benutzerschnittstelle. Innerhalb der mittleren Ebene wurde die Greedy-Konstruktionsheuristik sowie der NSGA-II über die MathWorks-Matlab-Softwareumgebung aufgesetzt. Auf der untersten Ebene des Software-Demonstrators befinden sich die semantischen Informationsmodelle aus Abschnitt 5.2. Für die Datengrundlage der Pilotanwendung wurde Microsoft Excel Software eingesetzt.

7.3.2 Planungsmodelle

Für die Validierung des Planungssystems wurden zwei Planungsmodelle entwickelt. Zum einen das neu entwickelte dynamische Modell mit virtueller Kapazität, das als Referenzmodell dient, zum anderen ein Vergleichsmodell, das die konventionelle Produktionsplanung in Netzwerken beschreibt. Die Funktion des Vergleichsmodells ist die Simulation der Realität und fußt auf Experteneinschätzungen. In Tabelle 7-3 wurden vier Eigenschaften aufgelistet, in denen sich das Referenzmodell von dem Vergleichsmodell durch eine höhere Flexibilität bzw. Variabilität unterscheidet.

Tabelle 7-3: Planungsmodelle zur Validierung

	Vergleichsmodell	Referenzmodell
Netzwerkstruktur	Fix	Flexibel
Rekonfiguration auf Systemebene	Nicht möglich	Möglich
Wechsel der Transportreihenfolge	Nicht möglich	Möglich
Veränderung des Kapazitätsangebots	Nicht möglich*	Möglich

Legende:

*Im Vergleichsmodell 2 ist eine Veränderung des Kapazitätsangebots möglich

Die Planungsmodelle wurden mit Experten aus der Industrie diskutiert. Unstimmigkeiten existierten in der Beschreibung der Eigenschaft *Veränderung des Kapazitätsangebots*. Aus der Diskussion ging hervor, dass kurz- und mittelfristig im konventionellen Vergleichsmodell, das sich bei Unternehmen im Einsatz befindet, durchaus eine Veränderung des Kapazitätsangebots um etwa 30 % möglich ist. Beispielsweise kann kurzfristig zur Erhöhung des Kapazitätsangebots die Einführung von Nachtschichten oder Zusatzschichten an Wochenenden erfolgen. Zur kurz- bis mittelfristigen Reduktion der personellen Kapazitäten kann beispielsweise Urlaub oder, unter bestimmten Voraussetzungen und in bestimmten Regionen, Kurzarbeit beantragt werden. Die beschriebenen Kapazitätsanpassungen erfolgen jedoch nicht automatisiert, sondern durch hohen Abstimmungsaufwand sowie häufig unternehmenspolitische Managemententscheidungen. Folglich verursacht allein die Informationsbeschaffung und die Entscheidungsfindung zur Kapazitätsanpassung hohe Kosten. Die Veränderung des Kapazitätsangebots in der vorliegenden Arbeit weist einen deutlich größeren Umfang auf. Zudem erfolgen die Veränderungen des Kapazitätsangebots im Referenzmodell teilautomatisiert. Aus

der Diskussion mit Industrievertretern und zur besseren Vergleichbarkeit der Planungsmodelle wurde daher weiterhin das Vergleichsmodell 2 erprobt, dieses erlaubt die Veränderung des Kapazitätsangebots.

Eine ganzheitliche Erprobung der entwickelten Planungsmodelle lässt sich in einem realen Produktionsnetzwerk nur unter hohen Aufwänden sowie technischen und wirtschaftlichen Risiken durchführen. Um dennoch eine Aussage über die Performanz des dynamischen Modells mit virtueller Kapazität zu erhalten, wurden die beschriebenen Planungsmodelle mittels unterschiedlicher Produktionsszenarien in Abschnitt 7.3.3 erprobt.

7.3.3 Testplan und Produktionsszenarien

Im Fokus des folgenden Abschnitts befindet sich die Gestaltung von Produktionsszenarien zur Erprobung der zuvor entwickelten Planungsmodelle. Mittels unterschiedlicher Produktionsszenarien werden reale Produktionszustände simuliert. Für die einzelnen Produktionsszenarien werden mit Hilfe der entwickelten Planungsmodelle Auftragspläne ausgeleitet. Kennzahlen beschreiben die Performanz der Auftragspläne und erlauben einen Vergleich, die Diskussion dieser erfolgt in Abschnitt 7.4. Die Methode der Szenariotechnik wird angewendet, um zukünftig auftretende Zustände oder Entwicklungen umfassend zu analysieren. Hierbei werden hypothetische Situationen, die eintreten können, sowie damit einhergehende Folgen visualisiert. Weiterhin können durch die Methode der Szenariotechnik auch Maßnahmen und Handlungsalternativen integriert werden. Dadurch kann aktiv Einfluss auf die Folgen einer zukünftigen Situation ausgeübt werden. In dieser Arbeit wurde im Bereich der operativen Produktionsplanung die Szenariotechnik angewendet, um die Funktions- und Verhaltensweise der oben beschriebenen Planungsmodelle zu simulieren.

Zur Erprobung der Planungsmodelle wurde ein strukturierter Testplan entwickelt. Dieser Testplan umfasst drei Cluster mit insgesamt zwölf Produktionsszenarien, siehe Tabelle 7-5 sowie ein Datenset mit Standardwerten, siehe Tabelle 7-4. Jedes Cluster deckt dabei eine Dimension zur kurzfristigen Reaktion auf Nachfrageschwankungen im Netzwerk ab. Das Datenset mit diversen Parametern und dazugehörigen Standardwerten wurde entwickelt, um die gleiche Ausgangslage und dadurch eine Vergleichbarkeit der resultierenden Auftragspläne zu schaffen. Die Auswahl der Standardwerte erfolgte zum einen aus Literaturquellen sowie aus Diskussionen mit Industrieexperten. Zum anderen führten Vorversuche des NSGA-II zu dieser Auswahl. Bei den durchgeführten Vorversuchen wurde die Ergebnisgüte

7.3 Simulationstechnische Umsetzung und Validierung

des Algorithmus im Verhältnis zur aufgebrauchten Rechenzeit und -leistung gebracht.

Tabelle 7-4: Datenset mit Standardwerten für den Testplan

Kategorie		Standardwerte
A	Populationsgröße	50
A	Anzahl Generationen	15
A	Wahrscheinlichkeit Crossover	100 %
A	Wahrscheinlichkeit Mutation	50 %
A	Wahrscheinlichkeit Clean-Up Mutation	10 %
B	Opportunitätskosten	1.500 €
B	Strafgebühren	5.000 €
C	Auslastungsgrenzen	≤ 50 %; 50 % - 75 %; ≥75 %
C	Produktmix (Verhältnis Produkt H/S)	50 %/ 50 %
C	Stornierungsrate	0 %

Innerhalb des Datensets (siehe Tabelle 7-4) können drei Parameterkategorien unterschieden werden. Bei Kategorie A handelt es sich um Parameter des NSGA-II. In Kategorie B wurden Opportunitätskosten und Strafgebühren aufgenommen. Diese Parameter dienen dazu, das Modell nicht isoliert zu betrachten, sondern externe Einflüsse zuzulassen. Bei den in Kategorie B gewählten Standardwerten handelt es sich um Annahmen, die mit Experten diskutiert wurden. Allerdings können diese je nach Branche, Produkt und Lokation stark voneinander abweichen. Die Parameter der Kategorie C werden durch die unterschiedlichen Produktionsszenarien des Testplans variiert. Nach der Ceteris Paribus Klausel erfolgt innerhalb der Erprobung ausschließlich eine Parameteränderung pro Szenario. Dieser Ansatz wird verfolgt, um die Kausalität zwischen der Parameteränderung und die Auswirkungen auf den Auftragsplan zu erhalten.

Neben dem oben beschriebenen Datenset wurde der Testplan mit den einzelnen Produktionsszenarien und den zugehörigen Parametern mit Experten aus der Industrie erstellt, siehe Tabelle 7-5. Das Ziel war die Definition einer überschaubaren Anzahl an Produktionsszenarien unter Berücksichtigung einer hohen Bandbreite an Produktionszuständen.

7 Industrielle Anwendung und prototypische Realisierung

Tabelle 7-5: Testplan mit einzelnen Produktionsszenarien

Cluster	Produktionsszenario Nr.	Parameter
I. Produktmix (Verhältnis Produkt H/S)	PSZ 1	50/50
	PSZ 2	70/30
	PSZ 3	30/70
	PSZ 4	100/0
	PSZ 5	0/100
II. Virtuelle Kapazität (Stornierungsrate Aufträge)	PSZ 6	5 %
	PSZ 7	10 %
	PSZ 8	20 %
III. Surge Multiplier (Bei Auslastung $\leq 50\%$; $50\% - 75\%$; $\geq 75\%$)	PSZ 9	0,9; 1; 1,1
	PSZ 10	0,75; 1; 1,5
	PSZ 11	0,7; 1; 1,15
	PSZ 12	1; 1; 1,3

Die PSZ 1 bis 5 werden durch das Cluster I gebündelt. Die Szenarien simulieren fünf unterschiedliche Produktmixzustände. Dabei werden beispielhaft die zwei Küchengeräte H und S produziert. In PSZ 1 teilt sich das Produktionsvolumen zu 50 % / 50 % auf beide Produkte auf. Die Szenarien 2 und 3 zeigen weitere Mischverhältnisse auf. Zwei Extremfälle werden durch die Szenarien 4 und 5 dargestellt. In PSZ 4 wird zu 100 % an Produkt H gearbeitet und im anderen Szenario zu 100 % an Produkt S. Das Cluster II erprobt die Planungsmodelle hinsichtlich unterschiedlich stark ausgeprägter Stornierungsraten. Hierzu werden drei Stornierungszustände simuliert und der Umgang durch eine virtuelle Kapazitätserweiterung getestet. In Cluster III wird der Einsatz des Surge Multiplier Verfahrens in vier Szenarien untersucht. Wie in Abschnitt 5.3.4 beschrieben, dient der Ansatz des Surge Multipliers dazu, den Kapazitätsbedarf und das dazugehörige Kapazitätsangebot abzugleichen. In der vorliegenden Arbeit wird der Ansatz aus dem Dienstleistungssektor erstmalig auf den Bereich der Produktion übertragen.

In Vorversuchen wurde weiterhin die DLZ, die Stückzahl und der Zeitraum, zu dem keine Änderung des Produktionsablaufs mehr zulässig ist (Frozen Zone), variiert. Aus den Resultaten lassen sich nur schwer allgemeingültige Ergebnisse ableiten. Dies liegt u. a. an der Auswahl der spezifischen Parameter sowie an der geringen Anzahl an Szenarien für die Untersuchungsbereiche DLZ, Stückzahl und Frozen Zone. Daher wird auf die Bereiche im Folgenden nicht weiter eingegangen.

7.4 Analyse und Diskussion der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die resultierenden Auftragspläne der Planungsmodelle aus den einzelnen Produktionsszenarien kritisch diskutiert.

Gemäß Testplan erfolgte zunächst die Durchführung des Clusters I, bei dem fünf unterschiedliche Produktionsszenarien (PSZ 1 bis PSZ 5) simuliert wurden. Für jedes einzelne Produktionsszenario gab es zehn Durchläufe. Die mehrfachen Durchläufe sollen eine hohe Ergebnisgüte und Wiederholbarkeit der Ergebnisse sicherstellen. Das Vergleichsmodell 1 konnte im ersten Produktionsszenario mit den zur Verfügung stehenden Kapazitäten im Durchschnitt 15 Aufträge einplanen. Auch in den weiteren Szenarien konnten mittels des Vergleichsmodells 1 nicht mehr als 17 Aufträge abgebildet werden. Dies liegt in der initialen Annahme, dass das Kapazitätsangebot kurzfristig nicht anpassbar sei. Das Vergleichsmodell 2 hingegen, das nach Diskussion mit Experten entstand, erlaubt die Veränderung des Kapazitätsangebots. In Tabelle 7-6 sind die durchschnittlichen Werte für jedes Szenario aufgeführt. Hieraus ist erkennbar, dass das Vergleichsmodell 2, bis auf PSZ 1 und 5, genauso wie das Referenzmodell alle 20 Aufträge einplanen konnte.

Tabelle 7-6: Durchschnittliche Anzahl geplanter Aufträge in PSZ 1 bis PSZ 5

	PSZ 1	PSZ 2	PSZ 3	PSZ 4	PSZ 5
Vergleichsmodell 1	15	17	15	16	11
Vergleichsmodell 2	19	20	20	20	19
Referenzmodell	20	20	20	20	20

In Abbildung 38 ist erkennbar, dass das Referenzmodell, unter Berücksichtigung der geplanten Anzahl der Aufträge aus Tabelle 7-6, stets die geringsten Gesamtkosten aufweist. Die Vergleichsmodelle 1 und 2 hingegen zeigen, bei der Berücksichtigung der Anzahl an geplanten Aufträgen, sehr ähnliche Gesamtkosten auf. Zur Vergleichbarkeit der Netzwerkkonfigurationen wurde die EBIT-Kennzahl (Earnings Before Interest and Tax) als Vergleichsgröße gewählt. Diese Kennzahl dient internationalen Unternehmen zur Vergleichbarkeit der Leistungsbereiche der unterschiedlichen Standorte. Dabei werden Zins- und Steueraspekte nicht berücksichtigt. Bei Betrachtung der EBIT-Achse (Abbildung 38) ist erkennbar, dass das Referenzmodell stets das höchste Betriebsergebnis erzielt. Weiterhin ist die Korrelation zwischen EBIT, Gesamtkosten und der geplanten Aufträge erkennbar. Beispielhaft zeigt das Referenzmodell gegenüber dem Vergleichsmodell 2 in

7 Industrielle Anwendung und prototypische Realisierung

PSZ 3, bei einem Produktmix von 30 % des Küchengerätes H und 70 % des Küchengerätes S, ein um 22,4 % höheres Betriebsergebnis auf.

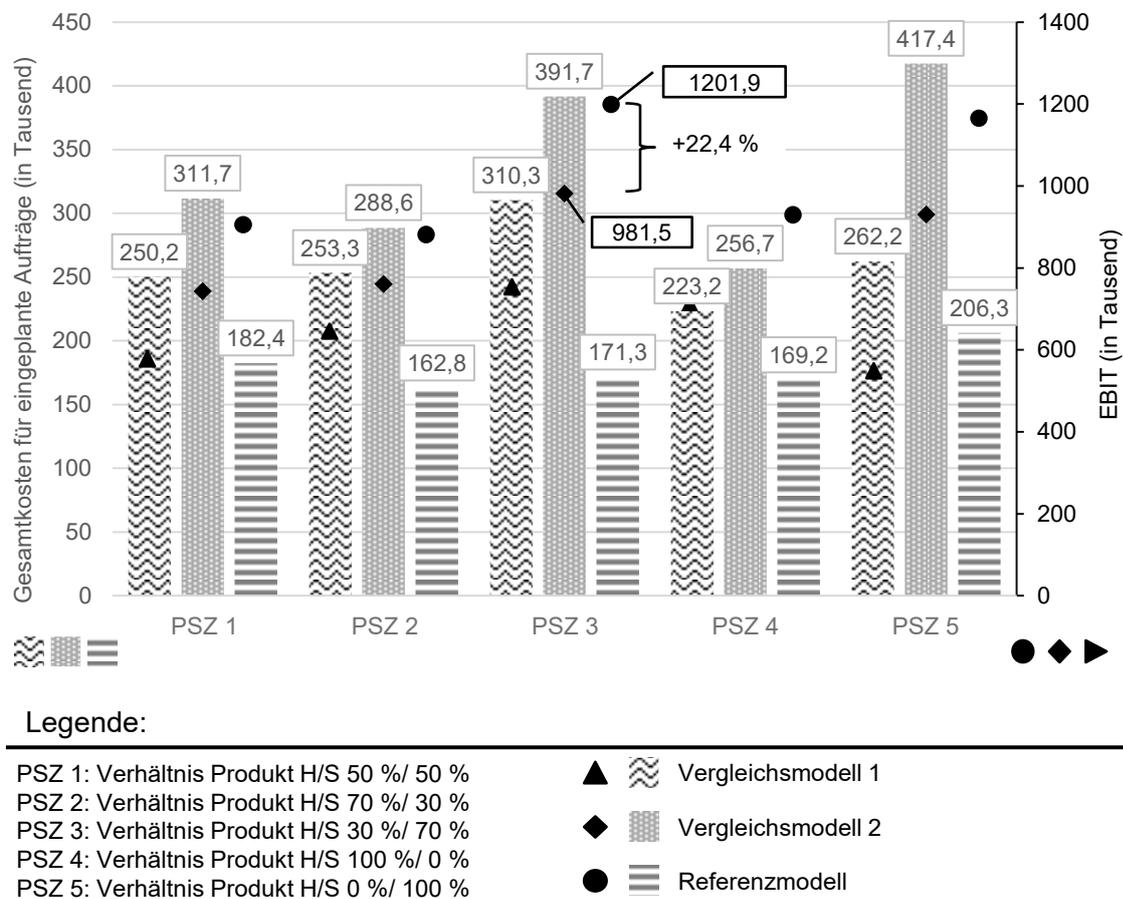


Abbildung 38: Ergebnisse der Produktionsszenarien 1 bis 5

Das durchgängig höhere Betriebsergebnis des Referenzmodells, lässt sich auf die geringeren Produktionskosten zurückführen. In PSZ 3 belaufen sich die durchschnittlichen Produktionskosten pro Auftrag im Vergleichsmodell 2 auf ca. 17.000 €, die durchschnittlichen Kosten des Referenzmodells hingegen auf ca. 8.920 €. Die Identifikation der geringeren Produktionskosten wiederum lässt sich durch die automatisierte Planung des NSGA-II Algorithmus erklären. Die Berücksichtigung der Auslastung und dadurch die gezielte Auswahl der Standorte führte zu geringeren Durchlaufzeiten. Durch den Einsatz des Referenzmodells konnte für jeden Auftrag stets automatisiert das passende Produktionsnetzwerk konfiguriert werden.

Die Durchführung des Clusters II dient dazu, den Umgang mit höheren Stornierungsraten im Rahmen der kundenindividuellen Produktion mittels unterschiedlicher Szenarien zu erproben. Hierzu wurden, wie dem Testplan aus Abschnitt 7.3.3

zu entnehmen ist, drei Produktionsszenarien (PSZ 6, PSZ 7 und PSZ 8) mit jeweils zehn Durchläufen durchgeführt. Die Tabelle 7-7 zeigt die durchschnittliche Anzahl an geplanten Aufträgen für das Vergleichsmodell 2 und das Referenzmodell. Das Referenzmodell, das die Fähigkeit besitzt, über das physische Kapazitätsangebot hinaus mit virtuellen Kapazitäten zu planen, weist hierbei stets eine höhere Anzahl an geplanten Aufträgen im Planungszeitraum auf.

Tabelle 7-7: Durchschnittliche Anzahl umgesetzter Aufträge in PSZ 6, PSZ 7 und PSZ 8

	PSZ 6	PSZ 7	PSZ 8
Vergleichsmodell 2	13,5	13,1	12,1
Referenzmodell	14,7	15,1	13,8

Die Stornierungsrate in PSZ 6 beträgt 5 % und würde bei 20 Aufträgen eine erwartete Stornierung von einem Auftrag bedeuten. In PSZ 6 wurden nach zehn Durchläufen im Schnitt 1,3 Aufträge storniert, folglich mehr als erwartet. Die Stornierungsrate in PSZ 8 beträgt 20 % und würde mit vier Auftragsstornierungen einhergehen. Die simulierten Werte zeigen hiervon Abweichungen. In PSZ 8 werden nach zehn Durchläufen 3,6 Aufträge storniert. Eine höhere Anzahl an Durchläufen würde die Abweichungen vermutlich deutlich reduzieren. Dies ist jedoch nicht das Ziel der Erprobung, da die Stornierungsraten in der Realität weder exakt zu bestimmen noch statisch sind. Die Anwendung des Referenzmodells führt in allen drei Produktionsszenarien zu einer konstant höheren Produktionsauslastung, wie aus den Daten der Tabelle 7-7 zu entnehmen ist.

Die Abbildung 39 visualisiert die kumulierten Gesamtkosten über die umgesetzten Aufträge. Die Gesamtkosten hängen dabei fest mit der Anzahl der durchgeführten Aufträge zusammen. In PSZ 8 weist das Referenzmodell, trotz einer höheren Anzahl umgesetzter Aufträge, geringere Gesamtkosten auf. Dies lässt sich auf deutlich geringere durchschnittliche Kosten pro Auftrag zurückführen. Diese geringeren Kosten pro Auftrag können durch kostengünstige Produktionsnetzwerkkonfigurationen mit geringeren Durchlaufzeiten und einer höheren Auslastung realisiert werden.

7 Industrielle Anwendung und prototypische Realisierung

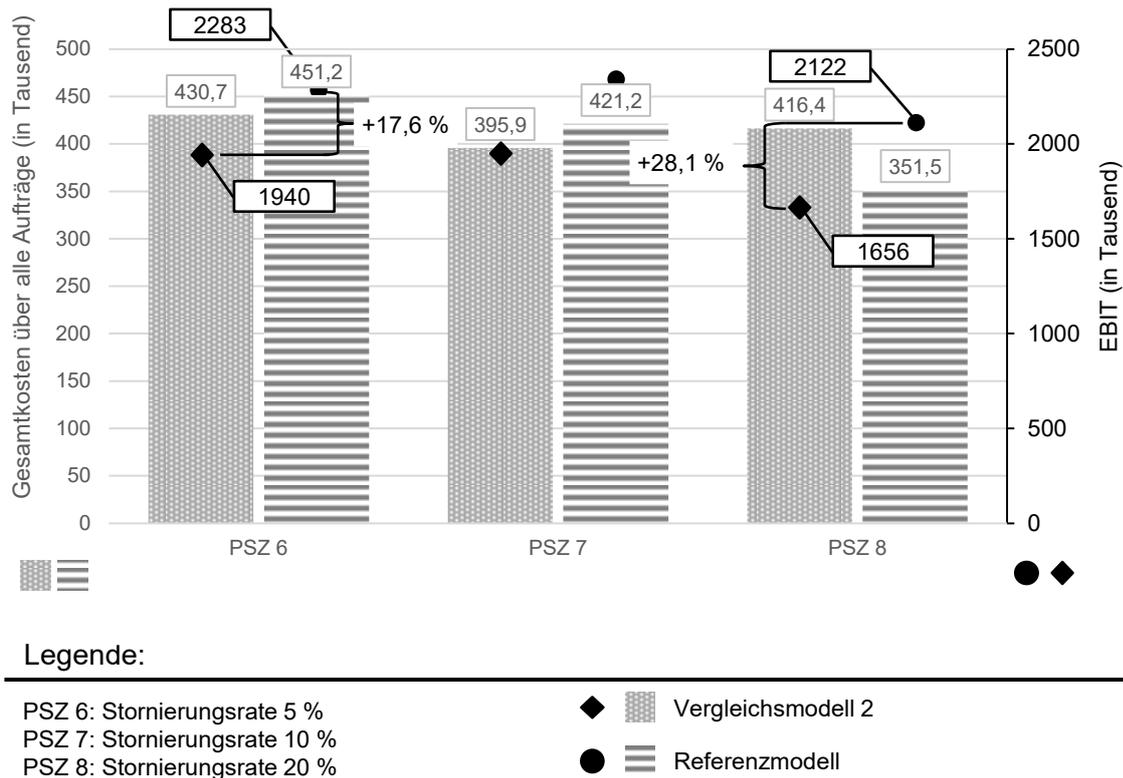
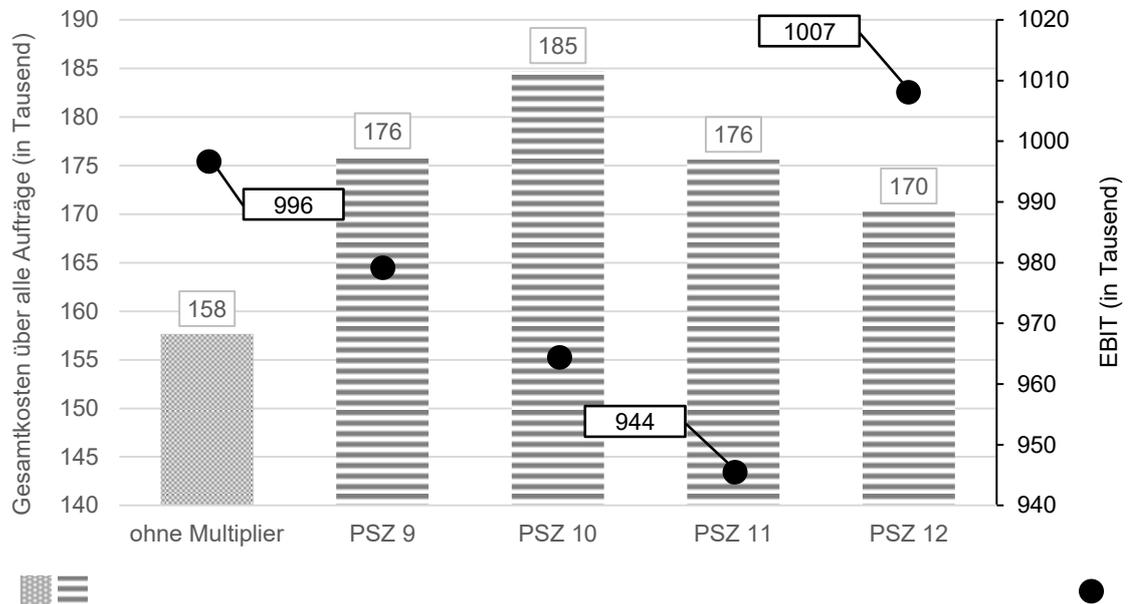


Abbildung 39: Ergebnisse der Produktionsszenarien 6 bis 8

Die geringeren durchschnittlichen Kosten pro Auftrag führen dadurch zu einem höheren Betriebsergebnis. Bei Betrachtung des EBIT zeigt das Referenzmodell mit virtueller Kapazität in PSZ 6 eine Steigerung des Betriebsergebnisses um 17,6 % auf. Bei höheren Stornierungsraten wie in PSZ 8 (20 %) konnte eine Steigerung des Betriebsergebnisses gegenüber der Planung durch das Vergleichsmodell 2 um 28,1 % erzielt werden.

Neben dem Einsatz der virtuellen Kapazitätsgrenze zur Handhabung von hohen kurzfristigen Stornierungen insbesondere von kundenindividuellen Produkten, sollen in Cluster III schnelle Kapazitätsabgleiche durch den Einsatz dynamischer Preisbildungsverfahren, dem sogenannten Surge Multiplier, wie in Abschnitt 5.3.5 erläutert und erprobt werden. Hierzu wurden die Produktionsszenarien (PSZ 9 bis PSZ 12) entwickelt. Im Unterschied zu den vorherigen Erprobungen werden die einzelnen Produktionsszenarien nicht an beiden Planungsmodellen durchgeführt. Stattdessen erfolgen jeweils zehn Durchläufe von PSZ 9 bis PSZ 12 mit Hilfe des Referenzmodells. Neben dem Vergleich der einzelnen Szenarien untereinander erfolgt der Vergleich durch die Auftragspläne ohne Einsatz des Surge Multipliers.

Für unterschiedliche Auslastungsfälle, wie dem Testplan in Tabelle 7-5, zu entnehmen ist, werden verschiedene Surge Multiplier zwischen 0,75 und 1,5 angewandt.



Legende:

PSZ 9: Surge Multiplier 0,9; 1; 1,1
 PSZ 10: Surge Multiplier 0,75; 1; 1,5
 PSZ 11: Surge Multiplier 0,7; 1; 1,15
 PSZ 12: Surge Multiplier 1; 1; 1,3

▒ Vergleich ohne Surge Multiplier
 ▨ Referenzmodell

Abbildung 40: Ergebnisse der Produktionsszenarien 9 bis 12

Bei Betrachtung der Kosten weisen die Auftragspläne ohne Einsatz des Surge Multipliers die geringsten Kosten auf. Dagegen weisen die PSZ 9, PSZ 10 und PSZ 11 höhere Kosten auf. Dies kann auf einen durchschnittlichen Surge Multiplier kleiner eins in diesen Produktionsszenarien zurückgeführt werden. Das PSZ 12 weist hingegen im Referenzmodell die geringsten Gesamtkosten von 170.000 € sowie das höchste EBIT mit über 1 Mio. € auf. Dies liegt daran, dass in PSZ 12 kein Surge Multiplier kleiner eins möglich ist. Durchschnittlich liegt der Surge Multiplier in PSZ 12 bei 1,02. Weiterhin lässt sich feststellen, dass der Surge Multiplier im Durchschnitt über alle Produktionsszenarien stets um eins liegt.

7.5 Fazit

Die Erprobung des Clusters I zeigt quantitativ und qualitativ die Relevanz der Flexibilität von Planungsmodellen auf. Das Referenzmodell weist hier deutliche Zeit- und Kostenvorteile gegenüber dem Vergleichsmodell 1 und 2 auf. Die Fähigkeit, automatisiert Produktions- und Logistikkosten zu vergleichen und auftragspezifisch Netzwerkkonfigurationen auszuleiten, führt zu geringeren Produktionskosten der einzelnen Aufträge. Die Analyse der Auftragspläne aus den Planungsmodellen für fünf Produktionsszenarien mit unterschiedlichem Produktmix zeigt eine höhere Auslastung und geringere Gesamtkosten durch den Einsatz des Referenzmodells. Durchschnittlich konnten durch auftragsbezogene Netzwerkkonfigurationen des Referenzmodells die Gesamtkosten gegenüber dem Vergleichsmodell 2 um 46 % reduziert werden. Weiterhin konnte das Referenzmodell beispielhaft in PSZ 3 gegenüber dem Vergleichsmodell 2 eine Steigerung des EBIT um 22,4 % erreichen.

Innerhalb des Clusters II konnte die simulationstechnische Umsetzung zeigen, dass kurzfristige Stornierungen mittels einer virtuellen Kapazitätsgrenze des Referenzmodells besser gehandhabt werden können und eine durchschnittliche Steigerung der Auslastung um 12,7 % erfolgte. Hierzu wurden drei Produktionsszenarien mit unterschiedlichen Stornierungsraten (5 %, 10 %, 20 %) untersucht.

Dabei konnte festgestellt werden, dass insbesondere Unternehmen im volatilen Umfeld mit hohen kurzfristigen Stornierungsraten durch den Einsatz von Planungsmodellen, die neben physischen auch virtuelle Kapazitäten einplanen, eine deutlich höhere Auslastung erreichen konnten.

Mit der Erprobung des Clusters II und der Analyse von PSZ 6 bis PSZ 9 konnte eine durchschnittliche EBIT Steigerung um 21,8 % durch das Referenzmodell gegenüber dem Vergleichsmodell 2 identifiziert werden.

Die Erprobung dynamischer Preisbildungsverfahren mittels Surge Multiplier hat gezeigt, dass der Einsatz im Produktionsplanungsumfeld zweckmäßig ist. Durch dynamische Surge Multiplier können kurzfristige standortübergreifende Kapazitätsabgleiche im Netzwerk automatisiert erfolgen. Weiterhin zeigt die Analyse von PSZ 9 bis PSZ 12, dass der Einsatz eines Surge Multipliers größer eins zu höheren Betriebsergebnissen führen kann.

8 Bewertung des Systems

Die Bewertung des Systems erfolgt qualitativ und quantitativ hinsichtlich der Zielerreichung und Wirtschaftlichkeit bezogen auf die industrielle Anwendung in dieser Arbeit. Schließlich folgt in diesem Kapitel eine verallgemeinerte Bewertung des Ansatzes.

8.1 Anforderungsbezogene Bewertung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war zum einen die Lösung von Defiziten im Bereich der Netzwerkkoordination und der kurzfristigen Konfiguration auftragspezifischer Produktionsnetzwerke. Zum anderen sollten vorhandene Potenziale im Bereich der Netzwerkkoordination und -konfiguration durch neue Möglichkeiten der Informationstechnologie und dem verstärkten Einsatz von Algorithmen ausgeschöpft werden. Hierzu wurden in Kapitel 4 Anforderungen abgeleitet, die ein System zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken abdecken sollte.

Das modular aufgebaute System erfüllt die Anforderung einer *erweiterbaren Architektur*. Im Rahmen der Pilotanwendung wurden hierzu kommerziell verfügbare Systeme (u. a. MathWorks Matlab, Microsoft Excel) modular eingesetzt, um langfristigen Bestand sowie eine ubiquitäre Anwendung im gesamten Produktionsnetzwerk sicherzustellen.

Die Anforderung der *Anwendbarkeit, Adaptierbarkeit und Übertragbarkeit* konnte durch mehrere Elemente sichergestellt werden. Die Anwendbarkeit des Systems konnte durch reduzierte und vereinfachte Eingaben des Anwenders erreicht werden. Die Adaptierbarkeit und technische Übertragbarkeit konnte durch die Entwicklung des semantischen Beschreibungsmodells nach DIN 8580 und VDI-RICHTLINIE 2860 erreicht werden. Von einer Übertragbarkeit des Systems auf unternehmensübergreifende Produktionsnetzwerke kann ausgegangen werden, auch wenn dies außerhalb der definierten Systemgrenze liegt und nicht Gegenstand der Pilotanwendung war.

Die Forderung nach *Skalierbarkeit* der Produktionskapazität konnte einerseits durch Rekonfigurationen der Produktionsnetzwerkstruktur und andererseits durch eine Produktionsplanung mit virtueller Kapazität erfüllt werden. Durch die modulare und plattformbasierte Architektur ist auch eine Skalierbarkeit hinsichtlich weiterer Standorte oder Fähigkeiten mit geringem Aufwand sichergestellt.

Um der speziellen Anforderung der *Allokation von Produktionsaufträgen* zu genügen, befindet sich das System innerhalb des Betrachtungszeitraumes stets in der Betriebsphase. Test- und Produktanlaufphasen wurden nicht berücksichtigt.

Die *Veränderungsfähigkeit der Netzwerkstruktur* als weitere Anforderung wird sichergestellt durch das Netzwerk- und Logistikmodell. Hierin sind die Beziehungen der einzelnen Netzwerkelemente hinterlegt. Innerhalb der globalen Produktionsprogrammplanung erfolgt die Ableitung der Prozessliste und der Anforderungsfähigkeits-Abgleich. Hierbei wird auf Netzwerkebene eine logische Veränderungsfähigkeit sichergestellt.

Die Anforderung der *flexiblen Logistik und Materialbereitstellung* und folglich der Sicherstellung der physischen Veränderungsfähigkeit erfolgt über das Logistikmodell. Bei der Entwicklung des Logistikmodells wurden unterschiedliche Transportmittel zu unterschiedlichen Kosten und Liefergeschwindigkeiten in Matrizen integriert.

Die Anforderung der *unterschiedlichen Charakteristiken der Fähigkeiten und Standorte* konnte durch das Produktionsnetzwerk der Pilotanwendung bestätigt werden. Die unterschiedlichen Charakteristiken der Fähigkeiten und Standorte wurden durch die unterschiedlichen Klassen der vier Datenmodelle sichergestellt. Weiterhin konnte automatisiert und ohne manuelle Datenanpassung die Bildung auftragsbezogener Produktionsnetzwerke mittels des NSGA-II demonstriert werden.

8.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Neben der Bewertung der Zielerreichung bedarf es, insbesondere im Hinblick auf eine industrielle Verwertung der Ergebnisse, der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit. Methodisch werden hierzu zunächst die Aufwände in Abschnitt 8.2.1 analysiert und dem Nutzen des entwickelten Systems in Abschnitt 8.2.2 gegenübergestellt.

8.2.1 Aufwand

Die Aufwände können zunächst unterschieden werden in einmalige Investitionskosten und laufende Betriebskosten des Systems. Bei den Investitionskosten han-

8.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

delt es sich im Wesentlichen um Systemintegrationskosten. Diese Systemintegrationskosten können als Projekt mit unterschiedlichen Tätigkeiten unterteilt und abgeschätzt werden, wie Tabelle 8-1 zeigt.

Die Entwicklungsaufgaben im Bereich der IT-Architektur sowie die Programmierung von Schnittstellen zu vorhandenen IT-Planungssystemen bedürfen eines IT-Infrastruktur Architekten und wurden mit einem Personenjahr abgeschätzt. Internetbasierte IT-Plattform-Architekturen haben zudem für global verteilte Produktionsnetzwerke den Vorteil Hardwarekosten einzusparen, da nicht zwingend an jedem Standort ein physischer Server stehen muss. Über virtuelle Server lassen sich Applikationen an anderen Standorten des Netzwerks betreiben. Für die Beschaffung von Serversystemen wurden Hardwarekosten in Höhe von 50.000 € kalkuliert.

Tabelle 8-1: Investitions- und Betriebskosten im Referenzszenario (Expertschätzung)

Systemintegration (einmalig)	Kostensatz	Menge bzw. Zeit	Kosten
IT-Architekturentwicklung/ Schnittstellen zu anderen IT-Systemen	140.000 €	1 PJ	140.000 €
Serversysteme (Hardware)	-	1	50.000 €
Aufbau und Initialisierung des Datenmodells (Auftrags-, Produkt-, Logistik- und Netzwerkmodell mit 10 Standorten und 5 Fertigungsprozessen)	-	50	140.000 €
Integration des Planungssystems	140.000 €	0,5 PJ	70.000 €
Systemtest und Schulung im Produktionsnetzwerk	140.000 €	0,25 PJ	35.000 €
Projektmanagement	120.000 €	1 PJ	120.000 €
Summe Investitionskosten			555.000 €

Systembetrieb (pro Jahr)	Kostensatz	Menge bzw. Zeit	Kosten
Softwarelizenzen	-	1	20.000 €
Aktualisierung Datenmodell	90.000 €	0,5 PJ	45.000 €
Systemwartung (u.a. Schnittstellen)	90.000 €	0,5 PJ	45.000 €
Anwenderschulungen	-	4	10.000 €
Summe Betriebskosten			120.000 €

Einen weiteren großen Kostenblock stellen der Aufbau und die Initialisierung des Datenmodells dar. Hierzu gehören im Einzelnen die Datenerhebung für das Auftragsmodell, das Produktmodell, das Logistikmodell und das Netzwerkmodell für die zehn Standorte aus der Pilotanwendung. Für diese Tätigkeiten bedarf es eines

8 Bewertung des Systems

Datenanalysten, abgeschätzt wurde hierzu ein Projektjahr. Für die Implementierung der Methode bestehend aus der globalen Produktionsprogrammplanung, der Netzwerkbedarfsplanung und der Netzwerkbedarfsallokation in das bestehende Planungssystem wurde der Zeitaufwand mit 0,5 Personenjahren bewertet.

Eine Testphase mit unterschiedlichen Systemtests sowie diversen Anwenderschulungen wird bedingt durch die Systemintegration und gehört folglich zu den einmaligen Investitionskosten.

Neben diesen einzelnen Experten, die standortübergreifend zusammenarbeiten, bedarf es eines begleitenden Projektmanagements, um aus den Experten ein funktionierendes Team zu formen, Entwicklungsziele zu kommunizieren sowie Zeit und Kosten im Rahmen zu halten. Für das Projektmanagement selbst wurde ein Personenjahr kalkuliert, wie Tabelle 8-1 zu entnehmen ist.

Für den Betrieb des Systems werden die jährlichen Kosten abgeschätzt, wie im zweiten Block der Tabelle 8-1 zu erkennen ist. Hierbei werden Softwarelizenzen, wie beispielsweise MATLAB Compiler SDK™ und Global Optimization Toolbox des Unternehmens MathWorks benötigt.

Weiterhin gilt es, das Datenmodell laufend zu aktualisieren. Dies bedeutet beispielsweise neue Fähigkeiten und Fertigungsverfahren müssen aufgenommen, Kapazitätserweiterungen innerhalb des Netzwerks eingepflegt und aktuell gehalten werden. Neben dieser Aktualisierung und Pflege des Datenmodells bedarf es der Wartung der Schnittstellen, d. h. Prüfung der Funktionsfähigkeit und Fehlerfreiheit der existierenden Schnittstellen. Ferner ist eine jährliche Analyse zur Identifikation von relevanten Datenpunkten nötig, um ein genaueres Abbild des Produktionsnetzwerkes in den Datenmodellen umzusetzen. Schließlich gehört zum Systembetrieb die fortlaufende Schulung erfahrener Anwender, um erweiterte Funktionalitäten und das Anlernen neuer Anwender zu ermöglichen.

Summiert ergeben sich laufende Kosten für den Betrieb des Systems in Höhe von 120.000 € pro Jahr.

8.2.2 Nutzen

Der Nutzen des entwickelten Systems liegt in der Vermeidung von nicht zweckmäßigen Netzwerkkonfigurationen sowie der Vermeidung von Lieferverzögerungen. Durch das Produktionsplanungssystem resultiert eine verbesserte Nutzung der Fähigkeiten und optimierte Auslastung der Kapazitäten auf Netzwerkebene. Dabei

wird automatisiert der gesamte verfügbare Lösungsraum analysiert und mittels heuristischer Verfahren die vorteilhafteste auftragsspezifische Netzwerkkonfiguration ermittelt. Dabei kann, in bestimmten Fällen, die auftragsspezifische Netzwerkkonfiguration der manuellen produktspezifischen Netzwerkkonfiguration entsprechen, muss es jedoch nicht.

Zur Abschätzung des quantitativen Nutzenpotenzials wird die simulationstechnische Umsetzung aus Abschnitt 7.3 verwendet. Hierbei wurde das Referenzmodell mit zwei Vergleichsmodellen in unterschiedlichen Produktionsszenarien verglichen. Für die Identifizierung des quantitativen Nutzenpotenzials wird das Referenzmodell dem Vergleichsmodell 2 gegenübergestellt und nach den drei Clustern bewertet. Eine vereinfachte Ermittlung des Betriebsergebnis (EBIT), ohne Berücksichtigung der Verwaltungskosten und sonstigen Betrieblichen Erträge und Aufwendungen, dient dabei als Vergleichskennzahl. Für Cluster I, mit unterschiedlichen Produktmix-Szenarien, erfolgt eine Steigerung des EBIT um durchschnittlich 19,5 %. Hieraus ergibt sich eine Einsparung von 830.114 € für den Erprobungszeitraum von 14 Tagen, für eine Produktfamilie im Bereich der Küchengeräte, durch die Nutzung des Referenzmodells. Überschlagen auf ein gesamtes Produktionsjahr ergibt sich hieraus ein Einsparungspotenzial von 19,9 Mio. € im Jahr für das Cluster I.

Durch das Cluster II wurden unterschiedliche Stornierungsraten simuliert. In diesem Cluster zeigt sich durch die Nutzung der virtuellen Kapazität des Referenzmodells eine EBIT Verbesserung von 21,5 %. Folglich ergibt sich ein Einsparpotenzial von 1.2 Mio. € im angenommenen Planungszeitraum im Gegensatz zum Vergleichsmodell 2. Das Einsparpotenzial bei Betrachtung des Produktionsnetzwerkes über das gesamte Jahr beträgt 28,6 Mio. €.

Weiterhin wurden Produktionsszenarien zum Einsatz des Surge Multipliers in Cluster III analysiert. Innerhalb des Erprobungszeitraumes war durch den Einsatz eines dynamischen Surge Multipliers eine EBIT Verbesserung um durchschnittlich 1,1 % erzielbar. Auf das Jahr betrachtet beläuft sich die Einsparung auf 274.896 €.

8.3 Verallgemeinerte Bewertung

Der folgende Abschnitt dient der Diskussion über die Grenzen des entwickelten Systems sowie dessen Allgemeingültigkeit. Im vorangegangenen Kapitel konnte

in einer Pilotanwendung das System zur kurzfristigen Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken sowie die simulationstechnische Umsetzung und Validierung beispielhaft demonstriert werden. Die industrielle Anwendung erfolgte bei einem führenden Hersteller von Hausgeräten. Als Testobjekt für die prototypische Umsetzung dienten zwei Produktfamilien von elektrischen Küchengeräten. In der Ausgangssituation bestand, wie bei vielen Unternehmen, eine starre Zuordnung von Produkten bzw. Produktfamilien zu Produktionsbereichen und -standorten. Die Dimensionierung und das Kapazitätsangebot wurden einmal initial aus historischen Produktionszahlen und mittels einer Prognose auf zukünftige Produktionszahlen durch das Management gemeinsam mit dem Industrial Engineering Department ausgelegt. Eine große Herausforderung liegt hierbei in stark kurzfristigen Nachfrageschwankungen innerhalb eines Jahres oder gar weniger Wochen. Eine kurzfristige Skalierung über Schichtmodelle oder die temporäre Auslagerung von Wertschöpfungsschritten hilft dabei nur bedingt. Mit Hilfe des entwickelten Systems und der simulationstechnischen Umsetzung konnten durch die ganzheitliche Betrachtung des Produktionsnetzwerkes erfolgsversprechende Effekte erzielt werden, wie in Abschnitt 7.4 diskutiert. Der Produktionsnetzwerkansatz in der simulationstechnischen Umsetzung wurde durch acht verteilte Produktionssysteme innerhalb eines Standortes des Unternehmens repräsentiert.

Es stellt sich jedoch die Frage, inwiefern die Anwendung des entwickelten Systems auch für andere Branchen und Produkte zweckmäßig ist. Zur weiteren Verwendung des entwickelten Systems wurden Teile der vorliegenden Arbeit in Fachkreisen mit Experten diskutiert (RADKE ET AL. 2019). Hierbei wurden drei Industriezweige identifiziert; umfangreich und daher vielversprechend erscheint der Bereich des Maschinenbaus. Die Herausforderung liegt in der Identifikation zweckmäßiger Produkte und den entsprechenden Fertigungsverfahren. Die Herstellung von Pneumatikzylindern erscheint als praktikables Beispiel. Dies haben u.a. umfangreiche Workshops in unterschiedlichen Gremien mit Produktionsverantwortlichen eines führenden internationalen Herstellers für pneumatische Lösungen ergeben. Als Grund wurde die hohe Variantenvielfalt genannt, beispielsweise durch unterschiedlichste Dimensionen und Beschichtungen der Zylinder. Weiterhin handelt es sich um einfache Produktionsprozesse wie Stangen- und Rohrzuschnitt, Materialbeschichtungen, Druckguss, grundlegende Montageschritte sowie abschließende Sicht- und Funktionsprüfungen. Diese Fähigkeiten und entsprechende Anlagen existieren bereits an den meisten europäischen Standorten des Unternehmens. Ferner besteht eine hohe Nachfragevolatilität der spezifischen Varianten, sodass die Produktion auf Vorrat die Dimensionen jedes Lagers sprengen würde und eine hohe Kapitalbindung nach sich zieht. Der Anteil der auftragsspezifischen

Fertigung hat bei dem Hersteller in den letzten Jahrzehnten stetig zugenommen. Einen weiteren Industriezweig stellt die Halbleiterfertigung dar. Nach Industrie-Workshops mit Produktionsleitern im Bereich der Halbleiterherstellung erscheinen automatisierte Surface-Mounted Technology Boards als weiteres geeignetes Anwendungsbeispiel. Die Fähigkeiten und eingesetzten Verfahren in den Produktionsnetzwerken der Halbleiterindustrie, insbesondere die Printed Circuit Board Montage, sind relativ homogen. Auch in diesem Industriezweig ist die Nachfrage sehr schwankungsanfällig und hat in der Vergangenheit immer wieder extreme Formen der Unter- und Überauslastung angenommen. Die Produkte zeichnen sich durch hohe Varianz und kurze Produktlebenszyklen aus. Losgrößen von über 1 Mio. Leiterplatten stellen in der Mobilfunkbranche keine Seltenheit dar. Um diesen hohen Anforderungen in der kurzfristigen Produktionsplanung und Netzwerkbedarfsallokation gerecht zu werden, erscheint das entwickelte System zweckmäßig. Aus Expertengesprächen mit Produktions- und Technologieverantwortlichen eines führenden Sportartikelherstellers, innerhalb des AUTONOMIK für Industrie 4.0 Programms (AUTONOMIK), konnte ebenfalls eine vielversprechende Anwendungsmöglichkeit des entwickelten Systems in der Kleidungsindustrie identifiziert werden. Auch dieser Industriezweig kennzeichnet sich durch hohe Nachfrageschwankungen, kurze Produktlebenszyklen und dem Wunsch nach kurzen Lieferzeiten. Die beschriebenen Fertigungsverfahren und Prozessschritte zur Herstellung von Hausgeräten, Pneumatikzylindern, Leiterplatten und Kleidungsstücken sind relativ einfach, da die Anzahl sowie die Komplexität der einzelnen Arbeitsschritte überschaubar sind. Eine gleichbleibend hohe Qualität zu hohen industriellen Standards herzustellen, ist stets eine große Herausforderung.

Es stellt sich weiterhin die Frage, ob sich das entwickelte System zur kurzfristigen Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken auch für komplexe Produkte der Luftfahrt und Medizintechnik einsetzen lässt. Grundsätzlich ist der Auftragsabwicklungsprozess in diesen Industriezweigen sehr langwierig. Insbesondere aufwendige Vergabeverfahren für Investitionsgüter nehmen viel Zeit in Anspruch. Auch die Planungszyklen sind im Vergleich zu den oben genannten Produkten deutlich länger. Des Weiteren kennzeichnen sich einzelne Produktionsstandorte im Flugzeugbau durch spezielle Kenntnisse und technische Fähigkeiten aus. Die Übertragung dieser Kompetenzen innerhalb des Netzwerks auf andere Standorte ist ebenfalls aufwendig und kann mehrere Jahre in Anspruch nehmen. Es handelt sich somit nicht um eine operative, sondern eine strategische Fragestellung. Die kurzfristige Verschiebung von Aufträgen im Flugzeugbau besitzt als weitere Herausforderung die sehr aufwendigen Vorrichtungen, die vorab zu ferti-

gen sind. Weiterhin bedarf es sowohl im Flugzeugbau sowie bei der Fertigung medizintechnischer Geräte, beispielsweise der bildgebenden Diagnostik, spezieller Zertifizierungen der Organisation und der Mitarbeiter. Diese Zertifizierungen müssen zunächst erlangt sowie durch Schulungen turnusmäßig erneuert werden. Diese hohen Qualitätsstandards werden durch internationale Verordnungen festgelegt und durch wiederkehrende Audits geprüft. Eine kurzfristige Auftragsverteilung an einen anderen Standort innerhalb des Produktionsnetzwerkes ist daher nur bedingt möglich. Dieser Standort muss neben den technischen Fähigkeiten und der freien Kapazität auch die Zertifizierungen haben, um auch aus rechtlichen Gründen an dem Standort fertigen zu dürfen. Der Kompetenzaufbau mit den dazugehörigen Zertifizierungen an allen Standorten des Produktionsnetzwerkes geht jedoch mit hohen einmaligen, aber auch wiederkehrenden finanziellen Aufwänden einher. Daher erscheint das entwickelte System für komplexe Produkte mit langfristigem Planungshorizont nur bedingt einsetzbar. Denkbar ist jedoch die Anwendung zur Herstellung von einzelnen Komponenten und Subsystemen in diesen Industriezweigen mit geringeren regulatorischen Anforderungen.

Von Interesse ist zudem die Frage, inwiefern sich das entwickelte Produktionsplanungssystem für Lohnfertiger ohne eigenes Produkt eignet. Grundsätzlich charakterisieren sich Lohnfertiger darin, dass sie Fertigungskompetenzen besitzen sowie Maschinen und Anlagen betreiben. Im klassischen Sinne besitzt der Lohnfertiger keine eigenen Produkte und betreibt somit auch keine Produktentwicklung und auch keinen Vertrieb der Produkte. Stattdessen werden Ressourcen eingesetzt, um bereits entwickelte Produkte im Kundenauftrag herzustellen. Der Lohnfertiger agiert somit als Dienstleister, obgleich am Ende physische Produkte geliefert werden. Um am Markt zu bestehen, ist die Anforderung nach hoher Veränderungs-fähigkeit auf der Netzwerkebene sowie auf der Fabrik- und Arbeitsplatzebene gegeben. Für Lohnfertiger wäre das entwickelte System zur Produktionsplanung interessant, um zum einen durch das einheitliche Datenmodell die eigenen Ressourcen semantisch zu beschreiben und mit dem Kunden in Interaktion zu treten. Hierzu müsste die eingangs definierte Systemgrenze ausgeweitet und auch Produktionsstandorte außerhalb der Organisation zugelassen werden. Das System würde somit nicht nur als multikriterielles Planungssystem dienen, sondern auch als unternehmensübergreifende Kooperationsplattform, um automatisiert Aufträge zu bewerten und zu verteilen. Die Potenziale liegen in der Reduktion der Abstimmungsaufwände sowie einer einfacheren Auftragserteilung und resultieren in einer schnelleren Auftragsabwicklung. Zur Sicherstellung einer hohen Produkt- und Prozessqualität ist die Qualifizierung der einzelnen Unternehmen und Standorte bei einer unternehmensübergreifenden Kooperationsplattform unabdingbar.

Wie die Diskussion im vorliegenden Abschnitt und die industrielle Anwendung in Kapitel 7 gezeigt haben, eignet sich das entwickelte System gut für die Produktionsplanung im Bereich der diskreten Fertigung. Es stellt sich weiterführend die Frage, ob eine Anwendung in der Prozessindustrie möglich ist. Grundsätzlich werden hierbei Materialien und Stoffe in unterschiedlichen technischen Prozessen und Verfahren weiterverarbeitet. Die Produktionsnetzwerke der Prozessindustrie folgen tendenziell einer anderen Struktur. Zum einen sind die Anforderungen nach einer hohen Veränderungsfähigkeit und somit einer höheren Dynamik der Netzwerkstruktur nicht zwingend erforderlich. Zum anderen ist der Aufbau von Anlagen und Systemen mit hohen Investitionskosten verbunden, folglich ist die Nutzungsdauer langfristig ausgelegt. Die Standorte und Anlagen sind häufig speziell für einzelne Produkte entwickelt und aufgebaut. Eine Rekonfiguration ist daher nur begrenzt möglich. Ein aufwendiges Rüsten und Reinigen bei der Chargenänderung von Materialien und Stoffen, insbesondere in der Lebensmittelindustrie, ist häufig nötig. Folglich unterscheidet sich das Umfeld und damit die Anforderungen der Prozessindustrie von der diskreten Fertigung. Zur Beantwortung der Frage, inwiefern sich das entwickelte System zur Anwendung in der Prozessindustrie eignet, müsste zunächst das weite Feld der Prozessindustrie eingegrenzt werden sowie Domänenwissen durch Experteninterviews oder intensive Gremienarbeit geleistet werden. Eine Eingrenzung könnte auf einzelne Stoffe z.B. die Herstellung von Polymerfolie oder einzelne Prozessschritte z.B. Abfüllprozesse erfolgen.

Häufig erfolgt in der Produktionsplanung auf Netzwerkebene keine ganzheitliche Betrachtung der anfallenden Kosten. Neben den Herstellkosten innerhalb eines Produktionswerkes sind insbesondere die Logistikkosten zu berücksichtigen. Hierbei stellt die Inter- und die Intralogistik, d.h. der Transport zwischen Standorten und innerhalb der Werke eine interessante Größe dar. Insbesondere der letzte Transportweg des fertigen Produkts zum Absatzmarkt bzw. zum Kunden und die damit anfallenden Kosten müssen berücksichtigt werden. In der Praxis herrscht große Diskussion darüber, inwiefern die Kosten des letzten Transportweges zulasten des letzten Standorts in der Wertschöpfungskette gehen. Dies ist häufig dem Ansatz von zentralen Lagerstellen geschuldet. Das letzte Werk in der Kette liefert in diesem Ansatz nicht an den Kunden aus, sondern an das Zentrallager. Der weitere Transport zum Kunden taucht in den Kennzahlen des letzten Werkes nicht mehr auf. Dieser kalkulatorische Ansatz ist für Niedriglohnstandorte interessant, die nicht nur den eigenen Absatzmarkt bedienen wollen. Mit zunehmender Individualisierung der Produkte und einem stärker geprägten Umweltbewusstsein nimmt der letzte Wertschöpfungsschritt und folglich der letzte Transportweg höhere Gewichtung ein. Die holistische Betrachtungsweise des entwickelten Systems zur

8 Bewertung des Systems

Produktionsplanung weist durch den Produktionsnetzwerkansatz insbesondere in der Logistikkostenbetrachtung Stärken auf, da auch der letzte Transportweg zum Kunden bzw. Absatzmarkt berücksichtigt wird.

Durch die differenzierte Abbildung unterschiedlicher Transportarten und des Gewichts kann das Planungssystem für Produkte mit hohem sowie geringem Gewicht eingesetzt werden. Grundsätzlich korrelieren Produktvolumen, Produktgewicht und Transportkosten. Daher resultieren aus dem Algorithmus bei schweren Produkten Produktionsnetzwerke, die nah am Kunden sind. Bei leichten Produkten mit geringem Volumen können hingegen Produktionsnetzwerke mit längeren Transportwegen resultieren.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Heutzutage findet weltweit ein hoher Anteil der Wertschöpfung in Produktionsnetzwerken statt. Diese Netzwerke sind jedoch meist historisch gewachsen und weisen starre Strukturen auf. Bisherige Forschungsarbeiten im Umfeld der Produktionsnetzwerke fokussieren sich im Wesentlichen auf die strategische Gestaltung und beschäftigen sich mit der Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke. Fortschritte im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie, u.a. neue Ansätze des Cloud Computing, erlauben inzwischen eine höhere Vernetzung der Standorte und damit auch eine auftragsbezogene Produktionsplanung auf Netzwerkebene. Schließlich kann hierdurch die Koordination von Produktionsnetzwerken durch die operative Komponente ermöglicht werden. Durch die technische Rekonfiguration von Produktionssystemen und durch eine flexible Logistik sowie die organisatorische Fähigkeit, Aufträge auch innerhalb eines kurzfristigen Planungshorizonts standortübergreifend zu fertigen, entstehen dynamische Produktionsnetzwerke. Verfügbare Planungssysteme erreichen die hohen Anforderungen der Veränderungsfähigkeit, die zur kurzfristigen Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken benötigt werden, bisher nicht. Diese Arbeit hat die Relevanz sowie die Potenziale von vernetzten und veränderbaren Produktionsnetzwerken wissenschaftlich beschrieben. Darüber hinaus wurde ein System zur kurzfristigen Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken entwickelt.

Hierzu wurde zunächst der relevante Stand der Technik und Forschung aufgezeigt. Dazu wurden Ansätze zur Wandlungsfähigkeit und Produktionsplanung von Produktionsnetzwerken sowie Ansätze zu multikriteriellen Optimierungsproblemen analysiert und eingeordnet. Anschließend erfolgte die Ableitung des Forschungsdefizites und der daraus resultierende Handlungsbedarf. Auf Basis dieser Informationen wurden die Anforderungen für das zu entwickelnde System formuliert. Weiterhin erfolgte die Eingrenzung des Untersuchungsbereiches und die Formulierung des Lösungsansatzes. Das System zur kurzfristigen Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken besteht aus der Konzeption, der Modellierung der Systemelemente sowie einer mehrstufigen Methode.

Die Modellierung der Systemelemente wurde auf Basis eines objektorientierten Modellierungsansatzes durchgeführt. Hierzu erfolgte die semantische Beschreibung eines Auftrags-, Produkt-, Logistik- und Netzwerkmodells.

Der Kern der Arbeit steckt in der entwickelten Methode bestehend aus drei Hauptfunktionsgruppen: (1) der globalen Produktionsprogrammplanung, (2) der Netzwerkbedarfsplanung sowie (3) der Netzwerkbedarfsallokation. Innerhalb der globalen Produktionsprogrammplanung erfolgte die Auftragskonsolidierung sowie die Ableitung der Prozessliste. Hierzu wurden zunächst Aufträge gesammelt und in viele kleinere Prozessschritte unterteilt. Im nächsten Schritt wurde mittels eines Anforderungs-Fähigkeits-Abgleichs automatisiert geprüft, inwieweit ein Produktionsstandort die Fähigkeit besitzt, die einzelnen Prozessschritte eines Auftrags abzubilden. Innerhalb der Hauptfunktion der Netzwerkbedarfsplanung wurde der Ansatz der strukturierten Überbuchung von Ressourcen, welcher im Dienstleistungssektor, u.a. im Ertragsmanagement bei Luftfahrtunternehmen bereits Einsatz findet, im Rahmen dieser Arbeit adaptiert und in der Kapazitätsplanung als virtuelle Kapazitätsgrenze implementiert. Innerhalb der Netzwerkbedarfsallokation erfolgt mit Hilfe eines heuristischen Ansatzes die automatische Generierung von Netzwerkkonfigurationen. Zur Auslastungsoptimierung des Produktionsnetzwerkes wurde ein weiteres Verfahren aus dem Dienstleistungssektor in die diskrete Fertigung übertragen. Der Ansatz des Surge Pricings, welches ein spezielles dynamisches Preisbildungsverfahren darstellt, wurde erstmals auf die deutlich höhere Planungskomplexität der Produktion angepasst und zur auslastungsoptimierten Generierung von Netzwerkkonfigurationen eingesetzt. Das Verfahren dient in der Anwendung der vorliegenden Arbeit dabei nicht zur Preisbildung des Produkts am Markt, wie ursprünglich entwickelt, sondern als internes Anreizsystem innerhalb des Produktionsnetzwerkes. Die wissenschaftlichen Ansätze der vorliegenden Arbeit wurden im Rahmen des Forschungsprojektes InnoCyFer mit Fachexperten diskutiert und an einem industriellen Anwendungsbeispiel bei einem führenden Hausgerätehersteller erprobt.

Ferner hat sich in Fachgesprächen mit Experten herauskristallisiert, dass in Produktionsnetzwerken die Betrachtung der Logistik essenziell ist. Insbesondere der letzte Transport zum Kunden ist für die Generierung und Bewertung des auftragspezifischen Produktionsnetzwerkes unerlässlich. Häufig wird dieser letzte Transport zum Kunden in Netzwerkentscheidungen nicht ausreichend berücksichtigt. Weiterhin hat die Einführung der virtuellen Kapazitätsgrenze zu höherer Auslastung der Produktionsbereiche an den einzelnen Standorten und zur Erzielung einer kürzeren Durchlaufzeit geführt und sich damit als zweckmäßig erwiesen.

Zur Validierung des Planungssystems diente neben dem dynamischen Referenzmodell ein konventionelles Produktionsplanungssystem als Vergleichsmodell.

Mittels beispielhafter Produktionsszenarien konnte der Nutzen und der wirtschaftliche Einsatz des entwickelten Systems verdeutlicht werden. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die industrielle Anwendung des Systems zur kurzfristigen Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken möglich ist.

9.2 Ausblick

Bisherige wichtige Entscheidungskriterien zur Verteilung der netzwerkinternen Aufträge sind Zeit, Kosten und Qualität. Ferner stellt die Reaktionsfähigkeit bzw. Flexibilität ein weiteres Entscheidungskriterium dar. Auch das Thema der Ressourceneffizienz nimmt in diesem Zusammenhang eine bedeutende Stellung ein und könnte zukünftig ein weiteres wichtiges Entscheidungskriterium darstellen. Beispielhaft könnte dies durch die Kennzahl der CO₂-Emissionen ausgedrückt werden. Weiterhin könnte das entwickelte System genutzt werden, um neue Fertigungstechnologien, wie beispielsweise die additive Fertigung, strategisch an Standorten innerhalb des Produktionsnetzwerkes zu integrieren und auszulasten. Weitere Untersuchungen könnten auf unternehmensübergreifende Produktionsnetzwerke ausgeweitet werden. Diese erweiterte Betrachtung bietet höhere Potenziale für eine branchenübergreifende Auslastungsoptimierung der Standorte. In diesem Kontext gewinnen insbesondere wissenschaftliche Fragestellungen zur automatisierten Qualifizierung und Bewertung von Standorten zur Partizipation an dynamischen Produktionsnetzwerken an Bedeutung.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit ermöglichen weltweit agierenden Unternehmen, sich in globalisierten Märkten mit zunehmendem Wettbewerbsdruck zu behaupten. Hierdurch sollen unternehmerische Fehlentscheidungen im Betrieb und der Weiterentwicklung von Produktionsnetzwerken minimiert werden und langfristig Standorte und damit Arbeitsplätze in Deutschland und Europa durch eine ganzheitliche Betrachtungsweise gehalten und ausgebaut werden.

10 Literaturverzeichnis

ABBATE 1999

Abbate, J.: *Inventing the Internet*. The MIT Press, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge: 1999.

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: *Zukunft der Produktion*. München: Hanser 2011.

ABELE ET AL. 2008

Abele, E.; Meyer, T.; Näher, U.; Strube, G.; Sykes, R.: *Global Production, A Handbook for Strategy and Implementation*, Berlin: Springer, 2008.

ACATECH 2021

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Wertschöpfungsnetzwerke in Zeiten von Infektionskrisen. Expertise des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0*. München: 2021.

ASGHAR ET AL. 2018

Asghar, E.; Zaman, U.-K.; Baqai, A.-A.; Homri, L.: *Optimum machine capabilities for reconfigurable manufacturing systems*. In: *Int Journal of Advanced Manufacturing Technology* 95 (2018), S. 4397–4417.

ATUG ET AL. 2016

Atug, J.; Hees, A.; Wagner, M.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: *Production planning for customer innovated products*, In: *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Piscataway, IEEE, 2016, S. 931–935.

ATUG ET AL. 2018

Atug, J.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: *Rekonfiguration von Produktionsnetzwerken. Methode zur Produktionsplanung von rekonfigurierbaren Netzwerken in volatilen Märkten*, In: *wt Werkstatttechnik online* 108 (2018) 3, S. 1–6.

AUTONOMIK

BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *„AUTONOMIK für Industrie 4.0 – Ergebnisse“*. Begleitforschung VDI/VDE-IT, Berlin: 2016.

BALZERT 2009

Balzert, H.: Lehrbuch der Softwaretechnik. Basiskonzepte und Requirements-Engineering. 3. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akademie 2009.

BARTLETT 1993

Bartlett, C.-A.: Building and Managing the Transnational: The New Organizational Challenge. In: Porter, M.-E. (Hrsg.): Competition in global industries. Boston: Harvard Business School Press, 1993, S. 367–401.

BAUERNHANSL ET AL. 2014

Bauernhansl, T., ten Hompel, Vogel-Heuser, B.: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologie, Migration: Springer Vieweg, 2014.

BE ISA ET AL. 2018

be Isa, J.; Epha, H.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Management of Reconfigurable Production Networks in Order-Based Production, In: Moon, I.; Lee, G. M.; Park, J.; Kiritsis, D.; von Cieminski, G. (Hrsg.): Advances in production management systems, Proceedings, Springer, 2018, S.490-497.

BE ISA ET AL. 2020

be Isa, J.; Zimmermann, T.; Scherwitz, P.; Reinhart, G.: Tactical Production Planning for Customer Individual Products in Changeable Production Networks, In: Nyhuis, P.; Herberger, D.; Hübner, M. (Hrsg.): Proceedings Conference on Production Systems and Logistics (CPSL), 2020, S. 448-457.

BENSMINE ET AL. 2013

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

BLESSING & CHAKRABARTI 2009

Blessing, L. M.T.; Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology. London: Springer, 2009.

BMW 2020

Bayerische Motoren Werke AG (Hrsg.): Bericht 2020 – Unsere Verantwortung. Unsere Zukunft., München: 2020.

BRANDNER 2000

Brandner, S.: Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken, Diss. TU München (2000). Forschungsberichte iwv 136. München: Utz 2000.

BREM 2018

Brem, A.: Das Neue in der Betriebswirtschaft: Ansätze zur qualitativen Forschung und Konzeption theoriegenerierender Forschungsstrategien, In: Schmeisser et al. (Hrsg.): Neue Betriebswirtschaft, München: UVK, 2018, S.25-38.

BRIE & MORIGNOT 2005

Brie, A. H.; Morignot, P.: Genetic Planning Using Variable Length Chromosomes. American Association for Artificial Intelligence. <http://www.aaai.org/Papers/ICAPS/2005/ICAPS05-033.pdf>, 2005.

BRUCCOLERI ET AL. 2005

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

BÜRGIN ET AL 2016

Buergin, J.; Blaettchen, P.; Qu, C.; Lanza, G.: Assignment of Customer-Specific Orders to Plants with Mixed-Model Assembly Lines in Global Production Networks. In: Procedia CIRP 50 (2016), S. 330–335.

BÜRGIN ET AL. 2017

Buergin, J.; Beisecker, J.; Fischer, S.; Geier, B.; Tutsch, H.; Mercamp, S.; Lanza, G.: Generation of Planned Orders and their Matching with Customer Orders in Multi-variant Series Production. In: Procedia CIRP 61 (2017), S. 499–504.

BUSCH & DANGELMAIER 2004

Busch, A.; Dangelmaier, W.: Integriertes Supply Chain Management. Theorie und Praxis effektiver unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer 2004.

BUTTELMANN & LOHMANN 2004

Buttelmann, M.; Lohmann, B.: Optimierung mit Genetischen Algorithmen und eine Anwendung zur Modellreduktion. In: Automatisierungstechnik 52 (2004) 4, S. 151–163.

CHEN & SHELDON 2016

Chen, K. M.; Sheldon, M.: Dynamic Pricing in a Labor Market: Surge Pricing and Flexible Work on the Uber Platform. In: 2016 Proceedings ACM Conference on Economics and Computation, 2016.

CHRYSSOLOURIS 2006

Chryssolouris, G.: Manufacturing Systems: Theory and Practice. 2. Aufl. New York: Springer 2006.

CISEK ET AL. 2002

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

CISEK 2005

Cisek, R.: Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen. Diss. TU München (2004). Forschungsberichte iw 191. München: Utz 2005.

COATES & WOLFF 1995

Coates, J. F.; Wolff, M. F.: Customization promises sharp competitive edge. Research Technology Management 38 (1995) 6, S. 6–7.

COHEN ET AL. 2016

Cohen, P.; Hahn R.; Hall, J.; Levitt, S.; Metcalfe, R.: Using big data to estimate consumer surplus: the case of Uber. In: National Bureau of Economic Research (NBER) Working Papers 22627, 2016.

COLOTLA ET AL. 2003

Colotla, I.; Shi, Y.; Gregory, M. J.: Operation and performance of international manufacturing networks. In: Int Jnl of Op & Prod Mngemnt 23 (10), 2003, S. 1184–1206.

CZICHOS 2015

Czichos, H.: Mechatronik – Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer 2015.

DAIMLER 2020

Daimler AG (Hrsg.): Geschäftsbericht 2020, Stuttgart: 2020.

DANGELMAIER 2009

Dangelmaier, W.: Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Im Sommer keine Kirschpralinen? Berlin: Springer 2009.

DAVIS 1996

Davis, S. M.: Future perfect. 1. Aufl. (1987), 10. Aufl. Binghamton: Basic Books, 1996.

DEB ET AL. 2002

Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; Meyarivan, T.: A fast and elitist multiobjective genetic algorithm. NSGA-II. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): Trans. Evol. Computat. 6 (2002) 2, S. 182–197.

DEIF & ELMARAGHY 2006

Deif, A. M.; ElMaraghy, W. H.: A Systematic Design Approach for Reconfigurable Manufacturing Systems. Advanced in Design. In: Springer Series in Advanced Manufacturing, 2006, S. 219–228.

DEIF & ELMARAGHY 2007

Deif, A. M.; ElMaraghy, H. A.: Assessing capacity scalability policies in RMS using system dynamics. In: Int. Journal Flexible Manufacturing Systems 19 (3), 2007, S. 128–150.

DIN 8580

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): DIN 8580: Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth 2020.

DIN EN 62264-1

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): DIN EN 62264-1: Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen – Teil1: Modelle und Terminologie. Berlin: Beuth 2014.

DOMSCHKE ET AL. 1997

Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S.: Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte. 2. Aufl. Berlin: Springer 1997.

DOMSCHKE ET AL. 2015

Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R.; Scholl, A. (Hrsg.): Einführung in Operations Research. 9 Aufl. Berlin: Springer 2015.

DYCKHOFF 2006

Dyckhoff, H.: Produktionstheorie. 5. Aufl. Berlin: Springer 2006.

DYCKHOFF & SPENGLER 2007

Dyckhoff, H.; Spengler, T. S.: Produktionswirtschaft. Eine Einführung für Wirtschaftsingenieure. Berlin: Springer 2007.

EASLEY & KLEINBERG 2010

Easley, D.; Kleinberg, J.: Networks, Crowds, and Markets: Reasoning about a Highly Connected World. Cambridge University Press 2010.

EGGERT 2006

Eggert, S.: Produktionsplanung und -steuerung in dynamischen Produktionsnetzwerken. Diss. Universität Göttingen (2005). Hamburg: Kovac 2006.

ELMARAGHY 2006

ElMaraghy, H.-A.: Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. In: Int Int. Journal Flexible Manufacturing Systems (2006), S. 261–276.

EPPINGER ET AL. 2021

Eppinger, P.; Felbermayr, G.; Krebs, O.; Kukharsky, B.: Decoupling from global value chains, CESifo Working Paper No. 9079, München, 2021

EVERSHEIM 2002

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik 3. Arbeitsvorbereitung. 4. Aufl. Berlin: Springer 2002.

FAHIMNIA ET AL. 2013

Fahimnia, B.; Farahani, R.-Z.; Marian, R.; Luong, L.: A review and critique on integrated production–distribution planning models and techniques. In: Journal of Manufacturing Systems 32 (2013), S. 1–19.

FALLBÖHMER 2000

Fallböhrer, M.: Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Diss. RWTH Aachen (2000). Aachen: Shaker 2000.

FERDOWS 1989

Ferdows, K.: Mapping International Factory Networks. Advanced series in management 13, Amsterdam: North-Holland 1989, S. 3–22.

FERDOWS 1997

Ferdows, K.: Made in the world: the global spread of production. In: Production and Operations Management (Vol. 6, Nr. 2), 1997, S. 102–109.

FISHER ET AL. 2018

Fisher, O.; Watson, N.; Porcu, L.; Bacon, D.; Rigley, M.; Gomes, R.-L.: Cloud manufacturing as a sustainable process manufacturing route. In: Journal of Manufacturing Systems, 47 (2018), S. 53–68.

FOGLIATTO ET AL. 2012

Fogliatto, F. S.; da Silveira, G. J. C.; Borenstein, D.: The mass customization decade: An updated review of the literature. In: International Journal of Production Economics 138 (2012) 1, S. 14–25.

FRIEDLI ET AL. 2013

Friedli, T.; Thomas, S.; Mundt, A.: Management globaler Produktionsnetzwerke. Strategie, Konfiguration, Koordination. München: Hanser, 2013.

GESMANN-NUISSEL ET AL. 2014

Gesmann-Nuissel, D.; Hartz, R.; Dittrich, M.: Perspektiven der Wirtschaftswissenschaften. Wiesbaden: Springer, 2014.

GIBBS ET AL. 2018

Gibbs, C.; Guttentag, D.; Gretzel, U.; Morton, J.; Goodwill, A.: Pricing in the sharing economy: a hedonic pricing model applied to Airbnb listings. In: Journal of Travel & Tourism Marketing 35 (2018) 1, S. 46-56.

GÖBEL 2005

Göbel, C.: Flexible interorganisatorische Kopplung von Geschäftsprozessen: Simulative Flexibilitätsanalyse am Beispiel einer Automotive Supply Chain. Diss. Universität Bayreuth (2004). Berlin: Logos 2005.

GOLDBERG 1989

Goldberg, D. E.: Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Boston: Addison-Wesley, 1989.

GOTTSCHALK 2005

Gottschalk, L. L.: Flexibilitätsprofile - Analyse und Konfiguration von Strategien zur Kapazitätsanpassung in der industriellen Produktion. Diss. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (2005). ETH Zurich Research Collection. 2005.

GOYAL ET AL. 2012

Goyal, K.-K.; Jain, P.-K.; Jain, M.: Optimal configuration selection for reconfigurable manufacturing system using NSGA II and TOPSIS. In: International Journal of Production Research 50 (2012) 15, S. 4175–4191.

GRUNDMANN 2008

Grundmann, S.: Planung flexibler Produktionskapazitäten im Spannungsfeld logistischer und monetärer Ziele. Diss. Leibniz Universität Hannover, 2008.

GUDA & SUBRAMANIAN 2019

Guda, H.; Subramanian, U.: Your Uber Is Arriving: Managing On-Demand Workers Through Surge Pricing, Forecast Communication, and Worker Incentives. In: Management Science 65 (2019) 5, S. 1995-2014.

GÜNTHER & TEMPELMEIER 2012

Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. 9. Aufl. Berlin: Springer, 2012.

GUTENBERG 1983

Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Die Produktion. 24. Aufl. Berlin: Springer 1983 (Band 1).

HAAS & OBST 2012

Haas, M.; Obst, N.-I.: Gestaltung von globalen Produktionsnetzwerken. ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 107 (2012) 4, S. 250–255.

HEES 2017

Hees, A.: System zur Produktionsplanung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen. Diss. TU München (2017). Forschungsberichte iw 331. München: Utz 2017.

HELD 1980

Held, K.: Heraklit, Parmenides und der Anfang von Philosophie und Wissenschaft. Berlin: De Gruyter 1980.

HERNÁNDEZ 2003

Hernández, M.-R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Diss. Leibniz Universität Hannover (2002), Düsseldorf: VDI 2003.

HILDEBRAND 2006

Hildebrand, K.: Stammdatenqualität - der Schlüssel für optimale Geschäftsprozesse. IS Report 10 (2006) 11, S. 17-19.

HOCHDÖRFFER ET AL.2016

Hochdörffer, J.; Brendt, V.-C.; Lanza, G.: Resource-based Reconfiguration of Manufacturing Networks Using a Product-to-plant Allocation Methodology. In: Proceedings of the International Conference on Competitive Manufacturing CIRP COMA, 6, (2016), S. 511-516.

HOCHDÖRFFER 2018

Hochdörffer, J., Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsberichte wbk. Karlsruhe: Shaker 2018.

HOFER 2018

Hofer, J. (Red.): Adidas, Nike und Co. sollten über eine Rückkehr nach Europa nachdenken, Handelsblatt, Düsseldorf, vom 25.04.2018: <https://www.handelsblatt.com/meinung/kommentare/kommentar-adidas-nike-und-co-sollten-ueber-eine-rueckkehr-nach-europa-nachdenken/21209980.html>, (besucht am 21.08.2021).

INNOCYFER

Forschungsprojekt, BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: <https://www.mec.ed.tum.de/iwb/forschung-und-industrie/projekte/produktionsmanagement-und-logistik/abgeschlossen-innocyfer-integrierte-gestaltung-und-herstellung-kundeninnovierter-produkte-in-cyber-physischen-fertigungssystemen/>, (besucht am 04.11.2021).

ISO/IEC/IEEE 15288

ISO/IEC/IEEE 15288: Systems and software engineering -System life cycle processes. (1) 2015.

ISO/IEC/IEEE 19505

ISO/IEC/IEEE 19505: Information technology -Object Mangement Group Modeling Language (OMG UML) – Part 1: Infrastructure. (1) 2012.

JIAO ET AL. 2007

Jiao, J.; Zhang, L.; Pokharel, S.: Process Platform Planning for Variety Coordination From Design to Production in Mass Customization Manufacturing. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): Transactions on Engineering Mangement 54 (2007) 1, S. 112–129.

KÄSCHEL ET AL. 2014

Käschel, J.; Häckel, S.; Lemke, S.: Genetische Algorithmen für die Fertigungssteuerung mit Prozessvarianten. In: Gesmann-Nuissl et al. (Hrsg.): Perspektiven der Wirtschaftswissenschaften. Wiesbaden: Springer 2014, S. 373–394.

KLETTI 2015

Kletti, J. (Hrsg.): MES - Manufacturing Execution System. Moderne Informationstechnologie zur Prozessfähigkeit der Wertschöpfung. 2. Aufl. Berlin: Springer 2015.

KNITTERSCHEIDT & FRÖNDHOFF 2021

Knitterscheidt, K.; Fröndhoff, B. (Red.): Die Neuordnung der Lieferketten bedroht den Wohlstand, Handelsblatt, Düsseldorf, vom 01.02.2021: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/globalisierung-die-neuordnung-der-lieferketten-bedroht-den-wohlstand/26855918.html>, (besucht am 21.08.2021).

KNOCHE 2005

Knoche, K.: Generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien. Diss. RWTH Aachen (2004). Aachen: Shaker 2005.

KOREN & SHPITALNI 2010

Koren, Y.; Shpitalni, M.: Design of reconfigurable manufacturing systems. In: 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. (1999): Reconfigurable Manufacturing Systems. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 48 (1999) 2, S. 527–540.

KRAMER 2017

Kramer, O. (2017): Genetic Algorithm Essentials. Cham: Springer 2017.

KRCMAR 2010

Krcmar, H.: Informationsmanagement. 5. Aufl. Berlin: Springer 2010.

KUBICEK 1977

Kubicek, H.: Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung. In: Köhler, R. (Hrsg.): Empirische und Handlungstheoretische Forschungskonzeption in der Betriebswirtschaftslehre. Stuttgart: Poeschel 1977.

LANGE 2018

Lange, B.: Handelspolitik im 21. Jahrhundert: Handelskrieg und seine Folgen: Ist die WTO am Ende? ifo Schnelldienst 71, 2018, S. 28 f.

LANZA ET AL. 2018

Lanza, G.; Nyhuis, P.; Fisel, J.; Nielsen, L.; Schmidt, M.; Stricker, N.: Wandlungsfähige, menschenzentrierte Strukturen in Fabriken und Netzwerken der Industrie 4.0 (acatech Studie). München: Utz Verlage 2018.

LÖDDING 2016

Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Berlin: Springer 2016.

LORENZER 2011

Lorenzer, T.: Wandelbarkeit in der Seriefertigung durch rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen. Diss. ETH Zürich (2010). Zürcher Schriften zur Produktionstechnik IWF. Zürich: VDI 2011.

LOTTER & WIENDAHL 2012

Lotter, B.; Wiendahl, H. P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl. Berlin: Springer 2012.

MÄRZ ET AL. 2011

März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: Simulation und Optimierung in Produktion. Berlin: Springer 2011.

MEYER 2008

Meyer, T.: Selection Criteria: Assessing Relevant Trends and Indicators. In:

Abele, E.; Meyer, T.; Näher, U.; Strube, G.; Sykes, R. (Hrsg.): Global Production, A Handbook for Strategy and Implementation, Berlin: Springer, 2008. S. 34-101.

MEZGÁR & RAUSCHECKER 2014

Mezgár, I.; Rauschecker, U.: The challenge of networked enterprises for cloud computing interoperability. In: Computers in Industry 64 (2014) 4, S. 657–674.

MÖLLER 2008

Möller, N.: Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. Diss. TU München (2008). Forschungsberichte iw 212. München: Utz 2008.

MOSER 2014

Moser, R., Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke. Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsberichte wbk. Karlsruhe: Shaker 2014.

MOSER 2018

Moser, E., Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsberichte wbk. Karlsruhe: Shaker 2018.

MOSLEMIPOUR ET AL. 2012

Moslemipour, G.; Lee, T.-S.; Rilling, D.: A review of intelligent approaches for designing dynamic and robust layouts in flexible manufacturing systems. In: Int Journal of Advanced Manufacturing Technology 60 (2012) 1-4, S. 11–27.

Mourtzis et al. 2012

Mourtzis, D.; Doukas, M.; Psarommatis, F.: Design and Planning of Decentralised Production Networks Under High Product Variety Demand. In: Procedia CIRP 3 (2012), S. 293–298.

MOURTZIS ET AL. 2015

Mourtzis, D.; Doukas, M.; Psarommatis, F.: Design of manufacturing networks for mass customisation using an intelligent search method. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing 28 (2015) 7, S. 679–700.

MUTINGI & MBOHWA 2017

Mutingi, M.; Mbohwa, C.: Grouping Genetic Algorithms. Cham: Springer 2017.

NEUNER 2009

Neuner, C.: Konfiguration internationaler Produktionsnetzwerke unter Berücksichtigung von Unsicherheit. Diss. Universität Bayreuth. Wiesbaden: Gabler 2009.

NISSEN 1997

Nissen, V.: Einführung in Evolutionäre Algorithmen. Wiesbaden: Vieweg und Teubner 1997.

NYHUIS ET AL. 2008

Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: PZH 2008.

NYHUIS ET AL. 2018

Nyhuis, P. (Hrsg); Seitz, M.; Härtel, L; Hübner, M.; Merkel, L.; be Isa, J.; Engehausen, F.; Meluzov, N.; Rost, R.; Schmidhuber, M.; Sauermann, F.; Hünnekes, P.: PPS-Report 2017/2018. Studienergebnisse. Garbsen: PZH, 2018.

OHNO 1988

Ohno, T.: Toyota Production System. Beyond Large-Scale Production. Boca Raton: Taylor & Francis 1988.

OSTGATHE 2012

Ostgathe, M.: System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Diss. TU München (2012). Forschungsberichte iw 265. München: Utz 2012.

PAGE ET AL. 2021

Page, M.-J.; McKenzie, J.-E.; Bossuyt, P.-M.; Boutron, I.; Hoffmann, T.-C.; Mulrow, C.-D.; Shamseer, L.: The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ: Research Methods and Reporting*, 372, n71, 2021.

PFOHL 2004

Pfohl, H.-C.: Interorganisation der Logistik. In: Logistikmanagement – Konzeption und Funktionen. Berlin: Springer 2004.

PILLER & STOTKO 2003

Piller, F.; Stotko, C.: Mass Customization und Kundenintegration. Neue Wege zum innovativen Produkt. Düsseldorf: Symposium Publishing 2003.

PILLER 2006

Piller, F.: Mass Customization – Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter. 4. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2006.

PINE 1993

Pine, B.-J.: Mass customization. The new frontier in business competition. Boston: Harvard Business School Press 1993.

PORTER 1989

Porter, M.-E.: Globaler Wettbewerb. Strategien der neuen Internationalisierung. Wiesbaden: Gabler 1989.

POPPER 1969

Popper, K.: Logik der Forschung. 3. Aufl. Tübingen: Mohr 1969.

PRINZ 2016

Prinz, A.: Mathematische Modellierung zur Optimierung der Wertschöpfungsverteilung nach quantitativen und qualitativen Kriterien in Produktionsnetzwerken der diskreten Fertigung. Diss. Universität Stuttgart. Fraunhofer Verlag 2016.

PROTE 2018

Prote, J.-P.: Verursachungsgerechte Bewertung von Standortalternativen in Produktionsnetzwerken. Diss. RWTH Aachen (2017). Aachen: Apprimus 2018.

RADKE ET AL. 2019

Radke, A.; be Isa, J.; Tseng, M.-M.; Reinhart, G.: A framework for production planning and control as a service. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 7th Conference on Systems, Process and Control, ICSPC 2019 Proceeding. Piscataway, 2019, S. 14-19.

REINHART & CISEK 2003

Reinhart, G.; Cisek, R.: Mit Mobilität zur wandlungsfähigen Produktion. In: Reinhart, G., Zäh, M. F. (Hrsg.): Marktchance Individualisierung. Berlin: Springer 2003.

REINHART & ZÜHLKE 2017

Reinhart, G.; Zühlke, D.: Von CIM zu Industrie 4.0. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser 2017.

REINHART 2000

Reinhart, G.: Virtuelle Fabrik. Wandlungsfähigkeit durch dynamische Unternehmenskooperationen. Wildemann, H. (Hrsg.): TCW-Report, 21. München: TCW Transfer-Centrum 2000.

REINHART 2012

Reinhart, G.: Fabrikplanung. Skriptum, Technische Universität München, 2012.

REINHART 2017

Reinhart, G.: Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser 2017.

RENZI ET AL. 2014

Renzi, C.; Leali, F.; Cavazzuti, M.; Andrisano, A. O.: A review on artificial intelligence applications to the optimal design of dedicated and reconfigurable manufacturing systems. In: Int Journal of Advanced Manufacturing Technology 72 (2014) 1-4, S. 403–418.

ROHLOFF 1995

Rohloff, M.: Produktionsmanagement in modularen Organisationsstrukturen. Reorganisation der Produktion und objektorientierte Informationssysteme für verteilte Planungssegmente. München.: Oldenbourg 1995.

RÖHRS 2003

Röhrs, A.: Produktionsmanagement in Produktionsnetzwerken. Diss. Universität Siegen. Frankfurt am Main: Lang 2002.

RUDBERG & OLHAGER 2003

Rudberg, M.; Olhager, J.: Manufacturing networks and supply chains: An operations strategy perspective. Omega, 31 (2003) 1, S. 29-39.

RUDORFER 2001

Rudorfer, W.: Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke, Diss. TU München (2001). Forschungsberichte iw 154. München: Utz 2001.

SAGER 2019

Sager, B.: Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke. Diss. TU München (2018). Forschungsberichte iw 344. München: Utz 2019.

SCHEER 1990

Scheer, A.W.: CIM Computer Integrated Manufacturing – Der computergesteuerte Industriebetrieb. 4. Aufl. Berlin: Springer 1990.

SCHELLMANN 2012

Schellmann, H.: Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz. Diss. TU München (2012). Forschungsberichte iw 260. München: Utz 2012.

SCHENK & WIRTH 2004

Schenk, M.; Wirth, S.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. Berlin: Springer 2004.

SCHINDLER 2015

Schindler, S.: Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion. Diss. TU München (2015). Forschungsberichte iw 294. München: Utz 2015.

SCHLIFFENBACHER 2000

Schliffenbacher, K.: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken. Diss. TU München (2000). Forschungsberichte iw 140. München: Utz 2000.

SCHMIDT ET AL. 2014

Schmidt, C.; Meier, C.; Kompa, S.: Informationssysteme für das Produktionsmanagement. In: Schuh, G.; Schmidt, C. (Hrsg.): Produktionsmanagement. Handbuch Produktion und Management. 2. Aufl. Berlin: Springer 2014, S. 281–378.

SCHÖNSLEBEN 2007

Schönsleben, P.: Integrales Logistikmanagement. Operations und Supply Chain Management in umfassenden Wertschöpfungsnetzwerken. 5. Aufl. Berlin: Springer 2007.

SCHÖNSLEBEN 2009

Schönsleben, P.: Changeability of strategic and tactical production concepts. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009), S. 383–386.

SCHUH & KAMPKER 2010

Schuh, G.; Kampker, A.: Strategie und Management produzierender Unternehmen: Handbuch Produktion und Management 1. 2. Aufl. Berlin: Springer 2010.

SCHUH & SCHMIDT 2014

Schuh, G.; Schmidt, C. (Hrsg.): Produktionsmanagement. Handbuch Produktion und Management. 2. Aufl. Berlin: Springer 2014.

SCHUH & STICH 2012

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

SETHI & SETHI 1990

Sethi, A.-K.; Sethi, S.-P.: Flexibility in manufacturing. A survey. In: Int. Journal Flexible Manufacturing Systems 2 (1990) 4, Boston: Kluwer Academic 1990, S. 289-328.

SHI & GREGORY 1998

Shi, Y.; Gregory, M.: International manufacturing networks-to develop global competitive capabilities. In: Journal of Operations Management 16 (1998) 2, S. 195–214.

SIVANANDAM & DEEPA 2008

Sivanandam, S. N.; Deepa, S. N.: Introduction to Genetic Algorithms. Berlin: Springer 2008.

SKINNER 1964

Skinner, W.-C.: Management of international production. Harvard Business Review Boston 42 (1964) 5, S. 125–136.

SMITH ET AL. 1992

Smith, B.; Leimkuhler, J.-F.; Darrow, R.-M.: Yield Management at American Airlines. INFORMS Journal on Applied Analytics 22 (1992) 1, S. 8-31.

SRINIVAS & DEB 1994

Srinivas, N.; Deb, K.: Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. In: Journal of Evolutionary Computation 2 (1994) 3, S. 221-248.

STÜTZLE & RUIZ 2018

Stützle, T.; Ruiz, R.: Iterated Greedy. In: Martí et al. (Hrsg.): Handbook of Heuristics. Cham: Springer 2018, S. 547-577.

SUBRAMANIAN ET AL. 1999

Subramanian, J.; Stidham, S.; Lautenbacher, C. J.: Airline Yield Management with Overbooking, Cancellations and No-Show. Transportation Science 33 (1999) 2, S.135-256.

SUDHOFF 2008

Sudhoff, W.: Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion. Diss. TU München (2007). Forschungsberichte iw 208. München: Utz 2008.

SUGINOUCHI ET AL. 2017

Suginouchi, S.; Kokuryo, D.; Kaihara, T.: Value Co-creative Manufacturing System for Mass Customization: Concept of Smart Factory and Operation Method Using Autonomous Negotiation Mechanism. In: Procedia CIRP 63 (2017), S. 727–732.

SUHL & MELLOULI 2009

Suhl, L.; Mellouli, T.: Optimierungssysteme. Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. Berlin: Springer 2009.

SYDOW 1992

Sydow, J.: Strategische Netzwerke. Evolution und Organisation. Habil. Freie Universität Berlin (1991). Wiesbaden: Gabler 1992.

TAO ET AL. 2014

Tao, F.; Cheng, Y.; Xu, L.; Zhang, L.; Li, B.-H.: CCIoT-CMfg: Cloud Computing and Internet of Things-Based Cloud Manufacturing Service System. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): Trans. Ind. Inf. 10 (2014) 2, S. 1435–1442.

TAO ET AL. 2015

Tao, F.; Zhang, L.; Liu, Y.; Cheng, Y.; Wang, L.; Xu, X.: Manufacturing Service Management in Cloud Manufacturing. Overview and Future Research Directions. In: J. Manuf. Sci. Eng 137 (2015) 4, S. 40912-1 40912-11.

TEMPELMEIER & KUHN 1992

Tempelmeier, H.; Kuhn, H.: Flexible Fertigungssysteme. Entscheidungsunterstützung für Konfiguration und Betrieb. Berlin: Springer 1992.

TERKAJ ET AL. 2009

Terkaj, W.; Tolio, T.; Valente, A.: Focused Flexibility in Production Systems. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. London: Springer, 2009, S. 47-66.

THEKINEN & PANCHAL 2016

Thekinen, J.; Panchal, J.-H.: Resource allocation in cloud-based design and manufacturing: A mechanism design approach. In: Journal of Manufacturing Systems 43 (2016), S. 327–338.

THIEMANN 2013

Thiemann, F.: The Impact of Information and Communication Technology (ICT) on International Trade in Agri-food Products: A gravity approach. Göttingen: Cuvillier 2013.

THOMAS 2013

Thomas, S.: Produktionsnetzwerkssysteme – Ein Weg zu effizienten Produktionsnetzwerken. Diss. Universität St.Gallen, (HSG) 2013.

THYSSENKRUPP 2020

Thyssenkrupp AG (Hrsg.): Geschäftsbericht 2020, Mainz: 2020.

TIGANE ET AL 2017

Tigane, S.; Kahloul, L.; Bourekkache, S.: Reconfigurable Stochastic Petri Nets for Reconfigurable Manufacturing Systems. In: Borangu et al. (Hrsg.): Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Cham: Springer 2017.

TOMCZAK 1992

Tomczak, T.: Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft: Ein Plädoyer für den qualitativen Forschungsansatz, In: Marketing: Zeitschrift für Forschung und Praxis 14 (1992) 2, C.H. Beck, S.77-87.

TSAI ET AL. 2015

Tsai, M.-W.; Hong, T.-P.; Lin, W.-T.: A Two-Dimensional Genetic Algorithm and Its Application to Aircraft Scheduling Problem. In: Mathematical Problems in Engineering 2015, S. 1–12.

TSENG & PILLER 2003

Tseng, M.-M.; Piller, F.: The customer centric enterprise. Advances in mass customization and personalization. Berlin: Springer 2003.

TSENG & RADKE 2011

Tseng, M.-M.; Radke, A.-M.: Production Planning and Control for Mass Customization – A Review of Enabling Technologies. In: Fogliatto et al. (Hrsg.): Mass Customization. London: Springer 2011, S. 195–218.

TUNG SUN CHAN & CHUNG 2007

Tung Sun Chan, F.; Chung, S. H. (2007): Distributed Scheduling in Multiple-factory Production with Machine Maintenance. In: Wang, L. (Hrsg.): Process planning and scheduling for distributed manufacturing. London: Springer, S. 243–267.

UDE 2010

Ude, J.: Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke. Ein Bewertungsansatz unter Berücksichtigung multikriterieller Zielsysteme, Dynamik und Unsicherheit. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsberichte wbk. Karlsruhe: Shaker 2010.

ULRICH & FLURI 1984

Ulrich, P.; Fluri, E.: Management: Eine konzentrierte Einführung. 3. Aufl. Bern: Haupt 1984.

ULRICH & HILL 1976

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). WiSi Zeitschrift für Studium und Forschung, 7 (1976), S. 304-309.

UMBARKAR & SHETH 2015

Umbarkar, A.-J.; Sheth, P.-D.: Crossover operators in genetic algorithms: A review. In: IJSC 06 (2015) 1, S. 1083–1092.

UNCTAD 2020

UNCTAD – United Nations Conference on Trade and Development: World Investment Report 2020: International production beyond the pandemic. New York: United Nations publication 2020.

VDI-RICHTLINIE 2860

VDI-Richtlinie 2860 (Hrsg.): Montage- und Handhabungstechnik: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen: Begriffe, Definitionen, Symbole. Berlin: Springer 1990.

VEREECKE & DE MEYER 2009

Vereecke, A.; De Meyer, A.: The dynamic management of manufacturing networks. In: Vlerick Leuven Gent Working Paper Series 15, 2009.

VEZA ET AL. 2015

Veza, I.; Mladineo, M.; Gjeldum, N.: Managing Innovative Production Network of Smart Factories. In: IFAC-PapersOnline 48 (2015) 3, S. 555–560.

WARNECKE 1992

Warnecke, H.-J.: Die Fraktale Fabrik. Revolution der Unternehmenskultur. Berlin: Springer 1992.

WEGENER 2003

Wegener, I.: Komplexitätstheorie: Grenzen der Effizienz von Algorithmen. Berlin: Springer 2003.

WERNERS 2008

Werners, B.: Grundlagen des Operations Research. Berlin: Springer 2008.

WESTKÄMPER & LÖFFLER 2016

Westkämper, E.; Löffler, C.: Strategien der Produktion. Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis. Berlin: Springer 2016.

WESTKÄMPER & ZAHN 2009

Westkämper, E.; Zahn, E.: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Berlin: Springer 2009.

WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin: Springer 2006.

WESTKÄMPER ET AL. 2000

Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen – Ein Bezugsrahmen für die Unternehmensentwicklung im turbulenten Umfeld. *wt Werkstattstechnik* 90 (2000) 1-2, S. 22-26.

WIEDEMANN & ZÄH 2011

Wiedemann, M.; Zäh, M.-F.: Konzept zur Terminplanung im Angebotsprozess individualisierter Produkte. In: *wt Werkstattstechnik online* 101 (6), 2011.

WIENDAHL & LUTZ 2002

Wiendahl, H.-P.; Lutz, S.: Production in Networks. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 51 (2002) 2, S. 573–586.

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. 197-211.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. München, Carl Hanser: 2010.

WIENDAHL 2011

Wiendahl, H.-H.: *Auftragsmanagement in der industriellen Produktion – Grundlagen, Konfiguration, Einführung*. Heidelberg: Springer, 2011.

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. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56, (2007), S. 783–809.

WIENDAHL ET AL. 2018

Wiendahl, H.-H.; Kluth, A.; Kipp, R.: *Marktspiegel Business Software – MES - Fertigungssteuerung 2017/2018*. Fraunhofer IPA, trovarit AG (Hrsg.). 6. Aufl. Aachen: 2018.

WILDEBRAND 2009

Wildebrand, H.: *Kundenindividuelle Massenproduktion zur Bewältigung überkapazitätsbedingter Unternehmenskrisen*. Frankfurt: Peter Lang 2009.

WITTEK 2011

Wittek, K.; Volling, T.; Spengler, T.-S.; Gundlach, F.-W.: Tactical Planning in Flexible Production Networks in the Automotive Industry. In: Bo Hu et al. (Hrsg.): Operations Research Proceedings 2010. Selected Papers of the Annual International Conference of the German Operations Research Society. Berlin: Springer 2011, S. 429–434.

WITTEK 2013

Wittek, K.: Standortübergreifende Programmplanung in flexiblen Produktionsnetzwerken der Automobilindustrie. Diss. TU Braunschweig. Wiesbaden: Springer 2013.

YANG ET AL. 2010

Yang, F.-C.; Chen, K.; Wang, M.-T.; Chang, P.-Y.; Sun, K.-C.: Mathematical modeling of multi-plant order allocation problem and solving by genetic algorithm with matrix representation. In: Int J Adv Manuf Technol 51 (2010) 9-12, S. 1251–1259.

YOUSSEF & ELMARAGHY 2007

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

ZÄH ET AL 2005

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: Zäh et al. (Hrsg.): 1st Int. Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). München, 22.-23. September 2005. München: Utz 2005. S. 3-10.

11 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertationsschrift wurden zwischen 2016 und 2020 am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) sowie an der Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) unter wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors Studienarbeiten betreut. Diese haben sich mit Fragestellungen der Produktionsplanung von Produktionsnetzwerken befasst. Der Autor dankt den Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit. Im Folgenden sind die Studienarbeiten in alphabetischer Reihenfolge des Nachnamens der Autoren aufgeführt.

Banhardt, J.: Entwicklung einer Methode zur Produktionsplanung in rekonfigurierbaren Produktionsnetzwerken, Masterarbeit, Technische Universität München, 2018, eingeflossen in die Definition des Gesamtkonzeptes sowie Abschnitt 3.2.

Can-Prigge, A.: Entwicklung einer Methode zur Generierung, Abbildung und Bewertung von Produktionssystemkonfigurationen mithilfe dynamischer Layoutplanungsverfahren, Masterarbeit, Leuphana Universität Lüneburg, 2019, eingeflossen in die Definition des Gesamtkonzeptes.

Deim, M.: Entwicklung eines Systems zur intelligenten Produktionsplanung von rekonfigurierbaren Produktionsnetzwerken, Masterarbeit, Technische Universität München, 2019, eingeflossen in die Abschnitte 5.3, 6.4 und Kapitel 7.

Epha, H.: Produktionsplanungsservice zur Auftragsverteilung in Produktionsnetzwerken mit auftragsbezogener Produktion, Masterarbeit, Technische Universität Berlin, 2018, eingeflossen in die Abschnitte 5.3 und 6.3

Gauckler, V.: Entwicklung eines Produktionsplanungsmodells zur auslastungsoptimierten Auftragsverteilung in rekonfigurierbaren Produktionsnetzwerken, Semesterarbeit, Technische Universität München, 2018, eingeflossen in die Definition des Gesamtkonzeptes

Maier, K.: Auslastungsoptimierung in einem globalen Produktionsnetzwerk, Masterarbeit, Technische Universität München, 2017, eingeflossen in die Definition des Gesamtkonzeptes

Nefzger, J.: Entwicklung eines Systems zur Planung global verteilter Produktionskapazitäten, Masterarbeit, Technische Universität München, 2019, eingeflossen in Abschnitt 5.2, 6.3 und 6.4.

Oettl, F.: Entwicklung einer Methode zur Auslastungsoptimierung von rekonfigurierbaren Produktionsnetzwerken mittels eines Simulationsmodells, Masterarbeit, Universität Augsburg, 2018, eingeflossen in die Definition des Gesamtkonzeptes.

Wang, T.: Entwicklung eines metaheuristischen Kapazitätsplanungssystems für kurzfristig rekonfigurierbare Wertschöpfungsnetzwerke, Masterarbeit, Technische Universität München, 2017, eingeflossen in die Definition des Gesamtkonzeptes.

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Exemplarisches dynamisches Produktionsnetzwerk	5
Abbildung 2: Wissenschaftssystematik und Einordnung der Arbeit (in Anlehnung an ULRICH & HILL 1976).....	7
Abbildung 3: Heuristischer Bezugsrahmen der Arbeit	8
Abbildung 4: Angewandter Forschungsansatz nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009)	10
Abbildung 5: Aufbau der Arbeit	12
Abbildung 6: Produktionssystemebenen (in Anlehnung an WESTKÄMPER 2006, WIENDAHL ET AL. 2007)	14
Abbildung 7: Produktionssystem und Wertschöpfungsprozess (in Anlehnung an DYCKHOFF 2006, GÜNTHER & TEMPELMEIER 2012).....	15
Abbildung 8: Phänotypen von Produktionsnetzwerken (in Anlehnung an ABELE ET AL. 2008)	18
Abbildung 9: Kundenentkopplungspunkt und dazugehörige Individualisierungsansätze (in Anlehnung an PILLER & STOTKO 2003, OSTGATHE 2012)	23
Abbildung 10: Zusammenhang Wandlungsfähigkeit, Flexibilität und Rekonfiguration (in Anlehnung an ZÄH ET AL. 2005, NYHUIS ET AL. 2008, SCHELLMANN 2012, HOCHDÖRFFER ET AL. 2016).....	26
Abbildung 11: Aspekte der Flexibilität (in Anlehnung an CHRYSSOLOURIS 2006, REINHART 2012)	27
Abbildung 12: Strukturierung der Rekonfiguration in physisch und logisch (in Anlehnung an ELMARAGY 2006, WIENDAHL ET AL. 2007, GOYAL ET AL. 2012)	28
Abbildung 13: Übersicht Informationssysteme in der Produktion (in Anlehnung an DIN EN 62264-1, SCHMIDT ET AL. 2014, KLETTI 2015)	37
Abbildung 14: Beispielhafter Ablauf eines genetischen Algorithmus (in Anlehnung an BUTTELMANN & LOHMANN 2004)	51
Abbildung 15: Übersicht und Interaktionsnetz des Systems zur kurzfristigen Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken.....	56
Abbildung 16: Morphologische Analyse zur Eingrenzung des Betrachtungs- umfanges.....	60
Abbildung 17: Systemüberblick.....	62
Abbildung 18: Übersicht des Datenmodells als Paketdiagramm zur Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken.....	67
Abbildung 19: UML Semantik am Beispiel des Klassendiagramms.....	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 20: Beschreibung des Auftrags- und Produktmodell mittels UML-Klassendiagramm.....	70
Abbildung 21: Beschreibung des Netzwerkmodells mittels UML- Klassendiagramm	72
Abbildung 22: Beschreibung des Logistikmodells mittels UML- Klassendiagramm	73
Abbildung 23: Erweiterter Ansatz des Prozessvariantenplanes (in Anlehnung an KÄSCHEL ET AL. 2014)	75
Abbildung 24: Beispielhafte Pareto-Front des NSGA-II (in Anlehnung an GOYAL ET AL. 2012).....	77
Abbildung 25: Modell der genetischen Repräsentation zur Auftragsallokation von Produktionsnetzwerkkonfigurationen (in Anlehnung an BE ISA ET AL. 2018)	78
Abbildung 26: Sortierprozess des NSGA-II (in Anlehnung an DEB ET AL. 2002).....	80
Abbildung 27: Konzept der virtuellen Kapazitätsgrenze (nach ATUG ET AL. 2016)	81
Abbildung 28: Anwendung des Surge Multipliers anhand eines Chromosoms einer Netzwerkkonfiguration	86
Abbildung 29: Übersicht und Ablauf der entwickelten Methode zur Produktionsplanung.....	89
Abbildung 30: Schematische Auftragskonsolidierung	91
Abbildung 31: Aggregierte Produktionsauftragsliste	93
Abbildung 32: Anforderungs-Fähigkeits-Abgleich mittels Technologievektoren (in Anlehnung an BE ISA ET AL. 2018)	95
Abbildung 33: Übersicht Pseudo-Code	109
Abbildung 34: Schematische Darstellung Offspring und Crossover-Operator ..	111
Abbildung 35: Ergebnisse des NSGA-II für Netzwerkkonfigurationen: Vergleich der Zielfunktionswerte und der dazugehörigen Pareto-Fronten nach 1, 5, 10 und 20 Generationen.....	116
Abbildung 36: Modellierung des Produktionsnetzwerkes der Pilotanwendung für die Konsumgüterindustrie	121
Abbildung 37: Aufträge und betrachtete Prozessschritte (in Anlehnung an BE ISA ET AL. 2020)	123
Abbildung 38: Ergebnisse der Produktionsszenarien 1 bis 5	130
Abbildung 39: Ergebnisse der Produktionsszenarien 6 bis 8	132
Abbildung 40: Ergebnisse der Produktionsszenarien 9 bis 12	133

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 6-1: Verwendete Eingangsparameter	99
Tabelle 7-1: Exemplarische kundenindividuelle Aufträge im Planungshorizont.....	122
Tabelle 7-2: Kodierung der Transportmittel	124
Tabelle 7-3: Planungsmodelle zur Validierung	125
Tabelle 7-4: Datenset mit Standardwerten für den Testplan	127
Tabelle 7-5: Testplan mit einzelnen Produktionsszenarien	128
Tabelle 7-6: Durchschnittliche Anzahl geplanter Aufträge in PSZ 1 bis PSZ 5	129
Tabelle 7-7: Durchschnittliche Anzahl umgesetzter Aufträge in PSZ 6, PSZ 7 und PSZ 8	131
Tabelle 8-1: Investitions- und Betriebskosten im Referenzszenario (Experten-schätzung).....	137

14 Anhang

